

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria di ingegneria civile

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**Valutazione con algoritmi genetici delle spinte del terreno su rivestimenti
di gallerie a partire da risultati di sistemi di monitoraggio**



Relatore

prof. Gabriele Bertagnoli

Candidato

Francesco Marino

Anno accademico 2017/2018

Sommario

Introduzione	5
1 Il ruolo del monitoraggio per le opere in sotterraneo	1
1.1 Introduzione.....	1
1.2 La progettazione geotecnica nello scavo di gallerie	3
1.2.1 Indagini geotecniche, prove in situ e di laboratorio	3
1.2.2 Classificazione dell'ammasso roccioso.....	6
1.2.3 Definizione del modello geomeccanico	7
1.2.4 Metodi numerici nell'ingegneria geotecnica.....	10
1.2.5 Il metodo osservazionale	11
1.3 Monitoraggio nelle gallerie	12
1.3.1 Introduzione	12
1.3.2 Scopo ed obiettivo del monitoraggio	12
1.3.3 Concetti di base	13
1.3.4 Le stazioni di misura	14
1.3.4.1 Stazioni di misura principali	14
1.3.4.2 Stazioni di misura dell'estrusione.....	15
1.3.4.3 Stazioni di controllo.....	15
1.3.4.4 Stazioni di misura sistematiche.....	15
1.3.5 Strumentazione geotecnica.....	16
1.3.5.1 Monitoraggio topografico con stazione totale e mire ottiche	16
1.3.5.2 Misurazione di cedimenti e spostamenti.....	17
1.3.5.3 Misurazione dei livelli di falda o delle pressioni neutre	19
1.3.5.4 Misurazione dello stato tensionale e deformativo	20
1.3.6 Monitoraggi in corso d'opera.....	21
1.3.7 Monitoraggio in esercizio.....	23
2 Introduzione agli algoritmi genetici	26
2.1 Principi di base e terminologia degli algoritmi euristici di tipo genetico.....	26
2.2 La nascita degli algoritmi genetici.....	27
2.3 La teoria di Holland.....	28
2.4 Algoritmo genetico di base.....	29
2.4.1 Codifica dei problemi.....	29
2.4.2 Definizione della funzione di fitness.....	30
2.4.3 Selezione degli individui.....	31

2.4.4	Riproduzione degli individui: operatori genetici	33
2.4.4.1	Cross-over (o incrocio)	33
2.4.4.2	Mutazione	34
2.4.4.3	Inversione.....	34
2.4.4.4	funzione aritmetica.....	35
2.4.5	Convergenza dell'algoritmo	35
2.4.6	Schematizzazione di un algoritmo	35
2.5	Campi di applicazione, vantaggi e svantaggi degli AG.....	38
3	Creazione del modello strutturale e dell'algoritmo genetico per la previsione della spinta delle terre	39
3.1	Modello strutturale	39
3.2	Creazione dell'algoritmo	40
3.2.1	Obiettivo dell'algoritmo	40
3.3	Componenti dell'AG	40
3.3.1	Definizione del Target.....	40
3.3.2	Codifica degli individui.....	41
3.3.3	Assegnazione del punteggio attraverso la funzione di fitness.....	54
3.3.4	Criterio di selezione degli individui	56
3.3.5	Meccanismi di riproduzione.....	56
3.3.5.1	Meccanismo di mutazione	57
3.3.5.2	Meccanismo di cross-over	57
3.3.6	Output dell'algoritmo	58
3.3.7	Convergenza dell'algoritmo	60
4	Taratura del modello strutturale e applicazioni dell'algoritmo	61
4.1	Panoramica sulle applicazioni	61
4.2	Prima applicazione: Semplice ovalizzazione	62
4.2.1	Analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale	63
4.2.1.1	Popolazione iniziale con 24 individui.....	63
4.2.1.2	Popolazione iniziale con 48 individui.....	67
4.2.1.3	Popolazione iniziale con 72 individui.....	71
4.2.2	Analisi della variabilità della popolazione iniziale	75
4.2.2.1	Popolazione iniziale con 24 individui.....	75
4.2.2.2	Popolazione iniziale con 48 individui.....	79

4.2.2.3	Popolazione iniziale con 72 individui.....	83
4.3	Seconda applicazione: Ovalizzazione e rotazione.....	87
4.3.1	Analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale	88
4.3.1.1	Popolazione iniziale con 24 individui.....	88
4.3.1.2	Popolazione iniziale con 48 individui.....	92
4.3.1.3	Popolazione iniziale con 72 individui.....	96
4.3.2	Analisi della variabilità della popolazione iniziale	100
4.3.2.1	Popolazione iniziale con 24 individui.....	100
4.3.2.2	Popolazione iniziale con 48 individui.....	104
4.3.2.3	Popolazione iniziale con 72 individui.....	108
4.4	Incidenza del valore di rigidezza delle molle del modello strutturale.....	112
4.4.1	Modello strutturale con rigidezza delle molle pari a 500 kN/m.....	112
4.4.2	Modello strutturale con rigidezza delle molle pari a 2000 kN/m.....	116
4.4.3	Confronto dei risultati al variare della rigidezza delle molle	120
5	Considerazioni finali.....	123
5.1	Criticità e miglioramenti.....	124
6	Allegati.....	125
	<i>Ringraziamenti</i>.....	130
	<i>Bibliografia</i>	131

Abstract

La variabilità in ambito geotecnico, associata alla definizione di numerosi parametri di cui molti costituiti da una grande incertezza ed arbitrarietà, porta spesso a risultati poco rappresentativi della realtà.

Con questo presupposto si è sviluppato l'algoritmo presente in questo elaborato, al fine di riuscire ad ottenere una stima delle principali grandezze utilizzate nelle verifiche tecniche, partendo dai dati soli dati del monitoraggio in fase di esercizio, dalla geometria della struttura e da pochi altri parametri necessari per la definizione del problema.

Il metodo proposto può essere dunque applicato in parallelo ai classici modelli geotecnici, tuttavia per la sua realizzazione sono necessari software con un grado di complessità nettamente inferiore.

Introduzione

La concezione della manutenzione delle strutture civili ha subito un profondo cambiamento, in particolare negli anni più recenti, dove un maggiore interesse rispetto al passato viene dato ai danneggiamenti, non soltanto in presenza di azioni eccezionali, ma soprattutto in condizioni di esercizio dove mai si è posta la corretta attenzione.

Inevitabilmente, l'evoluzione dell'ingegneria e le esigenze sempre crescenti hanno condotto alla realizzazione di opere sempre più complesse e al limite della capacità di resistenza dei materiali; per tali ragioni si è definita la necessità di un maggiore controllo delle opere per comprendere meglio il cambiamento delle sollecitazioni a cui sono sottoposte.

In particolare per le strutture esistenti, l'acquisizione di dati per l'analisi del loro comportamento è un argomento molto attuale su cui oggi si ripone l'attenzione; tali analisi sono possibili soltanto grazie ad un progetto di monitoraggio strutturale ben curato.

Lo sviluppo del monitoraggio strutturale, dovuto alle moderne tecnologie, ha aumentato il livello di dettaglio e la mole delle informazioni acquisite, infatti questo tipo di monitoraggio viene appunto chiamato SHM (Structural Health Monitoring); tuttavia queste informazioni necessitano di un'analisi ed interpretazione.

In questo elaborato, che si inserisce nel contesto del monitoraggio strutturale e della verifica delle strutture, verrà esposto uno strumento utile proprio per l'interpretazione di tali dati.

Nello specifico sono state sviluppate tecniche di soft computing, ponendo come obiettivo la previsione dei carichi e delle sollecitazioni, che agiscono sul rivestimento di una galleria, soggetta alle spinte del terreno.

Per conseguire tale obiettivo, è stato utilizzato un algoritmo genetico, creato appositamente per il caso in esame, avvalendosi di un software di calcolo strutturale per il calcolo di sollecitazioni e spostamenti, sfruttando i dati del monitoraggio strutturale allo scopo di tentare di risalire all'andamento dei carichi che agiscono sulla struttura e delle tensioni all'interno del rivestimento. Una particolarità di tale strumento è la semplicità dei software utilizzati, poiché non vengono svolti particolari tipi di analisi, ma soltanto dei procedimenti iterativi e oculati.

L'applicazione degli algoritmi genetici è ormai comune nell'ambito dell'ingegneria, poiché grazie alla loro versatilità, rappresentano un valido strumento per affrontare problemi di

diverso genere; tuttavia non sono stati riscontrati in bibliografia applicazioni simili, il che porta ad una maggiore valutazione di quest'ultimi per la risoluzione di problemi legate alle verifiche strutturali dei rivestimenti di gallerie.

L'elaborato proposto si sviluppa con la seguente struttura:

Capitolo 1. Viene esposto il ruolo del monitoraggio nelle opere in sotterraneo, e dove esso si colloca nella progettazione geotecnica e strutturale, esponendo in particolar modo il suo ruolo sia in fase di esercizio che in fase di costruzione. Verranno illustrati anche i principali strumenti utilizzati nel monitoraggio delle gallerie.

Capitolo 2. Vengono presentati cenni sugli algoritmi genetici, a partire dalla loro formulazione fino a spiegarne i principali componenti e i loro campi di applicazione. Da tale capitolo si potrà evincere il criterio utilizzato per la creazione dell'algoritmo applicato in questo elaborato.

Capitolo 3. In tale capitolo viene presentato il criterio utilizzato per la scelta dei principali aspetti che caratterizzano l'algoritmo, in relazione al problema di verifiche delle gallerie, contemplando la preliminare analisi effettuata per la schematizzazione dei tipi e forme di carichi che solitamente agiscono nei tunnel.

Viene quindi introdotto e commentato l'output che fornisce l'algoritmo, fornendo anche il criterio per l'analisi della convergenza di quest'ultimo.

Capitolo 4. Vengono presentati una serie di applicazioni, per valutare quali sono i principali parametri, tra quelli approfonditi, che incidono principalmente nella soluzione e nella convergenza dell'algoritmo. Nello specifico verranno analizzati casi in cui si analizza l'influenza della popolazione iniziale che caratterizza l'algoritmo, considerata in prima battuta fissa e successivamente anche variabile. Vengono altresì incrementati in tali prove il numero di individui per evidenziare la dipendenza di tale parametro, assieme ai test legati alla valutazione dell'influenza della rigidità delle molle che caratterizzano il modello strutturale della galleria.

Un'ulteriore applicazione, con le finalità comparative, è stata effettuata imponendo come obiettivo l'output di una galleria, elaborata attraverso un software di modellazione geotecnica, per fornire un giudizio sulla prestazione dell'algoritmo.

Capitolo 5. L'ultimo capitolo dell'elaborato sarà destinato al commento critico dei risultati ottenuti, confrontando questi con l'obiettivo prefissato preliminarmente.

Vengono inoltre suggeriti possibili varianti e miglioramenti dell'algoritmo per l'ottenimento di un codice più robusto ed in grado di fornire una soluzione più precisa in relazione al problema.

1 Il ruolo del monitoraggio per le opere in sotterraneo

1.1 Introduzione

Le opere in sotterraneo rappresentano l'insieme delle costruzioni antropiche che prevedono l'apertura di una cavità nel sottosuolo; tra le principali opere è possibile citare: pozzi, caverne e gallerie.

Di seguito verranno trattati argomenti inerenti alle gallerie, tuttavia i principali aspetti teorici abbracciano ampiamente altri tipi di costruzioni in generale.

Le gallerie sono infrastrutture civili realizzati per diversi obiettivi in diversi campi dell'ingegneria, come l'ingegneria idraulica e mineraria, ma principalmente impiegate nei campi dell'ingegneria stradale e ferroviaria, per il superamento di ostacoli che implicherebbero altrimenti tracciati esterni complessi, onerosi o di difficile realizzazione.

La costruzione di tali opere non sempre è di facile realizzazione, poiché è fortemente condizionata da condizioni esterne, fra tutte la qualità dei terreni e delle rocce presenti in situ, che comportano la nascita di problematiche, risolvibili mediante particolari tecniche costruttive e operazioni di consolidamento e stabilizzazione, da inserire però in un'analisi preliminare di costi-benefici, che può pregiudicare o meno la realizzazione dell'opera stessa.

Le gallerie possono suddivise in due tipologie:

- Gallerie naturali
- Gallerie artificiali

Nelle gallerie naturali la roccia e/o il terreno inglobano completamente le pareti dell'opera (scavo a foro cieco) e possono ulteriormente essere suddivise in gallerie profonde e superficiali.

La differenza principale fra tunnel profondi e superficiali è rappresentata dal fatto che nelle superficiali i fenomeni deformativi e/o di rottura nel terreno nell'intorno del cavo si manifestano sino al piano campagna, inoltre l'equilibrio delle pareti è influenzato da molti aspetti come la ridotta copertura in gioco, dalla presenza di materiali sciolti e dunque problematiche relative a dissesti ed all'influenza delle azioni meteoriche sulla struttura.

Le gallerie profonde, che si collocano a profondità oltre i 60 metri, o comunque con una profondità superiore a tre volte di diametro della galleria stessa, sono principalmente affette da problemi derivanti dalle difficoltà di prevedere il comportamento delle rocce dovuto del detensionamento locale in seguito all'asportazione del materiale, ma anche all'incertezza dei parametri meccanici in gioco.

Le gallerie artificiali (scavo a cielo aperto) sono caratterizzate da una preliminare scavo di una trincea, con la successiva fase di esecuzione delle opere strutturali; può avvenire un'ulteriore fase di costruzione, rappresentata dalla procedura di ricopertura dell'opera stessa. Un esempio di questo tipo di opera sono le gallerie parietali, realizzate con lo scopo di contrastare l'instabilità dei pendii oppure gallerie paramassi o paravalanghe destinate a proteggere la sede stradale o ferroviaria. nelle gallerie artificiali.

Molto spesso, essendo non circondati da roccia o terra, possono avere forme geometriche scatolari, diverse da quelle naturali la cui forma dipende dalla tecnica di scavo utilizzata.

Le tecniche di scavo possono essere suddivise in due gruppi:

- Metodi tradizionali
- Metodi meccanizzati

La metodologia tradizionale prevede uno scavo mediante pale meccaniche, o cariche esplosive piazzate nel fronte di scavo, con conseguente consolidazione della parte del tunnel già scavata. In tale caso l'avanzamento può essere progressivo, parzializzando la sezione in settori da cui asportare il materiale scavato, oppure a sezione piena, a seconda della stabilità della roccia e del terreno presente in situ e dalle dimensioni geometriche del tunnel da realizzare.

L'esecuzione dello scavo con l'utilizzo di esplosivo prevede la realizzazione di fori nel fronte di scavo (paralleli o inclinati fra loro) e saturati dal materiale detonante; questi fori vengono creati mediante speciali macchine di perforazione ("Drilling Jumbo") dotate di aste metalliche (chiamate "fioretti") attrezzate all'estremità con mezzi taglienti che creano i fori su cui verranno piazzate le mine da detonare.

La scelta dello schema dei fori ed il quantitativo dei fori è fondamentale per la riuscita dello scavo, come è importante anche la sequenza di detonazione, con la possibilità di scelta di brillare il fronte in maniera sequenziale (con intervalli di pochi millisecondi) oppure con volate uniche, a seconda della qualità del materiale nel sito.

Prima della detonazione è molto importante effettuare, ove necessario, un consolidamento dell'aria da scavare, mentre in seguito all'esplosione si procede sempre alla stabilizzazione di tutta l'area interessata mediante chiodature, tiranti e/o centine.

I metodi meccanizzati prevedono l'utilizzo di una Tunneling Boring Machine ("TBM", mostrata in Fig. 1) equipaggiate di una testa fresante caratterizzata da elementi ad alta resistenza che, mediante la rotazione della fresa e della spinta applicata alla TBM, si creano tensioni tangenziali che provocano la rottura a taglio del terreno. Un ulteriore elemento che li caratterizza sono gli scudi laterali, posti a contatto con il bordo della galleria, che hanno la funzione di applicare una pressione interna al fine di modificare lo stato tensionale nell'intorno del foro per evitare la rottura e quindi il crollo delle pareti appena scavate.

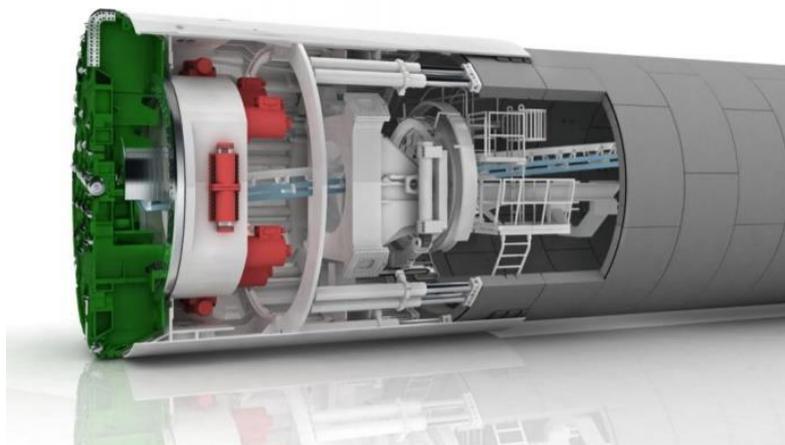


Figura 1 - Modello 3D di una Tunneling Boring Machine

Il punto 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), alla 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 abbatta le probabilità di crolli delle pareti del cavo, ed anche dall'efficienza di smaltimento dello smarino¹ 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 alla qualità dell'ammasso roccioso che presenta problemi anche in caso di qualità molto elevata dell'ammasso roccioso, in quanto questo aspetto comporta una maggiore usura dei componenti e quindi un incremento dei costi dovuti alla loro sostituzione ed all'allungamento dei tempi, legati a tale operazione.

1.2 La progettazione geotecnica nello scavo di gallerie

Secondo la progettazione geotecnica per le opere civili, e dunque anche delle gallerie, sono definite delle fasi precise da seguire:

1. Caratterizzazione e modellazione geologica del sito;
2. Scelta del tipo di opera o intervento e programmazione delle indagini geotecniche;
3. Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce e definizione dei modelli geotecnici di sottosuolo;
4. Descrizione delle fasi e delle modalità costruttive;
5. Verifica della sicurezza e delle prestazioni;
6. Piani di controllo e monitoraggio.

La caratterizzazione del sito consiste nella ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, strutturali e, più generalmente della pericolosità geologica del sito.

Tali informazioni sono ottenute attraverso la relazione geologica redatta al fine di risultare un riferimento per il progettista per inquadrare i problemi geotecnici e stabilire le indagini da eseguire per definire i parametri geotecnici per descrivere i materiali in situ.

1.2.1 Indagini geotecniche, prove in situ e di laboratorio

Le indagini, le prove in situ e in laboratorio consentono di effettuare la caratterizzazione geotecnica che ha come obiettivo quello di "prevedere" le condizioni dell'ammasso roccioso in profondità.

¹ Si definiscono smarino i detriti (sia terre sciolte, o frammenti rocciosi) provenienti dai lavori di scavo di gallerie, minitunnel e microtunnel, cave e miniere. Lo smarino di miniera riguarda la frazione di roccia disgregata che non contiene il minerale oggetto della coltivazione mineraria oppure che lo contiene in minime percentuali, inferiori a quelle richieste per un recupero economico del minerale dal detrito stesso

La previsione è svolta attraverso:

- l'individuazione delle zone omogenee interessate dallo scavo ed i parametri geotecnici ad essa associata;
- Il modello geotecnico che sarà utilizzato nei calcoli di progetto;
- l'eventuale presenza di falde acquifere, moti di filtrazione e delle discontinuità presenti.

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 sismiche delle onde 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 di un "modulo elastico", mentre con cicli a carico costante per ottenere indicazioni del comportamento deformativo della roccia nel tempo (creep);
- Martinetti piatti, per ottenere una stima del modulo di deformazione della matrice rocciosa, che caratterizza la sua risposta elastica;
- Prova di fratturazione idraulica, che permette di ottenere indicazioni sullo stato tensionale del sito applicando ad un foro 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.

Inoltre è anche necessario valutare in sito la resistenza a taglio delle discontinuità presenti, affidandosi al modello di Burton, i cui parametri sono valutati mediante semplici prove di scivolamento.

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 necessarie ulteriori test svolti in laboratorio, ed ancor più importanza hanno tali prove se si deve caratterizzare un ammasso roccioso.

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 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 in base ai minerali contenuti nella roccia, 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: esso è calcolato in relazione all'unità di volume ed all'unità di volume secco, e generalmente, tali valori, risultano inversamente proporzionali alla porosità;
- Resistenza a compressione monoassiale;
- Resistenza a trazione monoassiale.

Dunque per determinare il comportamento meccanico della roccia, vengono svolte le classiche prove di trazione, diretta ed indiretta, e prove di compressione monoassiale in cui vengono misurare 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 di alcuni materiali contenuti nella roccia con l'acqua) 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).

1.2.2 Classificazione dell'ammasso roccioso

Una volta svolte le prove necessarie per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso e delle discontinuità, si effettua una classificazione del materiale 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)

L'indice RSR rappresenta il primo tentativo di classificare l'ammasso roccioso ed è funzione di tre parametri base che tengono conto della struttura geologica, dell'influenza delle discontinuità e agli effetti del flusso idraulico sotterraneo; noti tutti i parametri la loro somma definisce appunto l'indice RSR.

La classificazione mediante Q comporta la definizione di una serie di parametri per ottenere il valore dell'indice, che può variare da 0.01 a 1000, calcolato mediante la formula:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \right) \frac{\sigma_c}{100}$$

In cui:

- RQD (Rock Quality Designation) è indice di fratturazione, da un'indicazione sulla spaziatura tra i pezzi delle carote prelevati in situ;
- J_n è un indice che esprime il numero di sistemi di discontinuità, quando è alto, peggiora la qualità dell'ammasso roccioso;
- J_r dipende dalla scabrezza delle discontinuità;
- J_a dipende dal grado di alterazione della superficie dei giunti e dall'eventuale materiale di riempimento;
- J_w è un coefficiente di riduzione che prende in considerazione le venute di acqua;
- SRF è un fattore di riduzione funzione dello stato tensionale in sito.

Per ognuno di questi parametri esistono degli abachi che facilitano la definizione del loro valore; si è inoltre stabilita una connessione fra tale indice e la velocità dell'onda elastica longitudinale in sito V_p per profondità non superiori ai 50 m che consente anche una stima del modulo di deformazione E_d dell'ammasso roccioso.

Il metodo RMR è quello più usato nella meccanica delle rocce e prevede la definizione di cinque parametri:

1. Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta;
2. Rock Quality Designation (RQD);

3. Spaziatura delle discontinuità;
4. Condizioni delle discontinuità;
5. Presenza d'acqua

Si aggiunge a questi un ulteriore parametro legato alla valutazione dell'influenza della giacitura dei sistemi di discontinuità in rapporto alla direzione di scavo.

La somma di questi parametri permette di risalire, con l'ausilio di un'apposita tabella, ad un valore numerico, l'indice RMR, che può variare da 0 a 100; questa tabella definisce anche cinque classi di qualità dell'ammasso roccioso in funzione proprio dell'indice stesso.

Inoltre, da tale indice è possibile risalire ad una stima di parametri meccanici fondamentali come la coesione, l'angolo d'attrito e modulo elastico, attraverso delle relazioni empiriche, e risulta che tanto più è grande il valore RMR, maggiore è la qualità della roccia.

Il Geological Strength Index (GSI) è un ulteriore indice, che può essere ricavato a partire dal valore dell'RMR, che copre anche casi in cui si hanno formazioni rocciose con strutture complesse, e grazie ad esso è possibile classificare attraverso degli abachi, l'ammasso roccioso. Questo indice ha una certa rilevanza in quanto è alla base di molte relazioni empiriche per il calcolo di parametri che regolano il criterio di rottura standard del materiale roccia, il criterio di Hoek e Brown, come verrà brevemente esposto in seguito.

Da diversi studi (Rutledge e Preston, 1978) sono state definite relazioni empiriche che legano gli indici per la classificazione dell'ammasso roccioso, ottenendo così la possibilità del calcolo di tutti gli indici a partire da quelli di più facile determinazione come il GSI.

1.2.3 Definizione del modello geomeccanico

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 del cavo allora il comportamento di questo volume rappresentativo 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. A spiegazione di ciò è possibile osservare la figura seguente Fig.2 estratta dalla trattazione di Hoek e Brown.

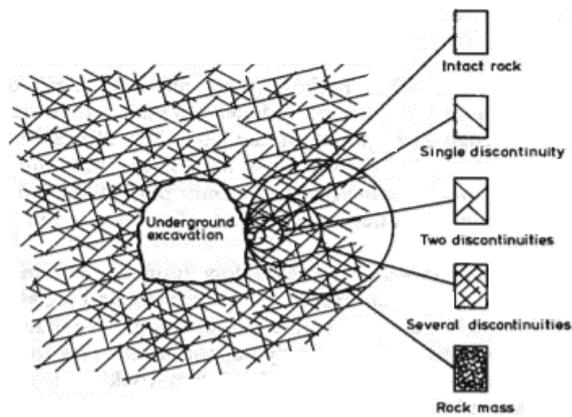


Figura 2 - Rappresentazione grafica del concetto del R.E.V (Hoek e Brown, 1980)

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.

Successivamente si passa alla definizione del legame costitutivo del materiale, che come nei casi di 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 e il modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso, calcolabile facilmente mediante gli indici di classificazione; 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 elastico-plastico, si avranno quindi ad avere differenti forme di deformazioni, alcune reversibili ed altre irreversibili. Per definire tali leggi bisogna definire inizialmente la legge costitutiva in campo plastico, la *legge di plasticizzazione*, ossia la definizione di una superficie nella rappresentazione spaziale delle tensioni, oltre il quale si manifestano le deformazioni irreversibili, e dunque la *legge di flusso plastico*.

Le principali legge elasto-plastiche sono le seguenti:

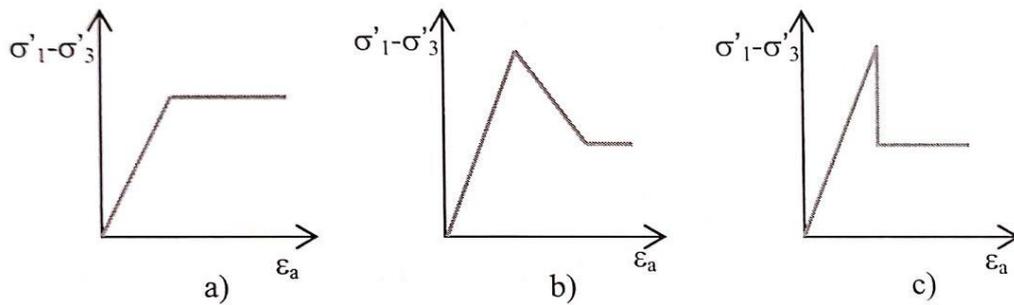


Figura 3 - a) idealmente plastico b) rammollente c) idealmente fragile

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;
- Criterio di Barton-Brandis, per modellare il comportamento delle sole discontinuità.

Generalmente il criterio di Mohr-Coulomb 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 monoassiale.

Nei modelli discontinui si fa dunque riferimento all'ammasso roccioso, in cui si discretizzano 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.

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 della 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.

Noto il comportamento della materia, è possibile applicare una serie di metodi numerici per calcolare tensioni, deformazioni e spostamenti all'interno del terreno e della roccia della zona modellata.

1.2.4 Metodi numerici nell'ingegneria geotecnica

I metodi numerici sono diversi e si differenziano in base al modello geomeccanico 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 equivalenti possono essere usati principalmente i seguenti metodi:

- F.E.M (Finite Elements Methods) o 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 un 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.

Un'altra analisi lineare è il F.E.M o il F.D.M, che oltre agli output di tensioni, deformazioni e spostamenti, consente 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 D.E.M 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.

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 F.D.E.M permette sia lo studio dell'innescò dei fenomeni franosi, ma anche una post modellazione della successiva propagazione andando a riprodurre i fenomeni di rottura progressiva, fratturazione e frammentazione del mezzo roccioso.

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 Coulomb, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza.

1.2.5 Il metodo osservazionale

Nonostante le prove, i sondaggi e le classificazioni, nella progettazione geotecnica permane sempre l'incertezza dei parametri in gioco, per questo essi devono necessariamente essere soggetti ad una modifica ed un affinamento anche in corso d'opera, grazie ad esempio alle operazioni di monitoraggio.

Questo approccio è definito come “Metodo Osservazionale” (Peck e Powderham 1999), che rappresenta a tutti gli effetti uno strumento utile ed ufficialmente riconosciuto ed applicato in situazioni geotecniche complesse, poiché permette al progettista di lasciare parametri con un determinato grado di incertezza, ottimizzando in questo modo il progetto già in corso d'opera.

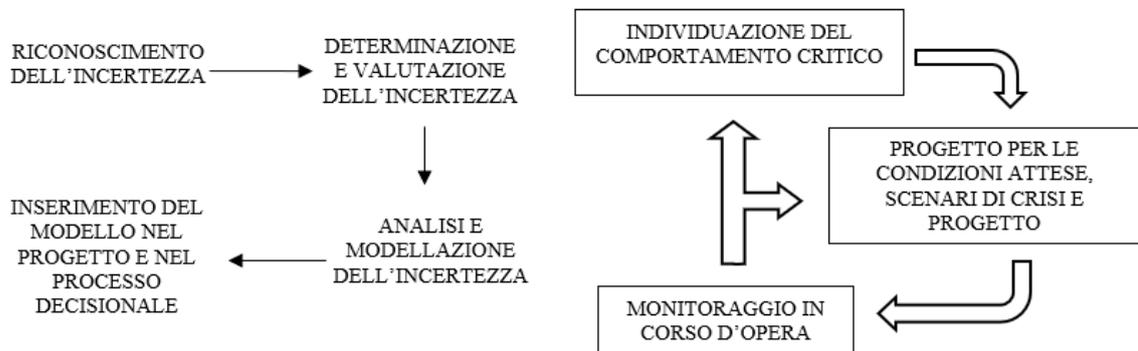


Figura 4 - Riconoscimento della variabilità e dell'incertezza dei dati dalle indagini delle prove e inserimento nel progetto (Glaser e Doolin, 2000)

È dunque chiara l'importanza del monitoraggio, legato a tale metodo, in particolare per le opere in sottoterraneo in cui è necessaria la migliore stima possibile dei parametri geotecnici. Il progettista deve quindi redigere un piano di monitoraggio in tutte le fasi che coinvolgono l'opera, dal momento della sua costruzione fino allo svolgimento delle sue funzioni.

L'impiego del metodo osservazionale, coniugato al piano di monitoraggio, dà luogo alla cosiddetta analisi a ritroso (*back analysis*), che assieme ad ulteriori analisi di previsione permette di ricavare informazioni utili man mano che si osserva l'evoluzione tra le opere in fase di realizzazione ed il terreno ospitante.

Questo metodo ha acquistato maggiore importanza grazie soprattutto alla più recente strumentazione geotecnica e strutturale, che ha facilitato la misurazione di tantissimi parametri in grado di fornire molte più informazioni sul sito e sulla struttura rispetto ai passati metodi.

L'acquisizione di tali dati comporta però anche una loro interpretazione ed anche un calcolo del livello di incertezza; nella maggior parte dei casi i parametri geotecnici sono distribuiti in accordo con distribuzioni di probabilità con leggi gaussiane, log-normale ed esponenziali, e mediante essi attraverso statistiche è possibile definire in modo accurato il valore medio ed il campo di variazione.

Questa incertezza dunque condiziona pesantemente i modelli e i risultati ottenuti nelle applicazioni geotecniche, poiché dipendenti da moltissimi parametri, la cui errata definizione può causare problemi in ogni fase della realizzazione dell'opera, dalle operazioni di scavo, fino alla tenuta in esercizio della struttura.

1.3 Monitoraggio nelle gallerie

1.3.1 Introduzione

Con il passare gli 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, inusuali nel campo dell'ingegneria civile, ma anche metodologie proprie di altri settori.

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

1.3.2 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 idrogeologiche 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 possa esplicare correttamente le sue funzioni, senza riduzioni della sua resistenza che potrebbe pregiudicarne l'utilizzo.

La particolarità delle opere in sotterraneo, legata alle particolari e non facili sollecitazioni a cui essa è soggetta, sia da un punto di vista dei rivestimenti che dal lato geotecnico, necessita la predisposizione di adeguato monitoraggio, in modo da poter misurare sistematicamente, in termini assoluti, tutte le componenti della risposta deformativa.

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.

1.3.3 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 fase di verifica, per le diverse fasi consiste:

- in corso d'opera:
 - per il rilevamento, durante l'avanzamento dei lavori, l'evoluzione dei fenomeni deformativi (sotto forma di estrusione² del fronte e convergenza³ dello scavo), delle tensioni e delle deformazioni interne agli interventi di stabilizzazione.

² Si intende per estrusione il movimento del terreno che costituisce il nucleo-fronte della galleria, verso l'interno di questa in direzione longitudinale al suo asse.

³ S intende per convergenza il fenomeno di richiusura del contorno del cavo della galleria.

- 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.

1.3.4 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.

1.3.4.1 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 e, se

in presenza di forti pressioni neutrali, si deve provvedere all'impermeabilizzazione del contorno del cavo con le installazioni di ulteriori piezometri per controllare l'evoluzione del gradiente idraulico.

1.3.4.2 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 detensionata 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.

1.3.4.3 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 estensimetriche 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.

1.3.4.4 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 un rate di misurazione pari a quello degli altri strumenti installati.

1.3.5 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:

- 1) sensore, che rileva la grandezza per cui è stato progettato.
- 2) Conduttore, che trasmette il dato all'unità di lettura.
- 3) 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 in Tab. 1

Tabella 1 - Schematizzazione Parametro – strumento

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

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

1.3.5.1 Monitoraggio topografico con stazione totale e mire ottiche

Nelle gallerie caratterizzate da un basso livello di 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, ottenuto 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 poi 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'avanzamento⁴;

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 dotata di distanziometro elettronico che misura la posizione assoluta 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 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.

1.3.5.2 Misurazione di cedimenti e spostamenti

Gli inclinometri consentono di rilevare all'interno di appositi fori di sondaggio realizzati dalla superficie, gli spostamenti verticali e orizzontali del 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 l'inclinometro stesso; questa misurazione è la più significativa nel monitoraggio di pendii perché permette di individuare la posizione della superficie di

⁴ Il nucleo di avanzamento è quel volume di terreno pseudo cilindrico a monte del fronte di scavo, preso in considerazione nell'[approccio ADECO-RS](#).

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 sono trovati 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 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 rotelle 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 rotelle 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. Le profondità a cui si effettuano devono essere le stesse della prima serie di misure; 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.

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 od almeno noto. 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 il rilievo di 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.

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

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, ed 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.

1.3.5.3 Misurazione dei livelli di falda o delle pressioni neutre

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 e a tubo fisso, consistono in un tubo (tubi in PVC o metallo) con tratto finale finestrato, messo in opera in un'intercapedine del terreno o della roccia, riempito 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 (è funzione della permeabilità del terreno), 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.

1.3.5.4 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 nel 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.

Queste particolari celle sono dotate di un piccolo serbatoio, di forma appunto toroidale, saturato al suo interno con olio; sotto carico la cella subisce una deformazione, si genera quindi un incremento di pressione dell'olio che risulta essere proporzionale alla pressione stessa.

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

- 1) che la cella non alteri apprezzabilmente lo stato di tensioni all'interno del terreno a causa della sua presenza,
- 2) un'area d'indagine sufficientemente estesa da mediare le discontinuità locali,
- 3) una minima sensibilità della cella alle stratificazioni non uniformi,
- 4) 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.

È possibile avere misure rappresentative dello stato tensionale del terreno facendo corrispondere il modulo elastico della cella a quello del terreno indagato, tarando la cella in laboratorio, ma questa operazione è difficile e costosa.

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 Wheatstone⁵, le cui estremità vengono saltate ai ferri di armatura.
- Estensimetri a corsa 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 mezzzeria del tubo; la deformazione indotta tra i due ancoraggi, modifica la lunghezza del filo con conseguente variazione della frequenza di uscita del segnale.

1.3.6 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 sono le condizioni 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;

⁵ Particolare circuito elettrico composto generalmente da 4 resistenze in parallelo, il quale attraverso il suo "sbilanciamento" permette di risalire alla deformazione dell'estensimetro.

- 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 lapideo⁶), 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 montagna⁷ in quei materiali molto rigidi con piani di discontinuità subparalleli al tracciato.
- 2) nucleo-fronte stabile a breve termine (comportamento coesivo⁸), 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 sciolto⁹), 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.
Bisogna fare attenzione alle misure della convergenza, perché quest'ultimo è un fenomeno, che a differenza dell'estrusione, può evolvere in un collasso del fronte in quanto esso è l'ultimo stadio dello stato deformativo.

Esistono poi altre situazioni particolari che necessitano di monitoraggi mirati come ad esempio quando si 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 devono essere opportunamente convogliate con misurazione della pressione per la costruzione di un modello idrogeologico il più possibile fedele alla realtà.

⁶ Con lapideo si fa riferimento al caso in cui si ha un materiale in sito con buon comportamento meccanico, dunque generalmente fa riferimento ad ammassi rocciosi di alta qualità.

⁷ Colpi di montagna, oppure con il loro nome inglese "rock burst" si intende il rilascio repentino di energia plastica con conseguente espulsione di materiale da parte di alcune rocce che, in seguito allo scavo, accumulano un quantitativo di tensione tale da superare la loro resistenza.

⁸ Con comportamento coesivo intende quei terreni che dispongono di un'elevata coesione come ad esempio i terreni argillosi.

⁹ Con comportamento sciolto si intende quei terreni sabbiosi, che hanno coesione molto bassa.

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 la 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.

1.3.7 Monitoraggio in esercizio

Le operazioni di monitoraggio non si concludono soltanto quando 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, poiché precedentemente per effettuare le rilevazioni erano necessarie interruzioni di servizio dell'infrastruttura per poter ottenere i dati necessari per effettuare 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 formazione dell'infrastruttura nel tempo.

Risulta necessario quindi 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.

Anche in questa fase del monitoraggio verranno controllati sia il rivestimento che l'ammasso roccioso, in particolare:

- Analisi delle deformazioni subite dal rivestimento mediante estensimetri annegati nel calcestruzzo; per un'efficacia migliore questi estensimetri devono essere installati in punti diversi della sezione in prossimità della superficie di intradosso che in quella di estradosso;
- Misurazione delle sollecitazioni al contatto fra rivestimento e ammasso mediante celle di pressione;
- Analisi del comportamento deformativo dell'ammasso mediante estensimetri;
- Controlli sui livelli di falda e delle pressioni interstiziali mediante celle piezometriche.

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 ma può capitare che non si verifichi un addensamento delle letture attorno ad un valore, e questo quindi genera già un certo livello di 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, per questo motivo, specialmente nelle sezioni critiche delle gallerie, è sempre opportuno prevedere una certa ridondanza degli strumenti in modo da sopperire ad eventuali guasti di alcuni di essi.

Inoltre per una corretta interpretazione delle misure, è necessario considerare sempre tutti i fattori che possano 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, oppure ancora i fenomeni di fluage, che mostrano effetti dopo lunghi periodi e che solo attraverso un monitoraggio sistematico in esercizio è possibile valutarne le sue conseguenze.

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 e della prevenzione dell'ovalizzazione della sezione nel tempo; 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.

2 Introduzione agli algoritmi genetici

In questo capitolo verrà introdotta una delle metodologie di ricerca ed ottimizzazione che prendono il nome di algoritmi genetici: verranno analizzati la loro origine, struttura e le loro possibili applicazioni.

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*.

2.1 Principi di base e terminologia degli algoritmi euristici di tipo genetico

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 (AG) seguono proprio il principio dell'evoluzione naturale Darwinista, in quanto la soluzione finale sarà ottenuta mediante un processo di sopravvivenza di individui che caratterizzano la popolazione iniziale, nell'ambiente predefinito.

Essendo strettamente correlato a principi di biologia, la terminologia usata nella teoria generale degli algoritmi genetici è in analogia alla biologia reale, anche se le entità a cui si riferiscono sono molto più semplici dei loro corrispettivi biologici reali.

Nella seguente trattazione si considera che un individuo sia caratterizzato da un *cromosoma* (filamenti di DNA, immaginabili come una stringa di bit che valgono 1 o 0) e a sua volta suddiviso in *geni* (blocchi funzionali del DNA, intesi come i sottogruppi di bit della stringa) ognuno dei quali rappresenta un'istanza di un particolare *allele* (il singolo bit che assume l'istanza 0 o 1) che codificano le caratteristiche dell'individuo. Il singolo allele (il bit) è collocato in una specifica posizione, chiamata *locus*, può essere fissa o variabile; se è fissa, significa che il singolo allele assume significato solo se rimane in quella posizione, e se quest'ultimo è spostato anche all'interno del gene, perde di significato, mentre se è variabile l'allele può essere spostato e conserva le sue informazioni.

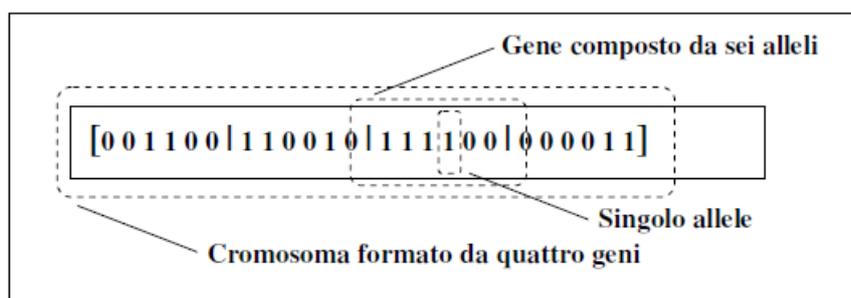


Figura 5 - Schematizzazione del cromosoma di un algoritmo genetico

Ogni cromosoma rappresenta un punto nello spazio di ricerca¹⁰ 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.

Ogni cromosoma è caratterizzato da una sua idoneità¹¹ e l'insieme di tutti i cromosomi (e quindi gli individui) è chiamato genoma (nel caso in esame, generazione); l'idoneità (fitness) di un individuo è tipicamente definita come la probabilità che l'organismo viva abbastanza per riprodursi o come una funzione del numero di discendenti che esso genera.

In natura, la maggior parte degli organismi che si riproducono sessualmente sono diploidi (i cromosomi si presentano a coppie) e nel corso della riproduzione avviene una ricombinazione dei geni tra ogni coppia di cromosomi, mentre gli organismi in cui i cromosomi non sono appaiati vengono definiti apolidi.

Tabella 2 - Riepilogo definizioni genetiche

Terminologia Biologica	Terminologia Artificiale
Genoma	Generazione
Cromosoma	Stringa
Gene	Caratteristica
Allele	Valore della caratteristica
Locus	Posizione del valore della caratteristica

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 l'evoluzione sarebbe fortemente influenzata da eventi eccezionali e soprattutto si avrebbero miglioramenti "per salti". Ciò implica che si possono avere periodi di ristagno, anche molto lunghi, a cui seguono periodi di accelerazione evolutiva relativamente brevi.

Prove di quanto detto possono essere le mutazioni che hanno subito le razze canine durante i secoli, esempio di selezione cumulativa, oppure l'evoluzione dell'industria con l'avvento della macchina a vapore, esempio di evoluzione con salto.

2.2 La nascita degli algoritmi genetici

La rappresentazione mediante codice binaria è stata introdotta dall'inventore degli AG, John Holland, negli anni Sessanta, anche se il concetto di algoritmo genetico e l'intenzione di applicare la genetica alla computazione era già ampiamente diffusa, tuttavia Holland fu il primo a formulare una teoria su questi argomenti.

¹⁰ Si intende con spazio di ricerca l'insieme di tutte le possibili soluzioni, teoricamente infinito, che deve quindi essere limitato al fine di arrivare ad una convergenza della soluzione.

¹¹ Idoneità è il termine usato da Darwin per esprimere il grado di adattamento di un individuo all'ambiente, nel senso di idoneità a sopravvivere.

John Holland, iniziò con l'obiettivo di realizzare sistemi capaci di auto adattamento, interessandosi dei principi che regolano l'evoluzione dei sistemi adattivi naturali ipotizzando che la competizione e l'innovazione fossero i meccanismi fondamentali tramite cui gli individui acquisiscono le capacità di adattarsi ad ambienti che cambiano nel tempo e rispondere a eventi inattesi.

Dalla metà degli anni '60 vennero realizzati semplici sistemi computazionali che, già presentavano caratteristiche comuni agli AG attuali, con una popolazione di individui che veniva fatta evolvere nel tempo mediante operatori genetici.

In seguito Holland continuò il suo lavoro sui sistemi adattivi introducendo la nozione di schema, di parallelismo implicito e dimostrando il Teorema Fondamentale degli Algoritmi Genetici.

Altri studi si occuparono dello studio e dell'applicazione di alcuni semplici modelli di algoritmi genetici per l'ottimizzazione di un gruppo di funzioni evidenziando che tali semplici modelli potessero essere utilizzati in maniera significativa anche come algoritmi d'ottimizzazione.

L'interesse scientifico legato agli AG continuò a crescere fino al 1989, anno in cui David Goldberg pubblicò il libro *Genetic Algorithms in Search Optimisation and Machine Learning* che riuscì alla sua pubblicazione, l'atto di catalizzare l'attenzione della comunità scientifica sugli Algoritmi Genetici poiché presentava la teoria e le applicazioni degli AG in una forma chiara, precisa e di facile comprensione.

Il periodo dal 1990 a oggi è stato caratterizzato da un'enorme crescita della comunità degli Algoritmi Genetici e nuove applicazioni degli AG hanno interessato un gran numero di nuove aree di ricerca anche se nella realtà molti algoritmi oggi vengono classificati come genetici, ma in esiste molta variabilità a seconda dei casi studiati, tutti però hanno in comune il concetto di evoluzione con la finalità di ottimizzazione della soluzione, e per questo motivo vengono spesso classificati con il nome di algoritmi genetici.

2.3 La teoria di Holland

La teoria di Holland può essere considerata come la controparte matematica dell'ipotesi euristica dei cosiddetti *blocchi costitutivi*.

L'intuizione di fondo è che le soluzioni buone tendono ad essere formate da buoni blocchi costitutivi, combinando i valori dei bit affinché conferiscano una maggiore idoneità alle stringhe a cui appartengono.

Holland introdusse la nozione di schema per formalizzare la nozione informale di blocco costitutivo, intendendo come schema, l'insieme di stringhe di bit che possono essere descritte da un modello costituito da uno 0, da un 1 e da un asterisco, che rappresenta un parametro non importante per la definizione dell'idoneità dell'individuo.

Prendiamo una stringa binaria come esempio, essa può essere composta da "segmenti" che contribuiscono molto alla soluzione ottimale come, supponiamo, i blocchi (011) e (110) nei due *schemi* seguenti a 8 bit (il simbolo # indica qualunque valore):

0 1 1 # # # #

110

(NB: ogni schema rappresenta un sotto-insieme di stringhe aventi tutte gli stessi blocchi costitutivi).

In linea di principio, le operazioni genetiche favoriscono generalmente, ma non sempre, il “montaggio” dei blocchi costitutivi in schemi di fitness crescente come, supponiamo:

011###110

La teoria di Holland dimostra che, gli schemi con fitness superiore alla media, sotto certe condizioni, tengono a crescere esponenzialmente nella popolazione, dunque la combinazione di blocchi, comporta un incremento crescente del fitness; non è tuttavia sempre vero che, la combinazione di diversi blocchi, generi incrementi di fitness, anzi può succedere spesso certe istanze che caratterizzano l'individuo si “distruggano” al passare delle generazioni.

2.4 *Algoritmo genetico di base*

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

2.4.1 **Codifica dei problemi**

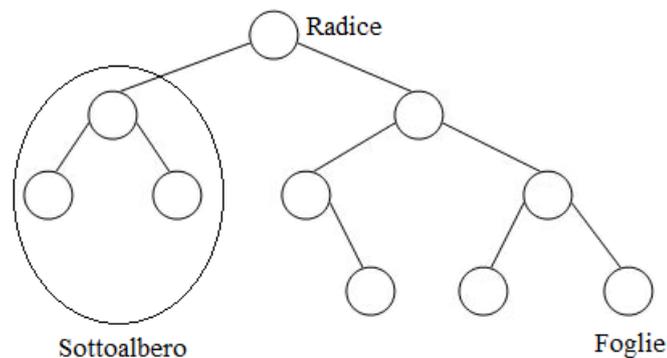
La modellazione del problema da risolvere è affrontata con la *codifica genetica* che rappresenta il modo in cui la possibile soluzione viene rappresentata e riconosciuta dall'algoritmo.

Le codifiche più comuni sono:

- **codifiche binarie**, cioè le stringhe di bit, sono le più comuni per il fatto che nei primi studi Holland utilizzo nella sua teoria questo tipo di codifica. Sono state studiate numerose estensioni, ma risultano tuttavia innaturali e a volte inutili per molti problemi, dove si necessita rappresentare l'individuo con un senso fisico;
- **codifiche a più caratteri e a valori reali**, per molte applicazioni risulta essere più pratico che i cromosomi siano rappresentati ad esempio attraverso alfabeto formato da molti caratteri oppure con molti numeri reali. Queste ultime hanno mostrato risultati migliori rispetto alle codifiche binarie;

- **codifiche ad albero**, che viene utilizzata principalmente nell'evoluzione degli algoritmi, in cui le soluzioni che costituiscono le popolazioni sono altri algoritmi che si combinano, si riproducono o mutano fra loro per dar luogo ad altri algoritmi in grado di fornire le soluzioni migliori di un determinato problema.

Questi programmi vengono codificati con una struttura ad albero in cui i nodi interni sono funzioni (come +, -, * oppure strutture di controllo come if, else etc..) e le foglie sono i simboli terminali del programma. Ogni nodo ha un unico arco entrante, tranne uno particolare, chiamato radice, che non ha archi entranti. Ogni nodo può avere zero o più archi uscenti e i nodi senza archi uscenti sono detti foglie. Le codifiche ad albero hanno parecchi vantaggi tra cui il fatto di potersi muovere in spazi di ricerca illimitati. Questa assenza di limiti può anche essere svantaggiosa, gli alberi possono crescere senza controllo, impedendo la formazione di soluzioni candidate strutturate in maniera più gerarchica. Inoltre più gli alberi sono estesi, più risultano di difficile interpretazione.



Tuttavia le codifiche ad albero, insieme al miglioramento locale, costituiscono due dei metodi che hanno dimostrato miglioramenti notevoli in efficienza di calcolo per i problemi di ottimizzazione, dal momento che utilizzano le informazioni dei punti precedentemente analizzati nelle ricerche successive.

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

2.4.2 Definizione della funzione di fitness

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 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.

Anche in questo caso non esiste una funzione di fitness univoca, ma è da scegliere in funzione al tipo di problema da risolvere.

2.4.3 Selezione degli individui

Una volta scelta la modifica e la forma della funzione di fitness da voler applicare, si deve fissare il metodo di selezione, cioè il modo in cui vengono selezionati gli individui che saranno i genitori dei discendenti che andranno a formare la generazione successiva, e il numero di discendenti che ogni individuo può generare.

Lo scopo della selezione è quindi quello di favorire la riproduzione di quegli individui più idonei, e quindi con un fitness più elevato, nella speranza che i loro discendenti presentino valori di fitness maggiori, al fine di ottenere una soluzione finale migliore.

Tuttavia, il criterio di selezione deve essere ben bilanciato, poiché spesso capita che la soluzione ottimale sia figlia di una combinazione di individui con profondi valori differenti di fitness, infatti se la selezione è troppo forte, implica che la popolazione sarà dominata da individui subottimali di alta idoneità, con una conseguente riduzione della diversità della popolazione (necessaria per ulteriori riproduzioni) e quindi il rischio di una convergenza ad un massimo locale (se si vuole massimizzare la funzione fitness), viceversa, se una selezione è troppo debole, si rischiano delle convergenze molto lente.

Anche per la selezione, non esiste un metodo univoco, anzi esistono tantissimi metodi più o meno applicabile in base al problema. I metodi più comuni sono i seguenti:

- *Selezione proporzionale o della roulette Wheel* (Goldberg 1989), è quella comunemente più applicata, in cui all'interno della popolazione, ogni individuo presenta una probabilità di essere scelto, legato alla sua funzione di fitness.

Inizialmente si calcola la somma di tutte le funzioni fitness associate $f(x_i)$ agli individui, e a seconda se si voglia massimizzare o minimizzare la soluzione fitness del problema:

$$F_{max} = \sum f(x_i) \quad oppure \quad F_{min} = \sum \frac{1}{f(x_i)}$$

Grazie a questi valori, si determinano le probabilità associate ai singoli individui che possono essere, nel caso di problemi di minimo e di massimo, espresse con le seguenti formule:

$$p_i = \frac{1}{f(x_i) \cdot F_{min}} \quad oppure \quad p_i = \frac{f(x_i)}{F_{max}}$$

Per garantire che gli individui più meritevoli non corrano il rischio di non essere scelti, è possibile una preliminare riorganizzazione degli individui per disporli in base alla loro probabilità.

Supponendo di avere una popolazione di 4 individui (A_1 , A_2 , A_3 e A_4) a cui sono associate le probabilità di selezione di 0.12, 0.18, 0.3, 0.4, rappresentabili in un diagramma a torta come il seguente:

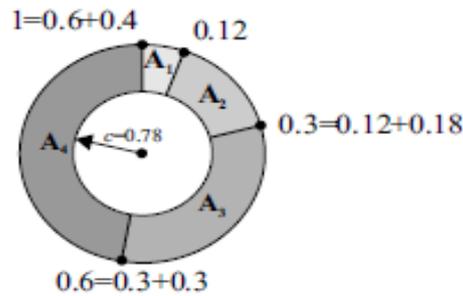


Figura 6 - Esempio numerico di una roulette wheel

Mediante la generazione casuale di un numero casuale $\in]0,1[$ ad esempio $c=0,78$, si determina quale individuo verrà selezionato per la riproduzione, in questo caso l'individuo A_4 perché il valore di c ricade nell'intervallo di probabilità coperto da tale individuo.

- *Selezione in base al rango*, molto utile per evitare convergenze rapide dell'algoritmo. Nella versione proposta da Baler (1985), gli individui della popolazione sono riorganizzati in base all'idoneità, creando una sorta di classifica, in questo modo gli individui non saranno più collegati alla loro idoneità ma alla loro posizione nella classifica, chiamata rango; questo approccio effettua un cambiamento di scala delle idoneità in quanto si trascurano le differenze fra un'idoneità e quella associata all'individuo immediatamente prima o dopo della classifica. Scartare le informazioni relative al valore dell'idoneità presenta sia vantaggi, perché evita convergenze rapide, ma anche degli svantaggi perché si trascura il reale peso dell'individuo.
- *Selezione a torneo*; i metodi di selezione esposti precedentemente prevedono operazioni preliminari, cioè quelle del calcolo dell'idoneità totale per la roulette, oppure della classifica per stilare il rango, che possono comportare un grande onere computazionale. Nella selezione a torneo viene fissato semplicemente il valore di un parametro di riferimento $k \in]0,1[$, vengono estratti a caso due individui ad idoneità diversa dalla popolazione, successivamente si sceglie casualmente il valore di un ulteriore parametro $r \in]0,1[$, se $r < k$ si sceglierà per la riproduzione l'individuo ad idoneità maggiore (o minore se $r > k$). Questo metodo non premia l'idoneità ma di contro favorisce una adeguata diversità della popolazione.
- *Elitarismo*, che non rappresenta un metodo di selezione ma un accorgimento aggiuntivo al meccanismo selettivo, che prende in considerazione l'eventualità che i metodi di selezione possano scartare individui ad alta idoneità. Per evitare ciò si applica quindi questo principio che prevede la preselezione di un individuo ad alta idoneità, per la sua conservazione nelle generazioni future e riproduzione assieme ad un individuo scelto con uno dei meccanismi analizzati precedentemente, al fine di ottenere un individuo a fitness incrementato.

2.4.4 Riproduzione degli individui: operatori genetici

Una volta decisa la tecnica di selezione, bisogna stabilire il metodo di riproduzione degli individui. Anche in questo caso non esiste una tecnica migliore di un'altra, tuttavia essa risulta essere collegata molto al sistema di codifica adottato per gli individui.

Gli individui scelti potranno riprodursi un numero di volte pari al numero delle tecniche di riproduzione scelte, ma la sopravvivenza degli individui sarà sempre legata alla funzione di fitness, ed il numero di individui sopravvissuti sarà sempre correlato al numero di individui delle popolazioni, che nei casi standard rimane sempre costante col passare delle generazioni. Ogni operatore genetico è solitamente caratterizzato da una "probabilità di riproduzione", che determina la cadenza della modifica del materiale genetico dei genitori, che in seguito alla riproduzione, rappresenterà il corredo genetico dell'individuo prodotto.

Verranno esposti di seguito i principali operatori, associati alla classica codifica binaria ma facilmente adattabili a qualsiasi altri tipi di codifica con i dovuti accorgimenti, evidenziando anche i loro limiti e i loro pregi.

2.4.4.1 Cross-over (o incrocio)

Il cross-over consiste nell'incrociare il materiale genetico dei due genitori al fine di ottenere un individuo che abbia parte della *madre* e parte del *padre*.

Quest'operazione può avvenire in diversi modi:

- *One point cross-over*, in cui viene scelto casualmente un della codifica dell'informazione dei genitori e si scambiano fra loro i due materiali genetici per formare il nuovo individuo.

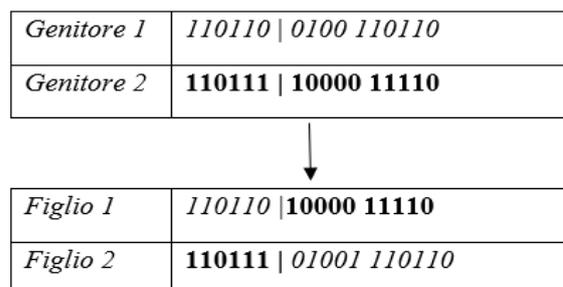


Figura 7 - Esempio di "one point cross-over"

Solitamente l'operazione di cross-over non è applicata a tutte le coppie di genitori scelte, ma è scandita da una probabilità (*probabilità di cross-over*) tipicamente compresa fra 0.6 ed 1.0.

- *Two point cross-over*, in cui vengono scelti due punti all'interno dei cromosomi dei genitori, in modo da selezionare solo una frazione di materiale genetico da incrociare.

<i>Genitore 1</i>	110110 01001 10110
<i>Genitore 2</i>	110111 10000 11110

↓

<i>Figlio 1</i>	110110 10000 10110
<i>Figlio 2</i>	110111 01001 11110

Figura 8 - Esempio di "two point cross-over"

- *Multi-point cross-over*, in cui si stabiliscono più punti in cui effettuare lo scambio.
- *Cross-over uniforme*, dove i figli generati non posseggono segmenti di cromosoma, ma singoli geni dei genitori, estratti in modo casuale secondo una percentuale denominata "mixing ratio".

Il cross-over tuttavia soffre della "dipendenza posizionale del gene", poiché infatti, un'informazione in una specifica *locus* del cromosoma, assume un significato che può essere perso o privo di senso in un altro posto del cromosoma; questo problema è da tenere sempre in considerazione quando si sceglie questo tipo di riproduzione degli individui.

2.4.4.2 Mutazione

L'incrocio rappresenta il primo strumento utile per la riproduzione, mentre la mutazione provvede ad assicurare che la convergenza del risultato non si concentri su un massimo locale della funzione fitness.

La mutazione dunque sarà la fonte di variazione degli individui, che all'atto pratico può essere visto come la modifica di un determinato bit del cromosoma, scelto secondo una "probabilità di mutazione" solitamente molto piccola ($\leq 1\%$). Vi sono diversi tipi di mutazione a seconda del tipo di rappresentazione genetica impiegata: ad esempio, nel caso del codice binario, gli elementi selezionati per essere mutati modificano il loro stato da zero a uno o viceversa (figura 12); nel caso

di un codice composto da numeri reali, invece, gli elementi selezionati assumono un nuovo valore estratto in modo casuale da un certo intervallo

<i>Genitore</i>	10110 01011 10010
-----------------	-------------------

↓

<i>Figlio</i>	00110 11011 10000
---------------	---------------------------------

Figura 9 - Esempio dell'operatore di mutazione

2.4.4.3 Inversione

Tale approccio mira alla conservazione dell'individuo con fitness elevato in quanto il suo materiale genetico non si combina con altri individui, ma si effettua un rimescolamento delle sue caratteristiche, ad esempio invertendo l'ordine dei bit

nella codifica binaria. Questa soluzione come il cross-over può essere applicata su uno o più punti.



Figura 10 – Esempio operatore di inversione

2.4.4.4 funzione aritmetica

In questo caso la riproduzione è affidata ad una funzione matematica, caratterizzato da un coefficiente opportunamente tarato, ad esempio:

$$\begin{aligned} \text{Figlio}_1 &= \alpha \cdot \text{Genitore}_1 + (1 - \alpha) \cdot \text{Genitore}_2 \\ \text{Figlio}_2 &= (1 - \alpha) \cdot \text{Genitore}_1 + \alpha \cdot \text{Genitore}_2 \end{aligned}$$

2.4.5 Convergenza dell'algoritmo

Una volta implementato l'algoritmo, se sono state prese le scelte migliori in relazione al problema da risolvere, con il passare delle generazioni gli individui si evolveranno, incrementando il loro fitness.

Si noti come esiste una differenza marcata fra l'individuo migliore e la media di tutti gli individui, e come questa differenza diminuisca all'aumentare delle generazioni.

Come già accennato, durante l'evoluzione esiste la possibilità che la soluzione converga ad un certo punto con un massimo locale, ma se l'algoritmo è ben progettato sarà possibile arrivare ad un massimo assoluto della funzione.

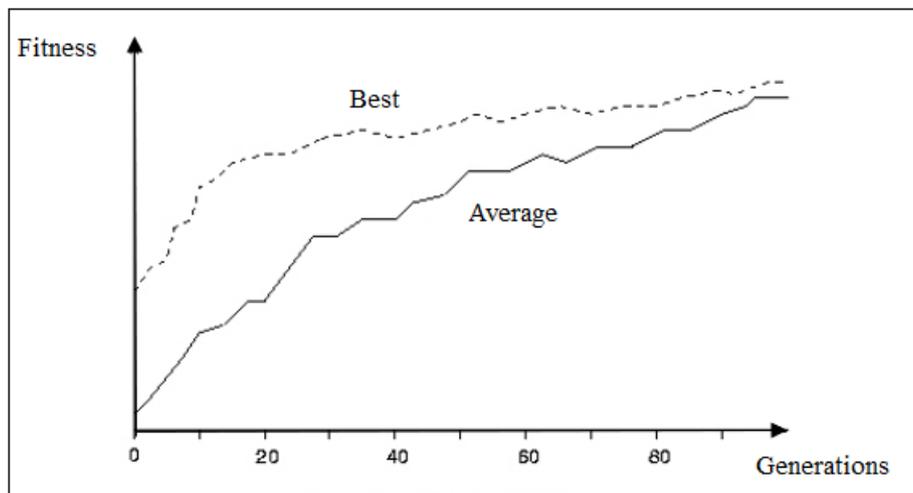


Figura 11 - Esempio di convergenza di un algoritmo

2.4.6 Schematizzazione di un algoritmo

Una volta introdotti tutti i concetti e gli operatori coinvolti in un algoritmo, è sempre utile realizzare uno schema a blocchi per ripercorrere il flusso logico delle operazioni, con l'obiettivo di mettere in evidenza eventuali falle, ottimizzare l'algoritmo e favorire quindi una convergenza più rapida ed attendibile.

Detto M il numero di individui presenti nella popolazione iniziale, la successione delle operazioni da eseguire, è la seguente:

- 1) Creazione di una popolazione, costituita da individui che rappresentano le possibili soluzioni del problema.
- 2) Definizione e calcolo della funzione di fitness ad ogni individuo.
- 3) Effettuare la scelta degli individui secondo un criterio di selezione esposto precedentemente.
- 4) Effettuare la riproduzione degli individui scelti applicando gli operatori genetici prima esposti, per un numero di volte fisso o variabile.
- 5) Inserimento dell'individuo migliore nella nuova popolazione.

Se il numero di cicli svolti è pari al numero di individui presenti nella generazione, si ritorna al punto al punto due partendo dalla nuova generazione, altrimenti si ritorna al punto 3.

Se sono concluse il numero di generazioni fissate preliminarmente, si valuta la il risultato ottenuto dell'AG, altrimenti si ritorna al punto 2. e ripetere la procedura.

Lo schema a blocchi di tale procedura è riportato di seguito nella Fig. 12:

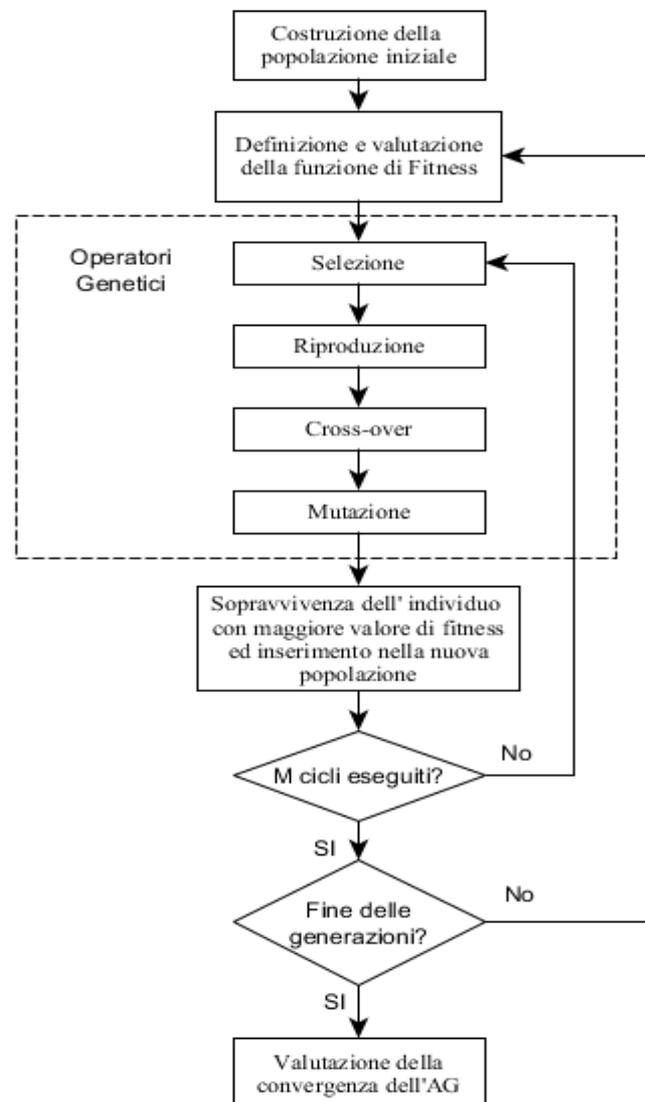


Figura 12 - Schema a blocchi di un Algoritmo genetico di base

Verrà chiamata *esecuzione* l'intera serie di generazioni, e può capitare che alla fine di una esecuzione, siano presenti nella popolazione più individui con la stessa idoneità.

Poiché la casualità ha un ruolo importante in ogni esecuzione, due esecuzioni con popolazione iniziale differente, produrranno generalmente risultati diversi, per questo motivo si effettuano molte esecuzioni per ottenere, statisticamente, la soluzione migliore al problema.

Si espone di seguito un esempio numerico proposto da D.E.Goldberg, per comprendere meglio quanto detto fino ad ora.

Il problema consiste nella ricerca di valori x che massimizzano la funzione $f(x) = x^2$, dove x può variare fra 0 e 31, per una semplicità operativa in quanto viene scelta una codifica binaria in cui è possibile esprimere i numeri compresi in questo intervallo con soli 5 bit.

La funzione di fitness sarà dunque il valore stesso della funzione $f(x) = x^2$, mentre vengono fissate le probabilità di cross-over (fissato in un punto casuale) e mutazione con due valori standard ($p_c = 1.0$ e $p_m = 0.001$).

Si genera dunque una popolazione iniziale, si effettua la decodifica in decimale e si calcola la fitness per ogni individuo, quindi si valuta la probabilità di riproduzione per stabilire quanti figli sono in grado di generare ciascun individuo.

Num. Stringa	Popolaz. iniziale	Decod. X	Valutazione $F(x)=x^2$	Prob. di riprod. $p_i=f(x_i)/\sum f(x_i)$	Num.figli atteso $N = p_i \cdot n$	Num. Estraz.
1	01101	13	169	0.14	0.58	1
2	11000	24	576	0.49	1.97	2
3	01000	8	64	0.06	0.22	0
4	10011	19	361	0.31	1.23	1
somma			1170	1.00	4.00	4
media			293	0.25	1.00	1
massimo			576	0.49	1.97	2

Figura 13 - Esempio numerico dell'Algoritmo genetico

Impostando un punto di cross-over casuale (identificato con il simbolo !), si effettuano le combinazioni fra il primo e il secondo e fra il secondo ed il quarto individuo, poiché il terzo presenta un fitness talmente debole da non essere scelto.

Accoppiam. con crossover (!)	Incrocio $p_c=1.0$ (tutti)	Mutazioni $p_m=0.001$ (nessuna)	Nuova popolaz.	Decod. X	Valutaz. $\Phi(x) = x^2$
0110!1	01100	01100	01100	12	144
1100!0	11001	11001	11001	25	625
11!000	11011	11011	11011	27	729
10!011	10000	10000	10000	16	256
somma					1754
media					439
massimo					729

Figura 14 - Convergenza dell'esempio numerico

Applicando dunque gli operatori genetici (la mutazione non interviene poiché in questo esempio è stata impostata una probabilità molto bassa), si ottiene la nuova popolazione, che valutata mediante la funzione di fitness, evidenzia come il massimo sia aumentato, e quindi ci si è avvicinati di più alla soluzione ottimale, che sarà appunto il valore 31.

Iterando il procedimento, l'algoritmo arriverà a convergenza, ma presenterà sempre la media del valore di fitness degli individui, inferiore al valore massimo, anche se tale disuguaglianza tenderà a diminuire con l'aumentare del numero di generazione.

2.5 Campi di applicazione, vantaggi e svantaggi degli AG

L'esempio esposto precedentemente è molto semplice, ma esistono varianti di questo schema che con i giusti accorgimenti sono in grado di risolvere problemi molto più complessi in campi più svariati, grazie proprio alla versatilità degli AG.

I principali campi di applicazione di questi algoritmi sono:

- *Ottimizzazione*, come ad esempio determinazione della migliore disposizione nel piano degli elementi di circuiti elettronici, oppure della migliore distribuzione dei carichi di lavoro tra le diverse macchine.
- *Programmazione automatica*, in cui gli AG vengono usati per far evolvere programmi destinati a compiti specifici o per programmare altre strutture computazionali come gli automi cellulari e le reti di ordinamento.
- *Apprendimento automatico*, dove gli AG sono utilizzati per compiti di classificazione e predizione oppure usati per l'evoluzione dei pesi delle reti neurali.

Esistono tantissimi altri campi di applicazione, nati appunto dagli ottimi risultati che gli algoritmi forniscono. Tuttavia come ogni algoritmo, essi presentano dei pregi e dei difetti, che possono essere riassunti brevemente in:

Vantaggi:

- Risultano migliori, rispetto ad altri tipi di ottimizzazione, quando il numero di parametri per la descrizione è elevato, e quando fra di essi non è evidente una correlazione.
- La ricerca dell'ottimo globale avviene in parallelo, e questo rende gli AG più efficienti e meno suscettibili agli ottimi locali, in quanto ciò che avviene in una certa porzione della popolazione, non dipende da ciò che accade in altre parte della stessa popolazione

Svantaggi:

- Gli AG sono generalmente una tecnica di ottimizzazione "lenta" rispetto ad altre tecniche, poiché viene speso tempo computazionale a testare e calcolare la soluzione di fitness di molti individui, molti dei quali saranno inutili.
- La natura stocastica del metodo comporta il raggiungimento di un'approssimazione dell'ottimo locale, e non del valore reale, che se raggiunto, è dovuto principalmente al caso.

3 Creazione del modello strutturale e dell'algoritmo genetico per la previsione della spinta delle terre

La creazione dell'algoritmo è stata sviluppata adoperando il linguaggio di programmazione Python mentre 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 API¹² 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.

3.1 Modello strutturale

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 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 di 500, 1000 e 2000 kN/m, poste nella direzione radiale e tangenziale;

La rigidità delle molle è costante ma sono stati impostati diversi valori per le esecuzioni dell'algoritmo, al fine di analizzare l'incidenza di tale parametro nel risultato finale.

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.

¹² Con l'acronimo A.P.I. (Application Programming Integrate) in ambito informatico, si indicano un insieme di procedure atte all'espletamento di un dato compito,

Con questa impostazione, il modello utilizzato sarà il seguente:

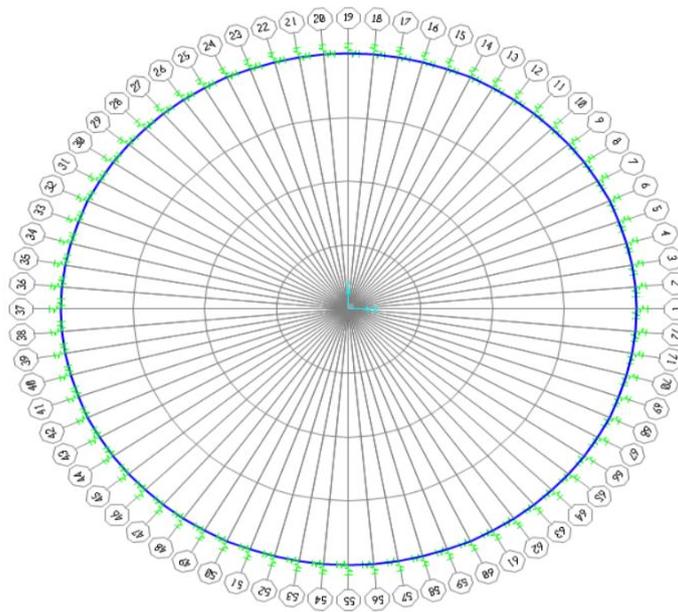


Figura 15 - Modello della galleria

3.2 Creazione dell'algoritmo

Dopo la realizzazione del modello si è passati alla scrittura dell'algoritmo, seguendo i concetti riportati nel Capitolo 2 ma riadattando il tutto al problema in esame.

3.2.1 Obiettivo dell'algoritmo

L'obiettivo dell'algoritmo sarà quello di risalire alle spinte che il terreno agisce sulla struttura presupponendo la conoscenza di alcuni valori di sollecitazioni e rotazioni, ottenuti tramite ad esempio il monitoraggio strutturale.

Verranno eseguite una serie di esecuzioni al variare di alcuni parametri, che verranno espone in questo capitolo, per stabilire quale sia la combinazione migliore per il raggiungimento della soluzione.

3.3 Componenti dell'AG

3.3.1 Definizione del Target

Quando si utilizzano gli algoritmi genetici il primo aspetto da definire è sicuramente dove l'algoritmo deve "arrivare", ossia è necessario definire un Target che sarà la soluzione esatta nello spazio di ricerca delle soluzioni. Nel caso in esame verrà fissati inizialmente dei target scelti arbitrariamente, compatibili con possibili configurazioni che possono realmente svilupparsi in gallerie.

3.3.2 Codifica degli individui

Come dalla teoria degli algoritmi, la prima operazione da effettuare è quella di stabilire la corretta modifica dei dati da manipolare; 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, 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:

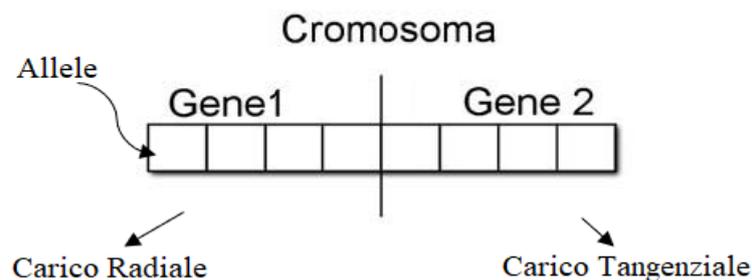


Figura 16 - Schema della codifica dell'individuo utilizzata

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, rappresentano invece le 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 l'approssimazione della forma dei carichi che agiscono in una galleria, con la scelta di applicarli in forma distribuita sulle singole travi che compongono la struttura.

Le forme di carico adottate sono state le seguenti:

- Carico costante
- Carico lineare
- Carico sinusoidale

La modellazione con carico costante è servita essenzialmente per una fase di taratura dell'algoritmo, poiché un'approssimazione di questo genere comporterebbe uno stato di tensione idrostatico della galleria.

Si è tentato quindi di effettuare un'approssimazione lineare definendo il valore del carico, tangenziale e radiale, solo in 8 nodi e risalire agli altri valori di carico mediante un'interpolazione lineare su tali nodi, ottenendo però risultati insoddisfacenti.

Si è passati dunque ad 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 z .

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; tali deformazioni sono viste come somma di tre contributi:

- 1) Spostamenti radiali uniformi, indicati con u_0 , che possono essere espressi come una compressione radiale $\varepsilon = u_0/a$ dove a è il raggio della galleria.
- 2) Ovalizzazione della sezione, con spostamenti radiali che prevalgono su quelli circonferenziali
- 3) traslazione verticale u_z senza distorsione

La rappresentazione grafica di queste componenti è la seguente:

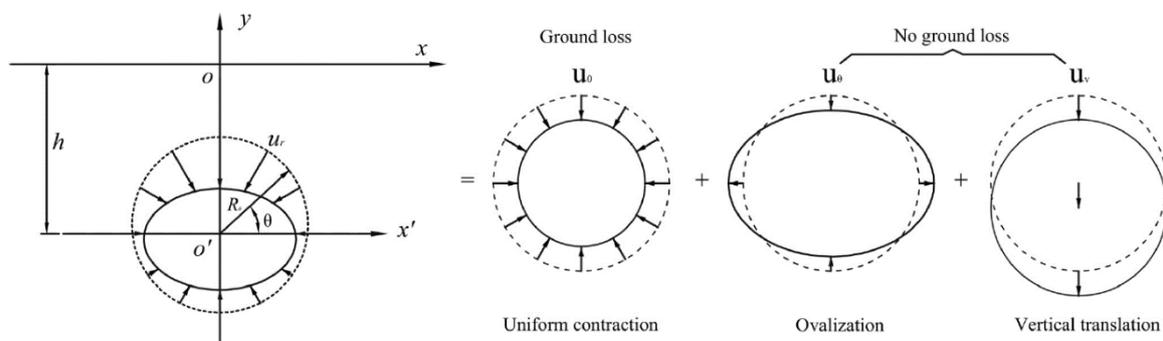


Figura 17 - Componenti di deformazione del tunnel

Sulla base delle componenti sopra citate, 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 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.

Al variare della fase θ_0 , sono state analizzate, gli effetti di tutti i carichi adimensionali applicati singolarmente alla struttura, poiché la fase conferisce una “direzione di spostamento”. Queste onde hanno valore unitario, successivamente verranno amplificate e dalla loro somma si otterrà il valore del carico, e quindi l’individuo della popolazione. Il carico localizzato radiale 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.

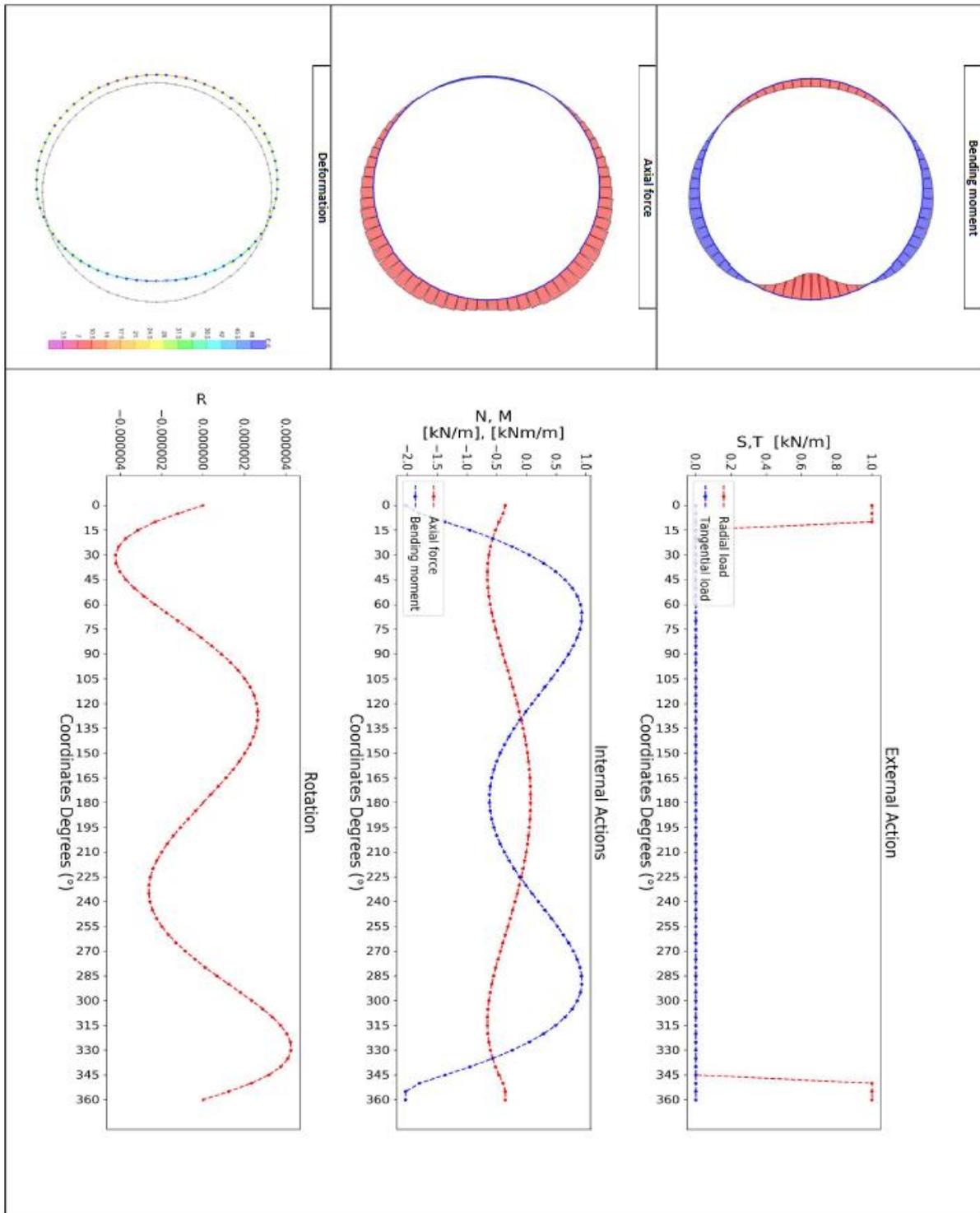


Figura 18 - Carico radiale localizzato a fase $\theta_0=0$

Il carico localizzato tangenziale segue lo stesso criterio e modalità di applicazione del carico localizzato radiale, ma a differenza di quest'ultimo può assumere anche valori negativi in quando la distribuzione delle tensioni tangenziali nell'interfaccia della struttura non presenta un andamento costante.

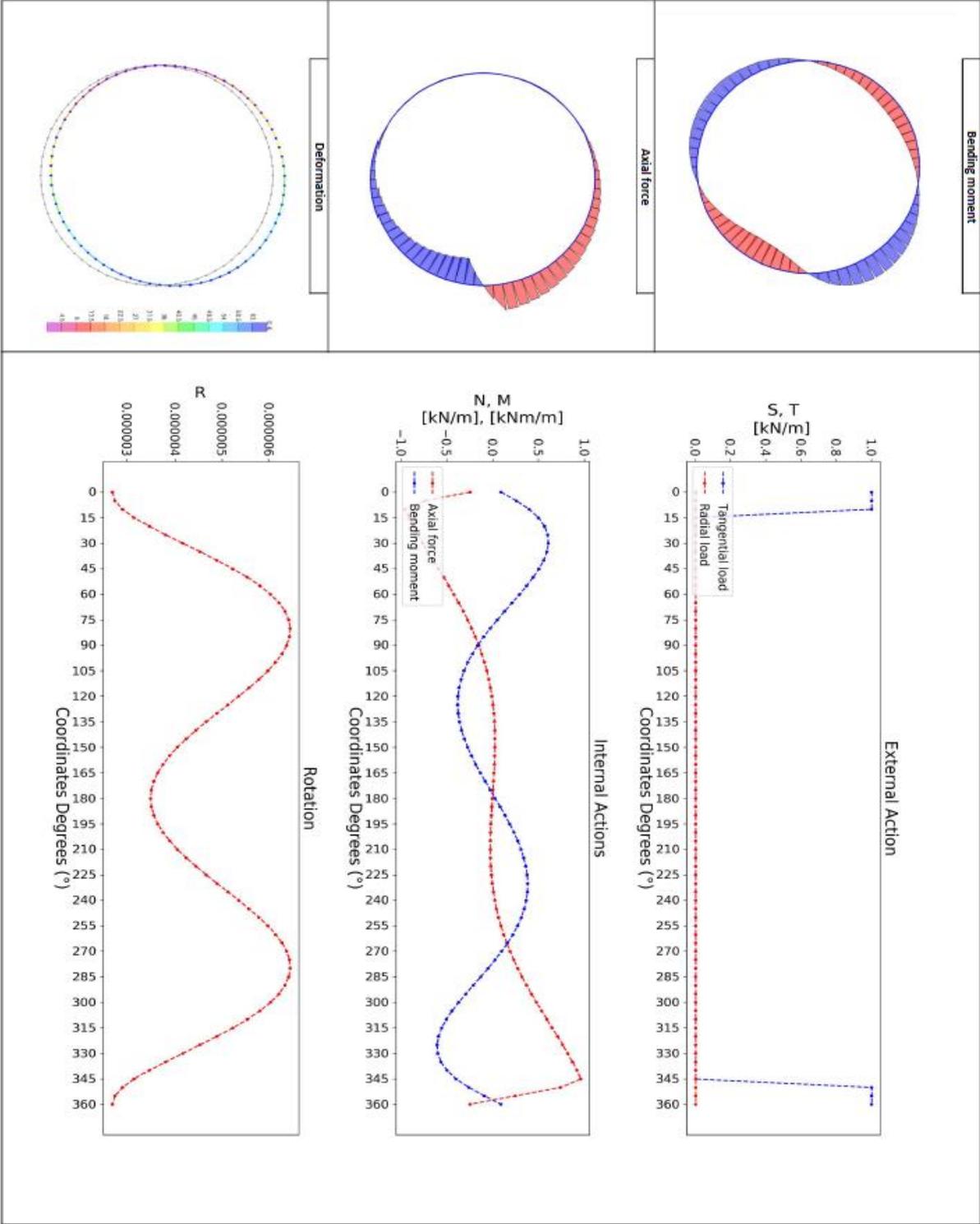


Figura 19 - Carico tangenziale localizzato a fase $\theta_0=0$

L'equazione del carico adimensionale radiale A è la seguente:

$$\text{Carico radiale } A = 1 + \cos(\theta_0 + \varphi)$$

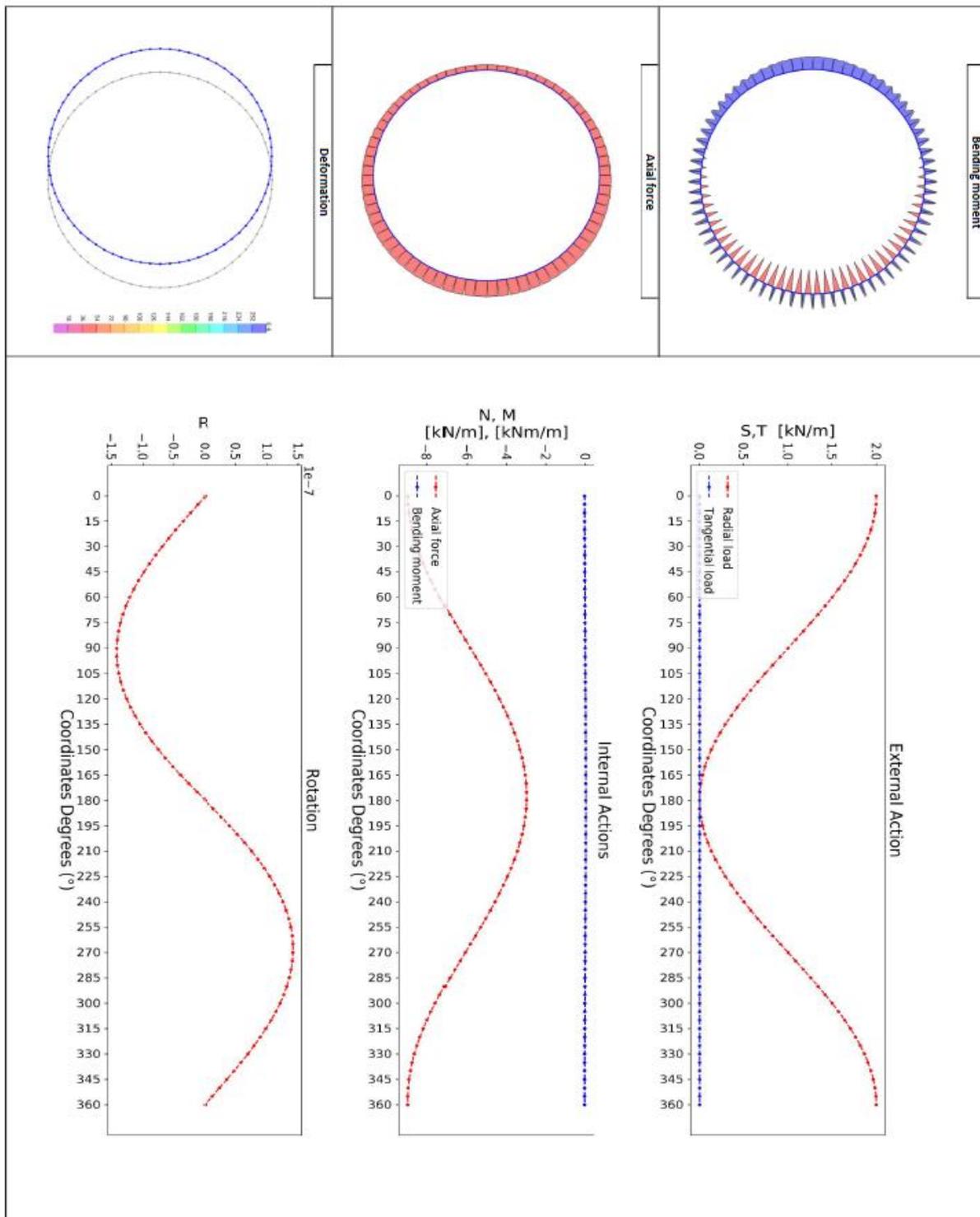


Figura 20 – Carico adimensionale radiale A a fase $\theta_0=0$

L'equazione del carico adimensionale radiale B è la seguente:

$$\text{Carico radiale } B = 1 - \cos(2 \cdot (\theta_0 + \varphi))$$

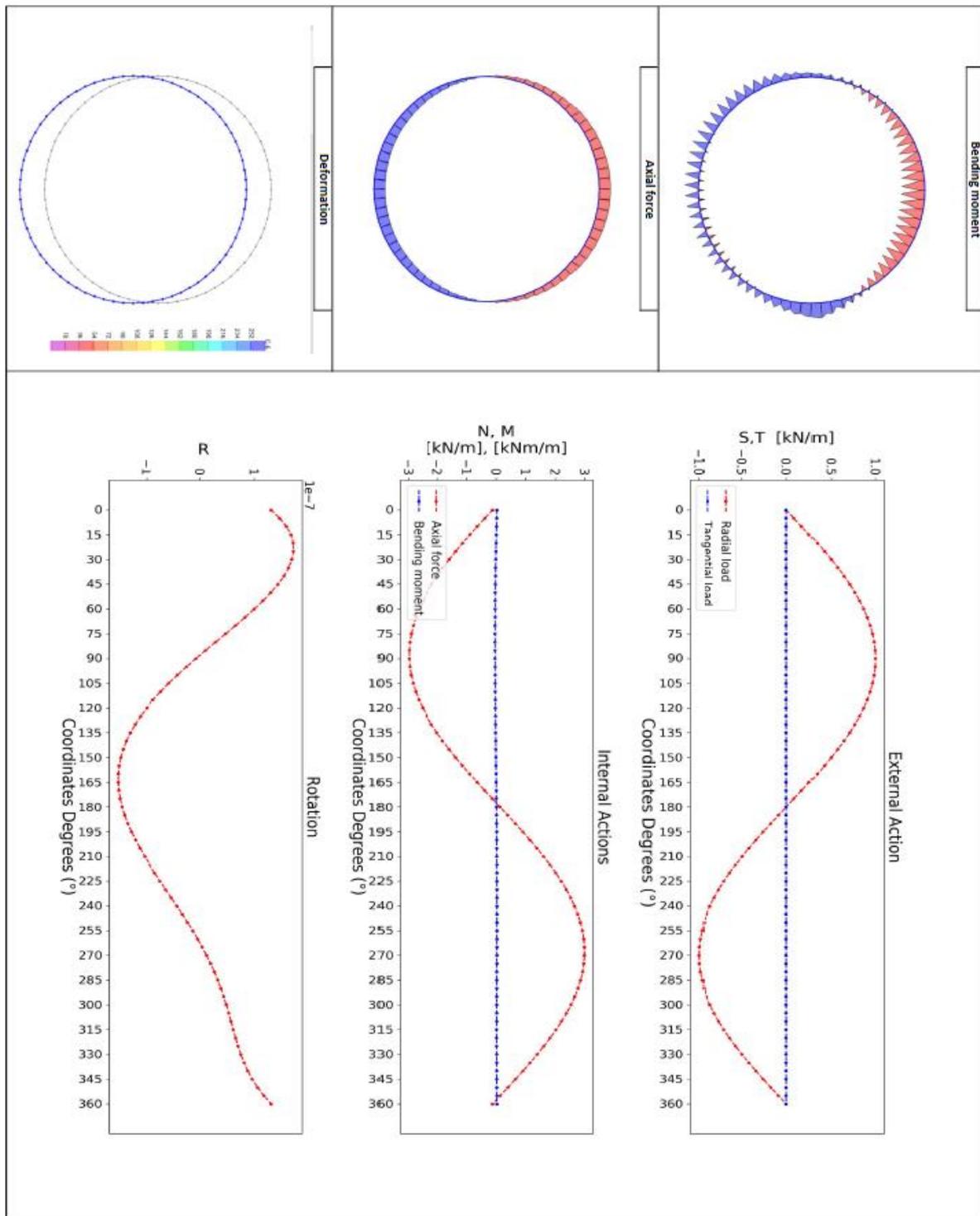


Figura 21 - Carico adimensionale radiale B a fase $\theta_0=0$

L'equazione del carico adimensionale radiale C è la seguente:

$$\text{Carico radiale } C = \cos(2 \cdot (\theta_0 + \varphi))$$

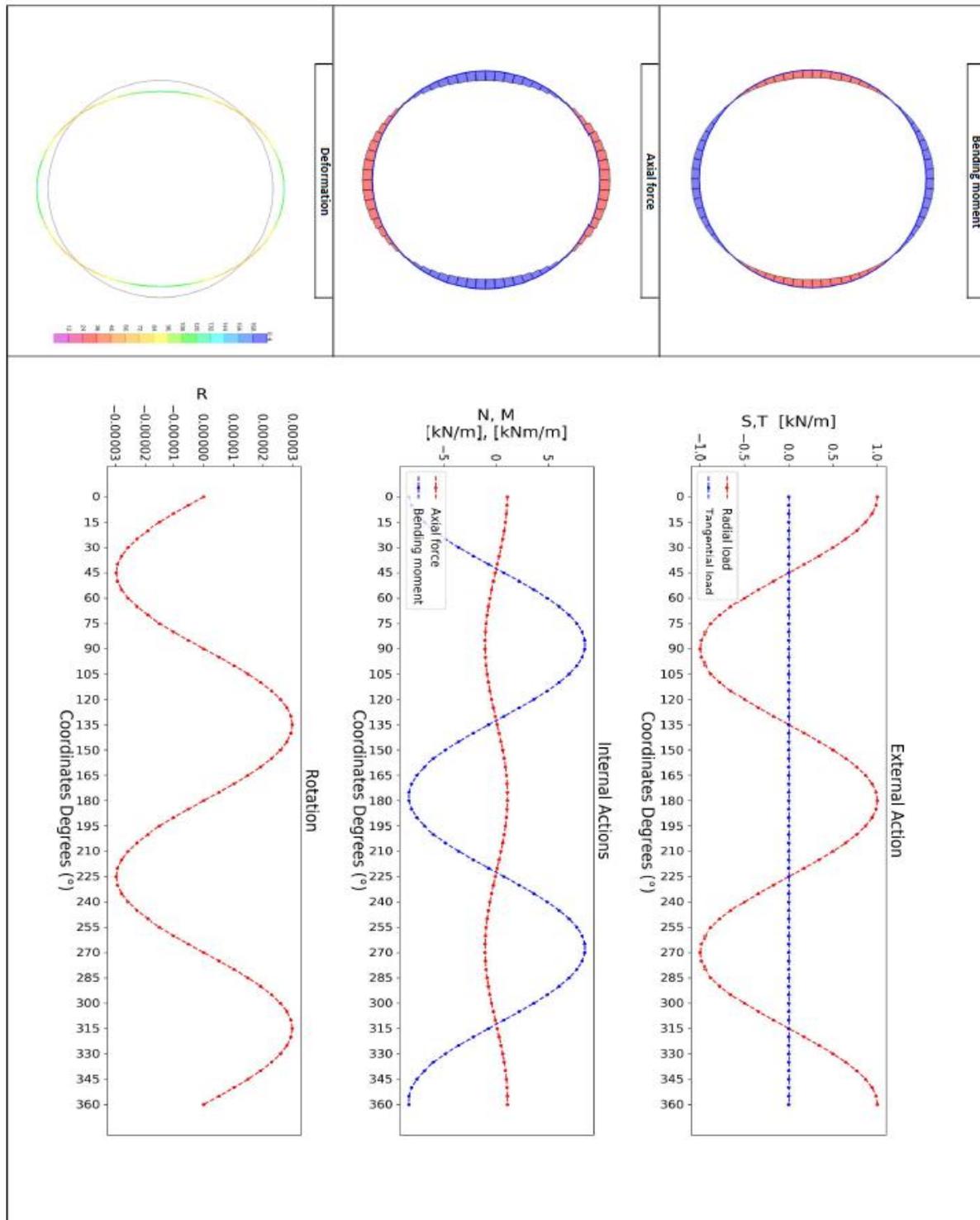


Figura 22 - Carico adimensionale radiale C a fase a fase $\theta_0=0$

L'equazione del carico adimensionale tangenziale A è la seguente:

$$\text{Carico tangenziale } A = \cos(0.5 \cdot (\theta_0 + \varphi))$$

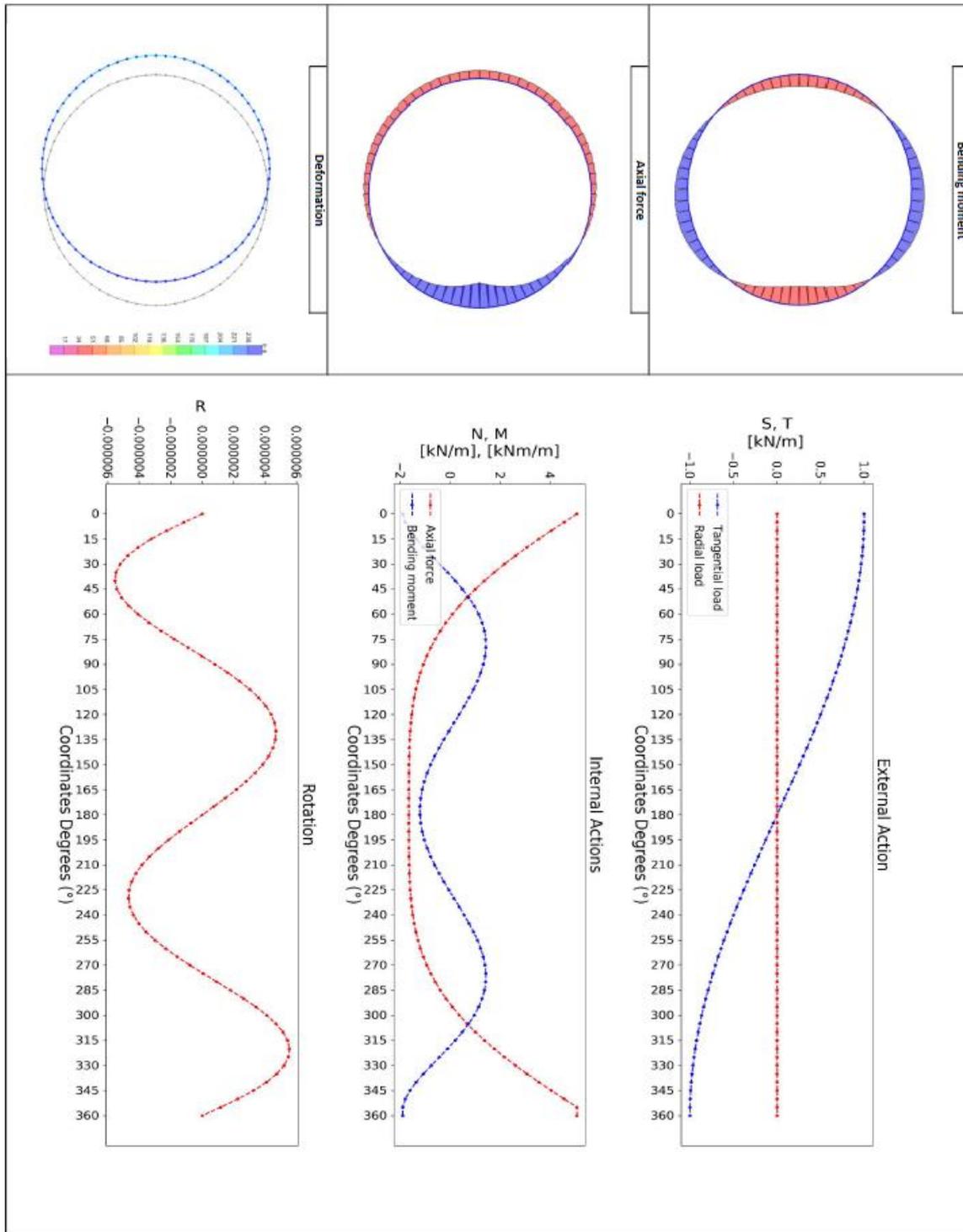


Figura 23 - Carico adimensionale tangenziale A a fase $\theta_0=0$

L'equazione del carico adimensionale tangenziale B è la seguente:

$$\text{Carico tangenziale } B = \sin(\theta_0 + \varphi)$$

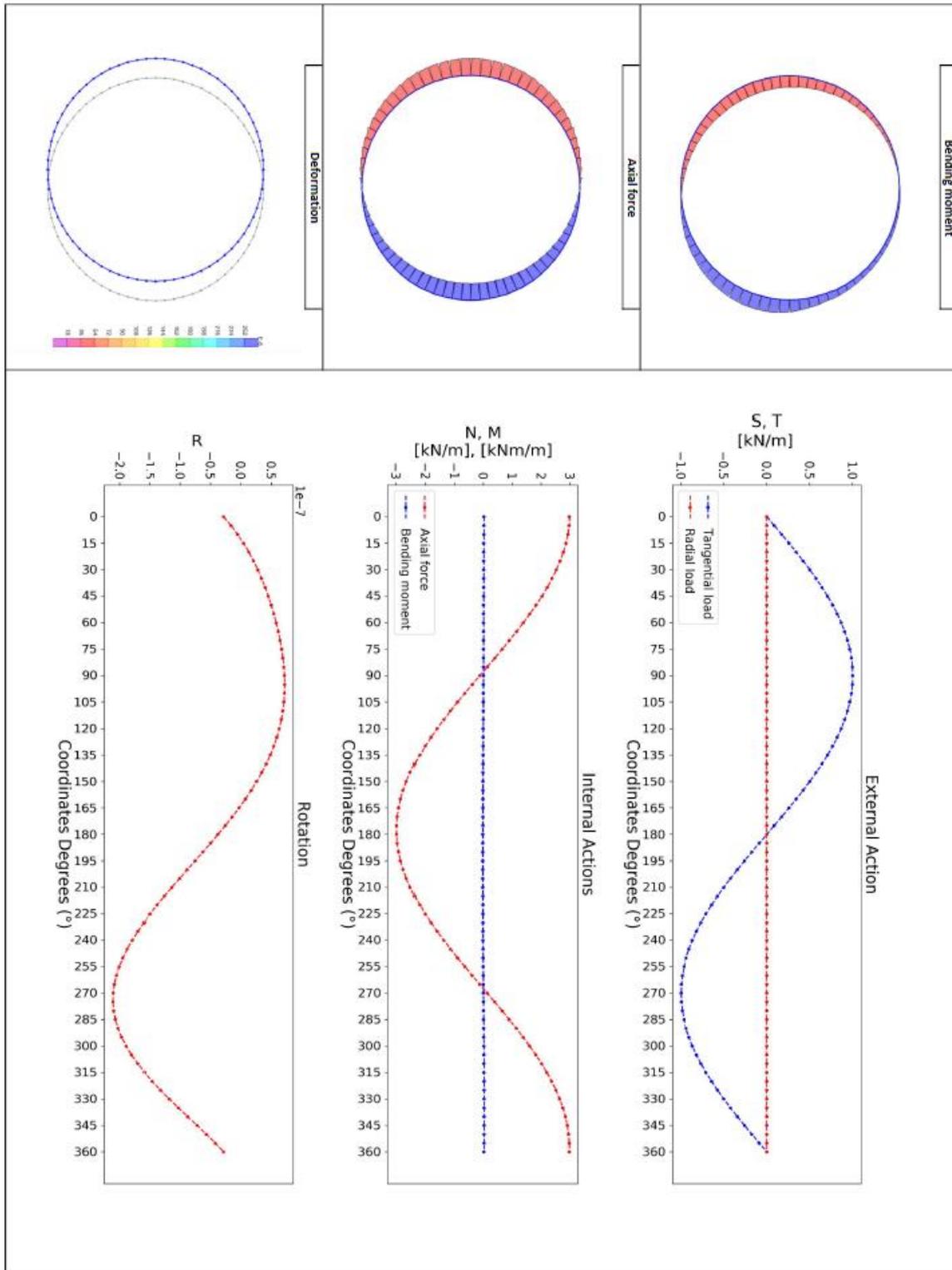


Figura 24 - Carico adimensionale tangenziale B a fase $\theta_0=0$

L'equazione del carico adimensionale tangenziale C è la seguente:

$$\text{Carico tangenziale } C = \sin(2 \cdot (\theta_0 + \varphi))$$

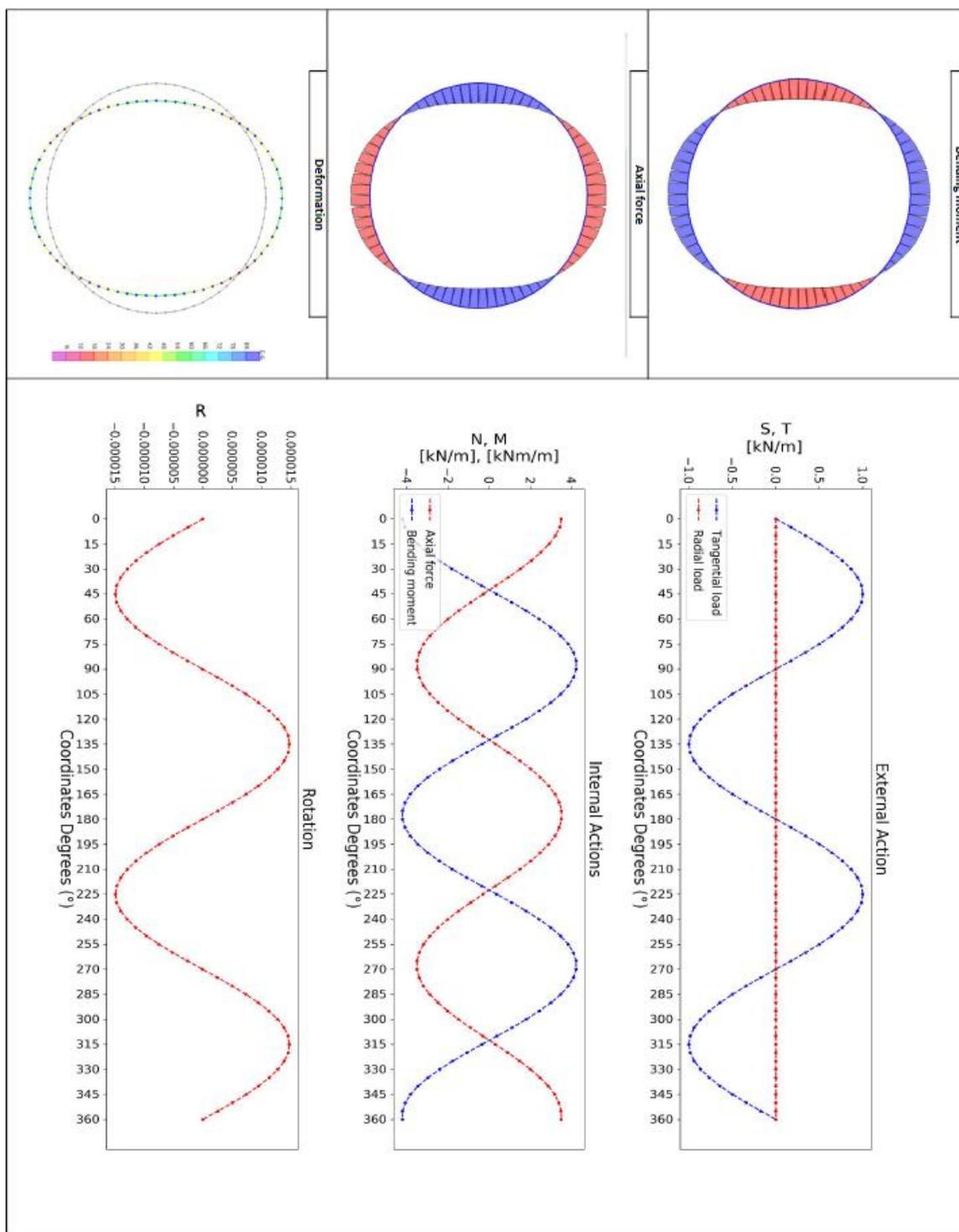


Figura 25 - Carico adimensionale tangenziale C a fase $\theta_0=0$

Come è possibile osservare dalle figure dei carichi adimensionali esposte, anche quando viene applicato un carico adimensionale puramente radiale o tangenziale, nascono sempre sollecitazioni in termini di sforzo normale e momento flettente, più o meno rilevanti a seconda del caso, ma sempre presenti. 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.

È possibile osservare questo effetto nelle figure riportate di seguito.

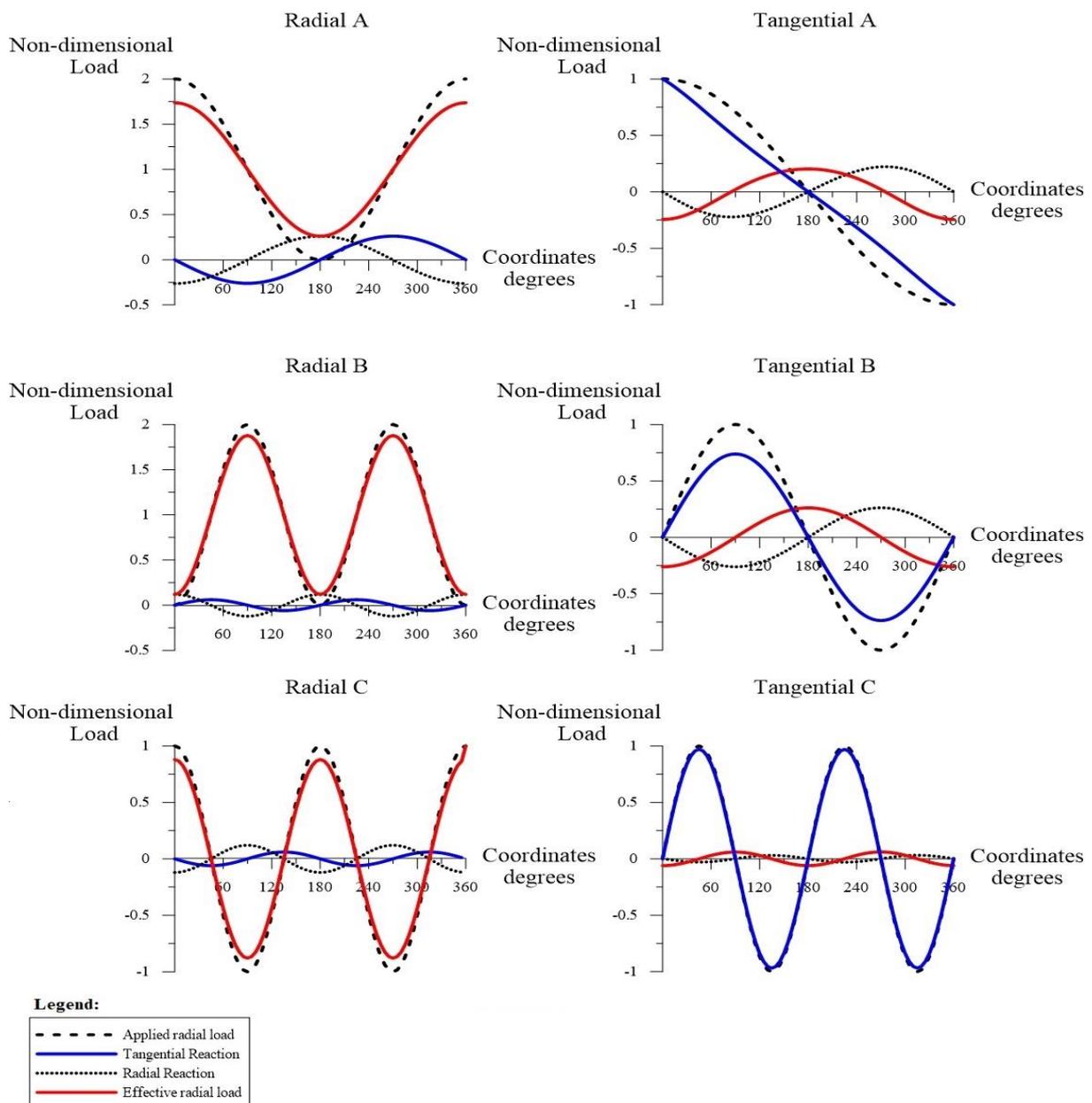


Figura 26 - Reazioni vincolari, carichi applicati e carichi effettivi a cui la struttura è soggetta. Valori ottenuti con rigidità delle molle pari a 1000 kN/m

L'effetto della reazione vincolare, dovuta alla presenza delle molle nel modello strutturale, comporta dunque una riduzione del carico applicato, ed inoltre, sollecitano la struttura anche nella direzione ortogonale all'asse di carico.

Questo aspetto è molto rilevante, in quanto influisce sia nel range di variazione dei coefficienti, che dovranno essere opportunamente tarati caso per caso, sia nel valore da impostare come rigidità delle molle. In particolare quest'ultimo aspetto legato all'incidenza delle molle verrà trattato nei capitoli successivi.

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.

Sono stati effettuati quindi una serie di simulazioni, applicando i carichi adimensionali con più valori di fase, estrapolando la deformata che essi generano.

Avvalendosi delle deformate che la struttura subisce sotto l'effetto di questi carichi adimensionali, considerati singolarmente, è stato definito per ognuno di esse un range di variazione della fase compatibile con il parametro di direzione.

Tabella 3 - Riepilogo equazioni dei carichi adimensionali

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

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_0 diverso, ma interno al range individuato mediante il parametro di direzione (fornito prima dell'analisi) ed amplificato di un coefficiente φ , 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 27 - Individuo della popolazione

Nella Fig, 26 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.

Una volta definiti i criteri di codifica degli individui, con questa impostazione vengono generati un numero di individui che apparterranno alla popolazione iniziale.

Verranno effettuate esecuzioni con generazioni di 24, 48 e 72 elementi per analizzare il comportamento dell' algoritmo al variare di tale parametro.

Per creare un collegamento con l'impostazione data all'algoritmo, verranno esposti a partire dal presente paragrafo fino a quelli successivi, spiegazioni dell'algoritmo con una popolazione iniziale di 24 individui, ma i criteri rimarranno comuni anche per popolazioni più numerose.

Un esempio di generazione iniziale sarà il seguente:

	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}	Punteggio	Genere
1	150	155	0	80	120	210	95	30	65	330	5	0	120	330	0	195	35	100	40	110	0	0
2	90	165	0	270	80	20	55	5	0	355	80	200	10	20	110	350	55	115	0	90	0	0
3	25	160	100	285	50	170	25	200	0	345	0	210	65	355	150	10	0	70	0	110	0	0
4	135	150	120	115	60	330	55	200	20	155	25	20	45	345	75	0	0	65	25	60	0	0
5	40	200	80	280	140	195	90	160	0	10	0	10	140	210	140	340	0	65	50	70	0	0
6	60	335	15	300	0	0	100	25	55	330	15	330	115	160	80	0	-90	235	30	80	0	0
7	80	0	145	270	105	5	65	30	20	335	65	210	0	15	75	30	0	80	40	110	0	0
8	150	185	140	245	120	345	15	165	55	195	5	155	40	185	50	10	0	90	60	75	0	0
9	145	30	0	105	5	30	75	355	15	330	0	210	35	5	150	185	85	95	0	70	0	0
10	90	190	130	290	60	25	80	20	40	165	95	155	45	175	130	330	0	95	0	70	0	0
11	25	200	140	290	105	155	90	160	5	345	85	200	65	185	130	350	-90	245	65	115	0	0
12	55	180	75	60	10	25	50	180	0	340	0	185	100	5	20	195	0	115	35	60	0	0
13	70	200	140	250	0	5	55	170	100	155	30	330	110	210	45	355	30	85	-75	220	0	0
14	0	150	0	280	5	205	5	155	25	150	55	25	0	0	50	345	5	105	10	100	0	0
15	25	195	110	60	35	185	80	350	100	345	25	160	150	200	75	155	0	115	90	65	0	0
16	80	195	25	75	125	200	15	345	75	345	60	190	150	355	125	210	35	90	25	60	0	0
17	145	350	40	285	115	345	0	155	75	195	0	195	75	165	115	20	45	70	35	65	0	0
18	45	170	25	300	85	25	20	5	20	190	0	175	55	350	20	180	5	100	-100	255	0	0
19	85	190	105	110	135	200	0	210	45	185	55	20	150	155	145	180	0	85	-80	235	0	0
20	105	355	85	80	0	200	5	350	95	340	20	160	75	335	80	0	-95	250	10	65	0	0
21	45	340	30	250	125	200	25	350	0	195	85	335	90	210	0	25	55	60	40	95	0	0
22	65	160	65	75	0	335	70	355	75	180	35	185	0	170	0	170	-90	225	0	60	0	0
23	25	175	70	290	120	175	70	155	100	5	80	330	20	150	0	0	0	75	-85	225	0	0
24	145	15	75	95	130	330	95	175	65	30	95	150	125	160	130	0	60	115	5	90	0	0

Figura 28 - Esempio di una generazione iniziale dell'algoritmo

Dove:

- α_1 , α_2 e α_3 sono i coefficienti amplificativi delle tre onde adimensionali radiali, generati casualmente in un intervallo [0,150];
- 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 [0,100];
- 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 del carico 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 del carico tangenziale localizzato, generate casualmente nel range definito dal parametro di direzione;

Nel caso mostrato in figura, sono stati presi in considerazione solo 24 individui, la prima colonna a sinistra indica appunto il numero dell'individuo, mentre le colonne "Punteggio" e "Genere" verranno discusse nei paragrafi successivi.

3.3.3 Assegnazione del punteggio attraverso la funzione di fitness

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 (sotto l'influenza del carico target), 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.

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 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:

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

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

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:

$$\text{Errore totale momento flettente:} \quad e_M = \sum_{i=1}^n e_{M,i} \quad (3)$$

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

$$\text{Punteggio del momento flettente: } P_M = \frac{1}{e_M} \quad (4)$$

Nelle applicazioni di questo algoritmo sono state utilizzate soltanto momento, 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 $i=12$) 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, denominate 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. Questi valori di punteggio sono soltanto parti del punteggio totale assegnato all'individuo in quanto il punteggio totale P , sarà invece dato dalla relazione:

$$P = \frac{1}{e_M + e_N + e_R}$$

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.

La prima fase dell'esecuzione sarà quindi il calcolo del punteggio di tutti gli individuo, di conseguenza. la popolazione prima osservata sarà così fatta:

	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}	Punteggio	Genere
1	150	155	0	80	120	210	95	30	65	330	5	0	120	330	0	195	35	100	40	110	0.617755	0
2	90	165	0	270	80	20	55	5	0	355	80	200	10	20	110	350	55	115	0	90	0.812442	0
3	25	160	100	285	50	170	25	200	0	345	0	210	65	355	150	10	0	70	0	110	1.124447	0
4	135	150	120	115	60	330	55	200	20	155	25	20	45	345	75	0	0	65	25	60	0.571205	0
5	40	200	80	280	140	195	90	160	0	10	0	10	140	210	140	340	0	65	50	70	0.752043	0
6	60	335	15	300	0	0	100	25	55	330	15	330	115	160	80	0	-90	235	30	80	0.633282	0
7	80	0	145	270	105	5	65	30	20	335	65	210	0	15	75	30	0	80	40	110	1.306097	0
8	150	185	140	245	120	345	15	165	55	195	5	155	40	185	50	10	0	90	60	75	1.449954	0
9	145	30	0	105	5	30	75	355	15	330	0	210	35	5	150	185	85	95	0	70	0.516021	0
10	90	190	130	290	60	25	80	20	40	165	95	155	45	175	130	330	0	95	0	70	1.450248	0
11	25	200	140	290	105	155	90	160	5	345	85	200	65	185	130	350	-90	245	65	115	0.636467	0
12	55	180	75	60	10	25	50	180	0	340	0	185	100	5	20	195	0	115	35	60	0.632053	0
13	70	200	140	250	0	5	55	170	100	155	30	330	110	210	45	355	30	85	-75	220	0.787868	0
14	0	150	0	280	5	205	5	155	25	150	55	25	0	0	50	345	5	105	10	100	0.530130	0
15	25	195	110	60	35	185	80	350	100	345	25	160	150	200	75	155	0	115	90	65	0.766931	0
16	80	195	25	75	125	200	15	345	75	345	60	190	150	355	125	210	35	90	25	60	1.016069	0
17	145	350	40	285	115	345	0	155	75	195	0	195	75	165	115	20	45	70	35	65	0.926871	0
18	45	170	25	300	85	25	20	5	20	190	0	175	55	350	20	180	5	100	-100	255	0.706596	0
19	85	190	105	110	135	200	0	210	45	185	55	20	150	155	145	180	0	85	-80	235	1.514767	0
20	105	355	85	80	0	200	5	350	95	340	20	160	75	335	80	0	-95	250	10	65	0.849300	0
21	45	340	30	250	125	200	25	350	0	195	85	335	90	210	0	25	55	60	40	95	1.090692	0
22	65	160	65	75	0	335	70	355	75	180	35	185	0	170	0	170	-90	225	0	60	0.637983	0
23	25	175	70	290	120	175	70	155	100	5	80	330	20	150	0	0	0	75	-85	225	0.787617	0
24	145	15	75	95	130	330	95	175	65	30	95	150	125	160	130	0	60	115	5	90	0.490019	0

Figura 29 - Generazione iniziale con punteggio

L'obbiettivo 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.

3.3.4 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 per due volte i 12 individui a punteggio maggiore che saranno le *madri* degli individui che si generano.

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" esposta nel capitolo precedente. 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 metodi di riproduzione definiti.

3.3.5 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.

Anche se è stato scelto solamente questo meccanismo di riproduzione, verrà esposto anche il criterio di mutazione, in relazione alla codifica e alle grandezze fisiche in gioco, poiché tale metodo è stato applicato a versioni non definitive dell'algoritmo, producendo risultati soddisfacenti, e che quindi può essere considerato come possibile variante in versioni future dell'algoritmo.

3.3.5.1 Meccanismo di mutazione

Il principio della mutazione, come spiegato in precedenza, serve a conferire una variabilità agli individui, e quindi all'algoritmo, che durante le esecuzioni può convergere in valori di massimi locali in termini di punteggio.

L'applicazione di tale principio è la medesima, ma può assumere diverse sfumature come ogni altro aspetto legato agli algoritmi; infatti la mutazione prevede l'alterazione del valore di un singolo allele, ma applicare tale principio in un senso così ristretto è risultato essere ininfluenza nei confronti del punteggio totale, in quanto cambiando il singolo valore non si crea il corretto livello di variabilità, che andrebbe persa nella selezione dell'individuo migliore all'interno della famiglia.

Per ovviare a ciò si è pensato di estendere il livello di mutazione a tutti gli alleli (e quindi ai parametri dei carichi radiali e tangenziali) secondo due criteri:

- Mutazione costante
- Mutazione variabile

Sostanzialmente la differenza fra i due tipi è la variabilità del *parametro di mutazione*. Tale parametro andrà a moltiplicare i singoli alleli al fine di alterare gli individui, e fornisce un forte apporto specialmente nelle generazioni finali in cui la soluzione si attesta in un massimo locale.

Nel caso di mutazione costante, il parametro di mutazione è fisso e comune a tutti gli alleli, nel secondo caso invece il parametro assume valori casuali estrapolati da un intervallo creato opportunamente in funzione delle variabili in gioco.

L'applicabilità e quindi la riuscita di questo meccanismo di riproduzione consiste quindi nella corretta taratura del parametro, poiché se quest'ultimo fosse mal progettato, genererebbe sistematicamente individui con scarso punteggio, e che quindi non sopravviverebbero mai alla selezione naturale.

3.3.5.2 Meccanismo di cross-over

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 e 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, come ad esempio quella riportata in Fig.29:

	α_1	θ_1	α_2	θ_2	α_3	θ_3	δ_1	θ_3	δ_2	θ_{10}	Punteggio	Genere
1	100.00	20.00	0.00	295.00	135.00	0.0	0.00	105.00	20.00	95.00	1.594173	0
2	125.00	155.00	150.00	280.00	75.00	10.0	-80.00	240.00	-80.00	220.00	0.936948	0
3	112.50	20.00	75.00	295.00	105.00	0.0	-40.00	105.00	-30.00	95.00	0.000000	1
4	112.50	155.00	75.00	280.00	105.00	10.0	-40.00	240.00	-30.00	220.00	0.000000	1
5	100.00	87.50	0.00	287.50	135.00	5.0	0.00	172.50	20.00	157.50	0.000000	2
6	125.00	87.50	150.00	287.50	75.00	5.0	-80.00	172.50	-80.00	157.50	0.000000	2
7	112.50	87.50	75.00	287.50	105.00	5.0	-40.00	172.50	-30.00	157.50	0.000000	3
8	109.25	69.97	55.53	289.45	112.79	3.7	-29.61	154.97	-17.02	141.27	0.000000	4

Figura 30 - Esempio di una famiglia dell' AG

Da questa immagine (compressa per motivi grafici) è inoltre possibile comprendere il ruolo della colonna "Genere" associata ad ogni individuo; la sua funzione è puramente pratica, in quanto associa all'individuo, un particolare meccanismo di riproduzione al fine di verificare l'efficacia di quest'ultimo. In base ad esso sono stati infatti scremati diversi metodi di riproduzione poiché l'evidenza suggeriva che non fornivano una variazione tale da permettere l'individuo di sopravvivere alla selezione naturale imposta. Tuttavia le scelte adoperate in questa applicazione per la riproduzione, sono da intendere arbitrarie e prese in funzione dei risultati; esistono numerose tecniche di riproduzione che non sono state prese in considerazioni ma che potenzialmente potrebbero fornire risultati migliori.

A titolo di esempio, un ulteriore meccanismo di riproduzione compatibile con questa applicazione potrebbe essere uno scambio di geni fra l'individuo madre e padre, in modo da prendere ad esempio il carico radiale di uno e il tangenziale dell'altro, e come questo esempio se ne potrebbero impostare molti altri ancora.

3.3.6 Output dell'algoritmo

Quando i meccanismi di riproduzione sono terminati, e l'algoritmo attraverso le A.P.I risale al punteggio di ognuno di essi, in tale istante avverrà la selezione dell'individuo.

Verrà infatti selezionato l'individuo con il punteggio massimo, e per esso sarà generata da Python una serie di grafici che mostreranno visivamente, la bontà dell'individuo rispetto alla soluzione.

L'output avrà la seguente forma:

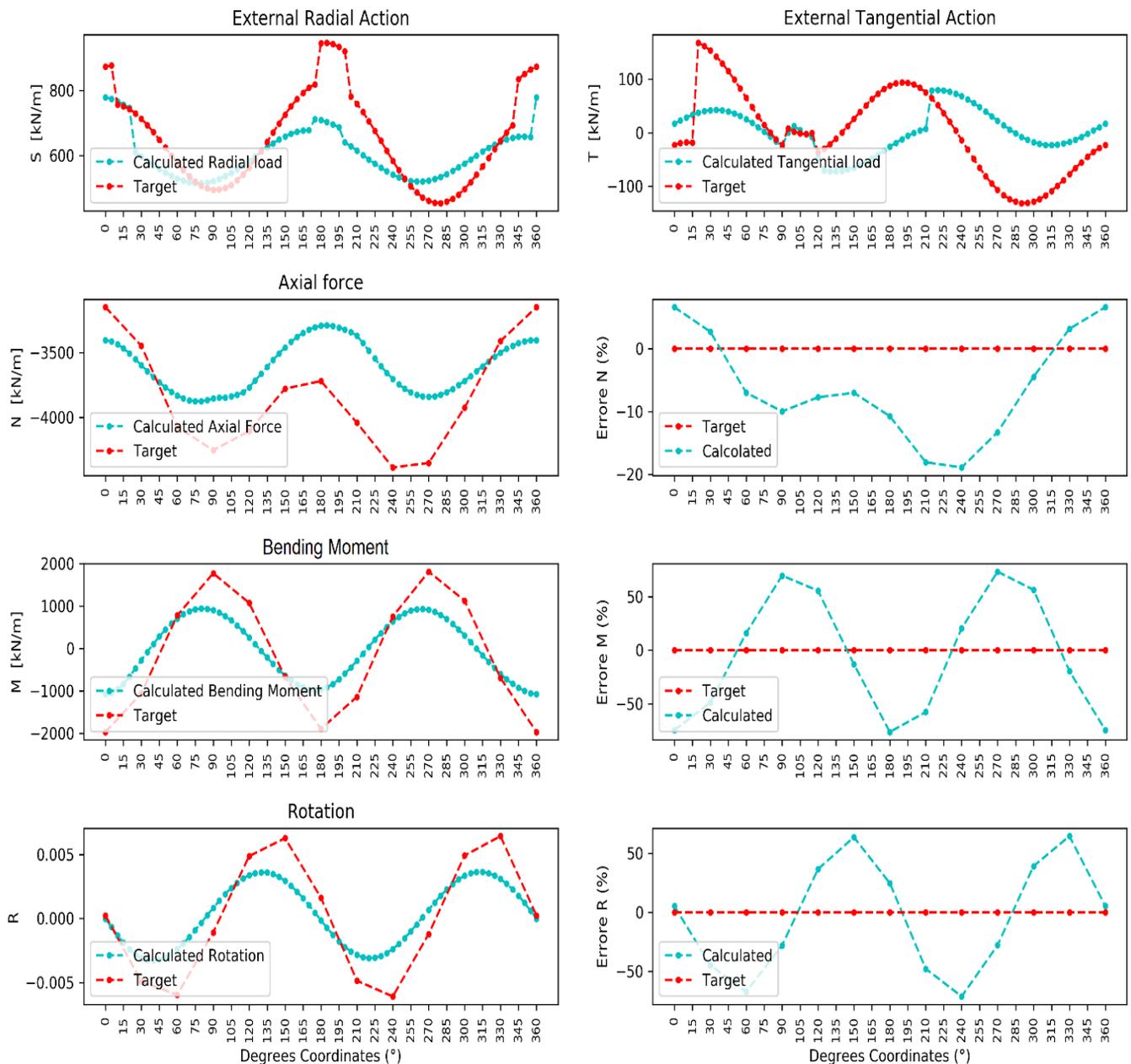


Figura 31 - Esempio di Output dell'algorithm generico

Come da leggenda è possibile osservare che le curve rosse in tutti i grafici sono associate al Target stabilito preliminarmente, mentre le curve ciano sono associate al carico definito dall'individuo. In particolare avremo:

- Nei grafici posizionati nella prima riga in alto è presente un confronto fra il carico radiale e tangenziale target con quelli definiti dall'individuo, tale confronto è puramente indicativo in quanto, in un'applicazione reale a seguito di dati di monitoraggio, non si dispongono di tali informazioni;
- Nei grafici posizionati nelle righe sottostanti, vengono esposti i confronti fra le sollecitazioni e gli spostamenti dovuti al carico associato all'individuo e i valori

registrati del target, che rappresentano i dati monitorati in sito sulla struttura. Affiancati ad ognuno di essi viene quindi riportato l'errore parziale percentuale (2) calcolato in fase di analisi per evidenziare il discostamento fra il valore calcolato ed il valore monitorato.

Tutti i grafici presentano in ascisse la coordinata angolare, assunta positiva antioraria a partire del punto più a destra della struttura

3.3.7 Convergenza 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.

Per la valutazione, vengono realizzati grafici in cui si mostra l'evoluzione del punteggio al variare delle generazioni, e si pone anche attenzione al "Genere" degli individui per avere un'indicazione della bontà della scelta dei meccanismi di riproduzione

Un esempio di convergenza ottenuto durante le elaborazioni è il seguente:

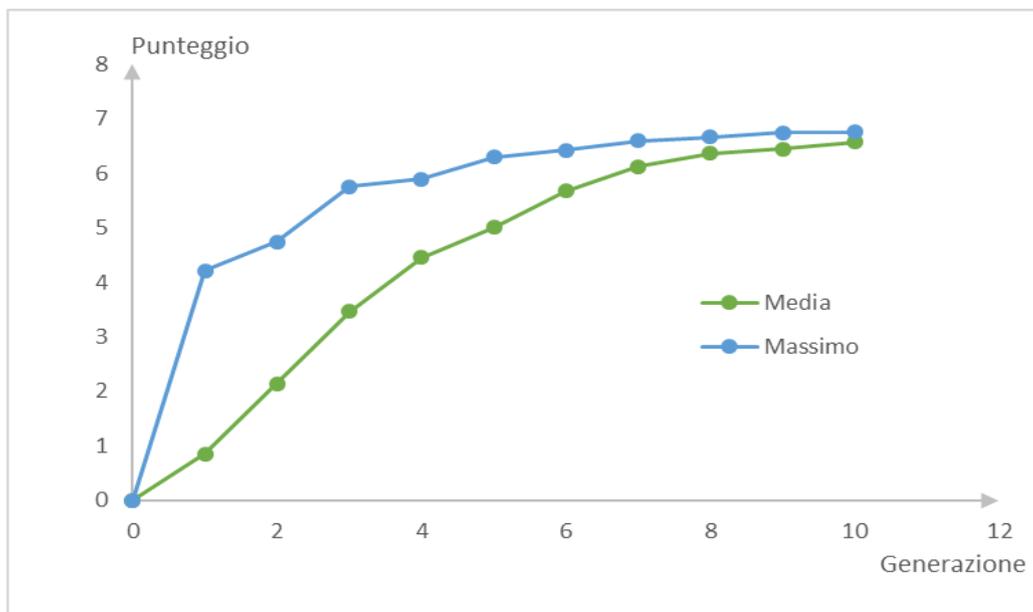


Figura 32 - Esempio di convergenza

Alla fine di ogni esecuzione è necessaria un'analisi critica del risultato, perché non sempre quest'ultimo può essere veritiero, per questo motivo sono necessarie più esecuzioni, al fine di poter mediare il risultato.

4 Taratura del modello strutturale e applicazioni dell'algoritmo

4.1 Panoramica sulle applicazioni

Una volta definiti tutti gli aspetti che caratterizzano l'algoritmo genetico e il modello strutturale, sono state svolte una serie di esecuzioni, con lo scopo di individuare la loro migliore combinazione per il raggiungimento del Target.

I parametri variabili presi in considerazione per le esecuzioni sono stati i seguenti:

- 1) Numero degli individui della popolazione iniziale: Nello specifico si è considerato una popolazione di partenza composta da 24, 48 e 72 individui per analizzare quanto possa incidere l'eterogeneità degli individui iniziali da cui discenderà la soluzione finale; per ottenere tale risultato si è partiti dunque da un campione di 24 individui su cui svolgere le prove, successivamente a questo stesso campione ne sono stati aggiunti ulteriori 24 per ottenere una popolazione finale di 48 individui. Infine è stato applicato a questo campione allargato un ulteriore incremento di altri 24 individui per raggiungere una popolazione iniziale di 72 individui.
- 2) Variabilità della popolazione iniziale: In tale applicazione, sono stati effettuate le prove con lo stesso numero di individui della precedente, con la differenza che in questo caso in ogni prova, ogni popolazione sarà sempre diversa dalla precedente. Con questo caso si vuole analizzare quanto incide la variabilità e quindi anche il numero degli individui iniziali nonché che la loro eterogeneità.

Poiché la casualità nei diversi aspetti dell'algoritmo rappresenta l'essenza stessa dell'algoritmo, per estrapolare un trend per la descrizione dei risultati ottenuti per ogni popolazione iniziale, a seguito della variazione di questi due aspetti, sono state effettuate 3 esecuzioni per un totale di 18 simulazioni.

Si sottolinea il fatto che verrà visualizzato, come output del programma, anche il valore del carico target che genera le sollecitazioni e gli spostamenti; tuttavia questo dato non costituisce un input dell'algoritmo in quanto nella realtà ovviamente non si disporrà mai della distribuzione della spinta delle terre, applicata al rivestimento della galleria, ma verrà riportato ugualmente tale dato esclusivamente per un confronto, puramente visivo, fra il carico target e il carico generato dall'algoritmo.

Per tutte le applicazioni sopra esposte, sono stati mantenuti costanti i meccanismi di riproduzione ed è stata impostata una soglia di interruzione dell'algoritmo per limitare i tempi di elaborazione; tale soglia di arresto è stata fissata pari allo 0.95% del rapporto fra la media dei punteggi della popolazione rispetto al punteggio massimo della popolazione stessa.

4.2 Prima applicazione: Semplice ovalizzazione

Le prime applicazioni sono state eseguite per testare le prestazioni del codice, fissando un Target che causa una semplice ovalizzazione della galleria, in cui si è impostato il parametro di direzione pari a 0° ; questa scelta equivale a sottoporre la struttura ad una forza orizzontale che provocherà la seguente deformata:

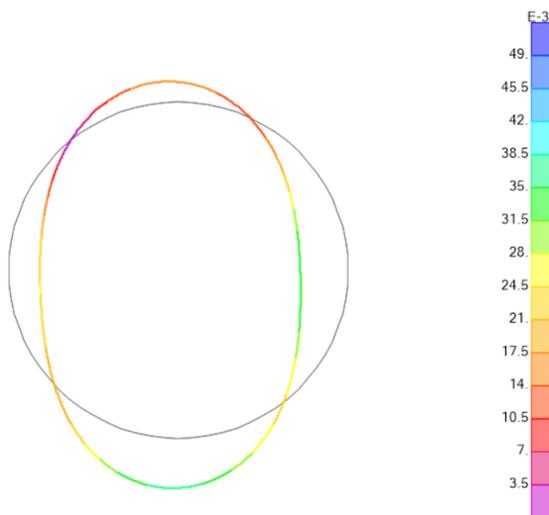


Figura 33 – Deformata target 1° applicazione

Le sollecitazioni, carichi e spostamenti legato a questo Target sono i seguenti:

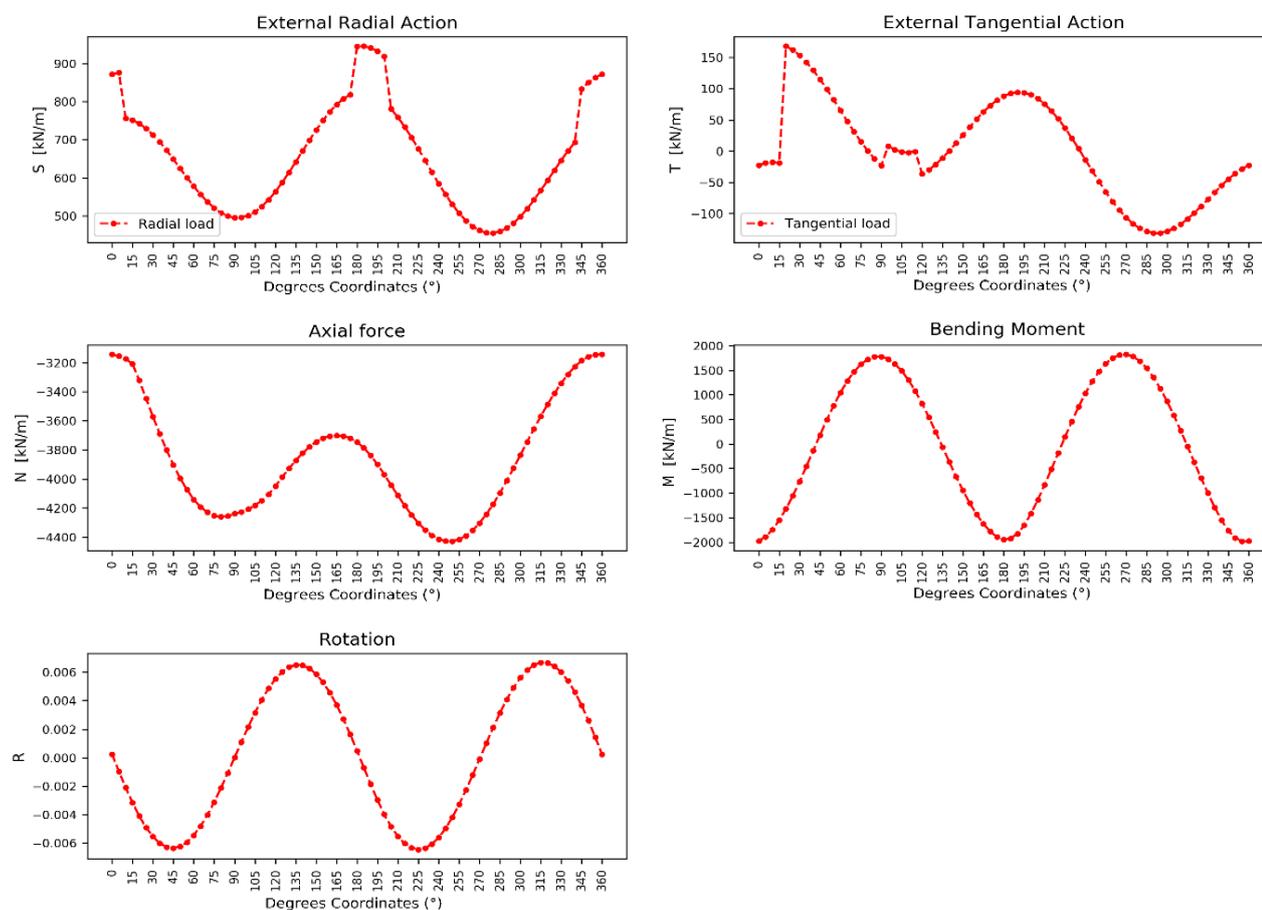


Figura 34 – Carichi, sollecitazioni e spostamenti 1° applicazione

La galleria risulta deformata e traslata infatti il parametro di direzione semplicemente indirizza, in un range preciso, le spinte causate da tali carichi, ma poiché il carico applicato è dato dalla somma di tutti i carichi adimensionali, si avranno sempre ulteriori componenti di spostamento nella deformata finale.

4.2.1 Analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

Si è analizzata dunque la convergenza dell’algoritmo, incrementando la popolazione da 24 a 72 individui, e sono stati individuati i seguenti trend nelle tre diverse esecuzioni realizzate per ogni set iniziale di individui:

4.2.1.1 Popolazione iniziale con 24 individui

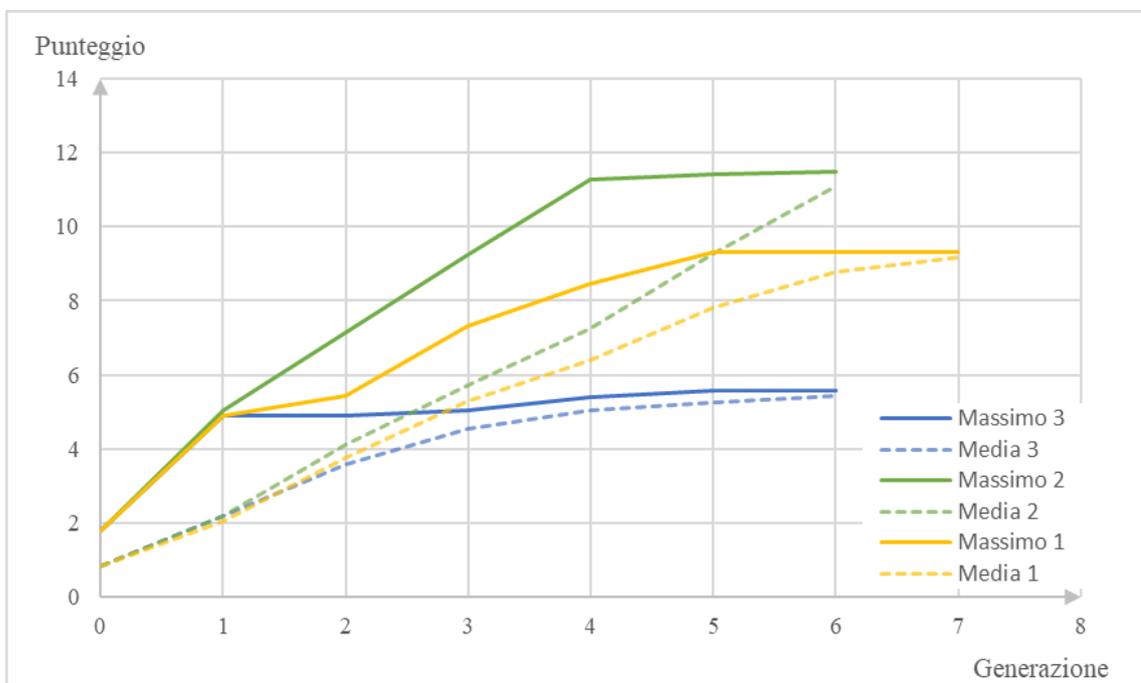


Figura 35 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 24 individui

In quanto la popolazione è la stessa in tutte le tre esecuzioni, la generazione iniziale avrà lo stesso valore medio e massimo, tuttavia le combinazioni che si andranno a sviluppare successivamente sono dettate dalla casualità imposta dalla roulette Wheel. È possibile osservare come nella prima generazione, tutte le esecuzioni raggiungono un punteggio molto simile poco superiore a 5, per poi diramarsi seguendo la casualità prevista dalle combinazioni.

La rapida convergenza ad un valore elevato può avere aspetti negativi, in quanto ci può essere il rischio che tale individuo prevalga rispetto agli altri, diminuendo la diversità della popolazione nel corso delle generazioni, con la conseguenza di una convergenza ad un risultato non ottimale.

In tale esempio infatti è possibile vedere come un’evoluzione cumulativa ha portato ad un risultato più elevato rispetto ad un’evoluzione a gradino come quella della esecuzione 3.

È possibile osservare dagli errori percentuali che in generale i momenti flettenti e le rotazioni, in quanto fisicamente correlate, forniscono valori molto simili ai loro rispettivi prodotti dal carico target, mentre lo sforzo assiale presenta una variabilità più elevata in quanto il carico tangenziale non risulta molto congruente con quello associato al target.

Le tre esecuzioni hanno portato dunque alla predizione dei seguenti carichi e delle seguenti sollecitazioni:

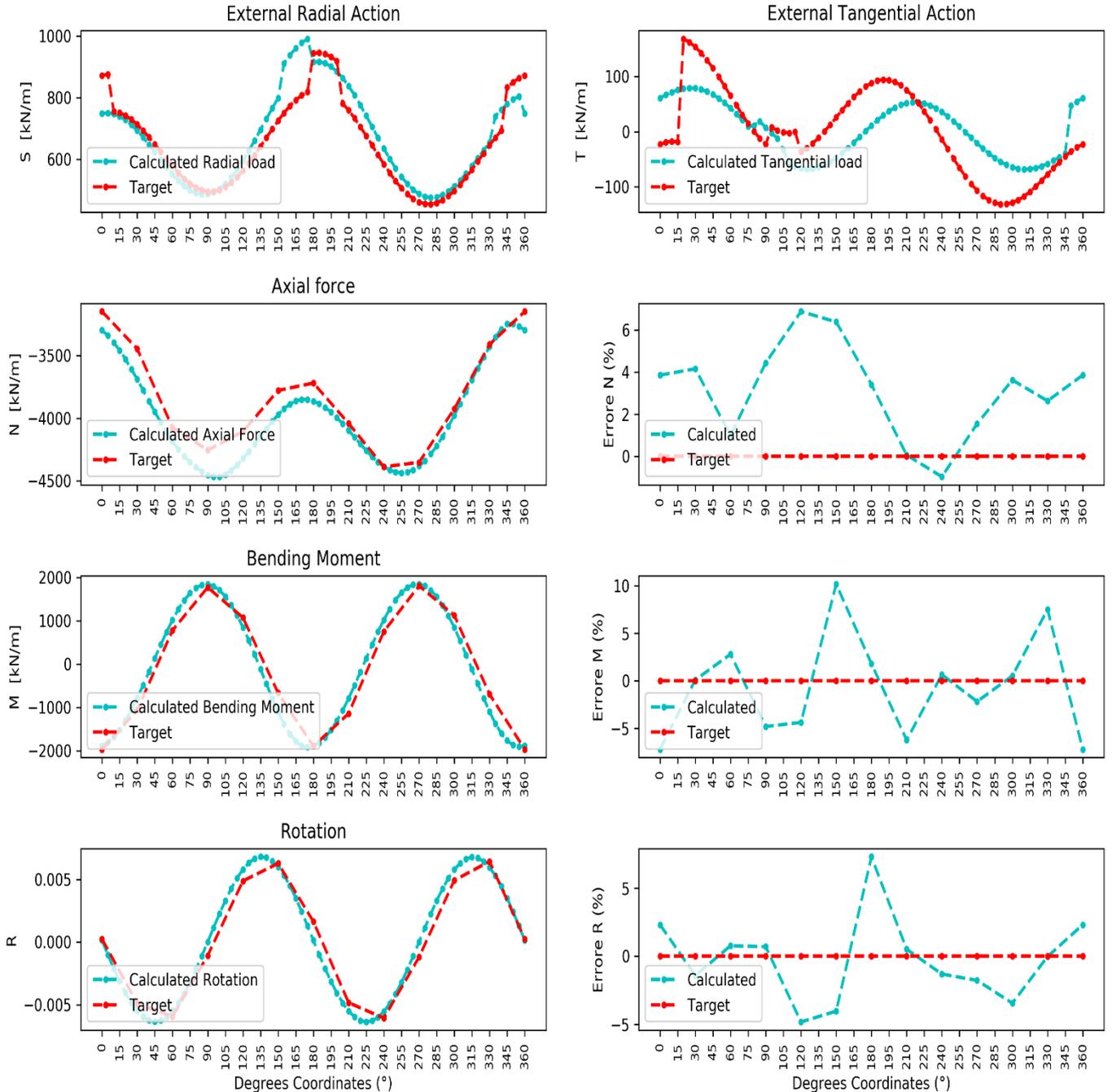


Figura 36 - Risultati della prima applicazione con 24 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

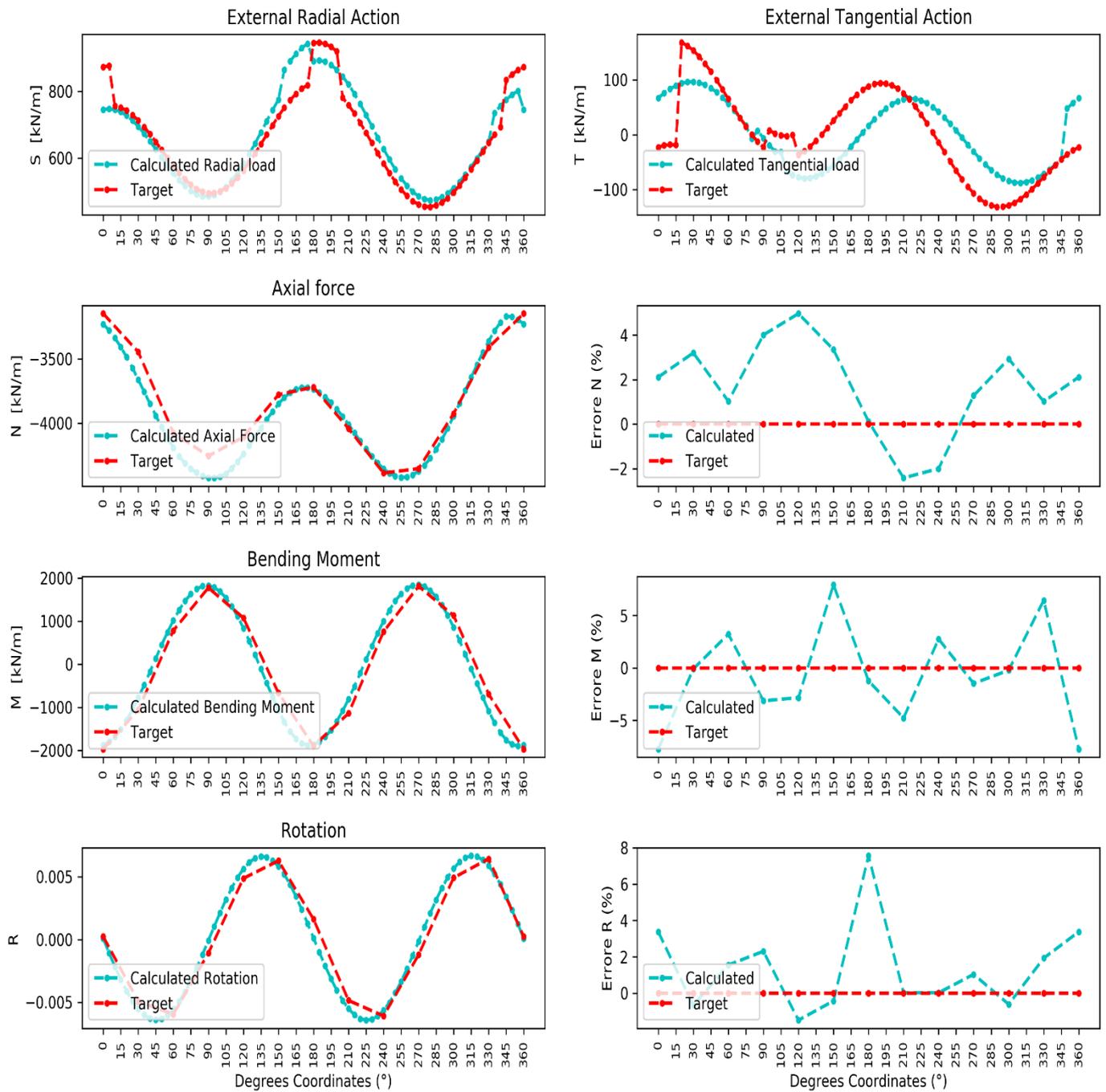


Figura 37 - Risultati della prima applicazione con 24 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

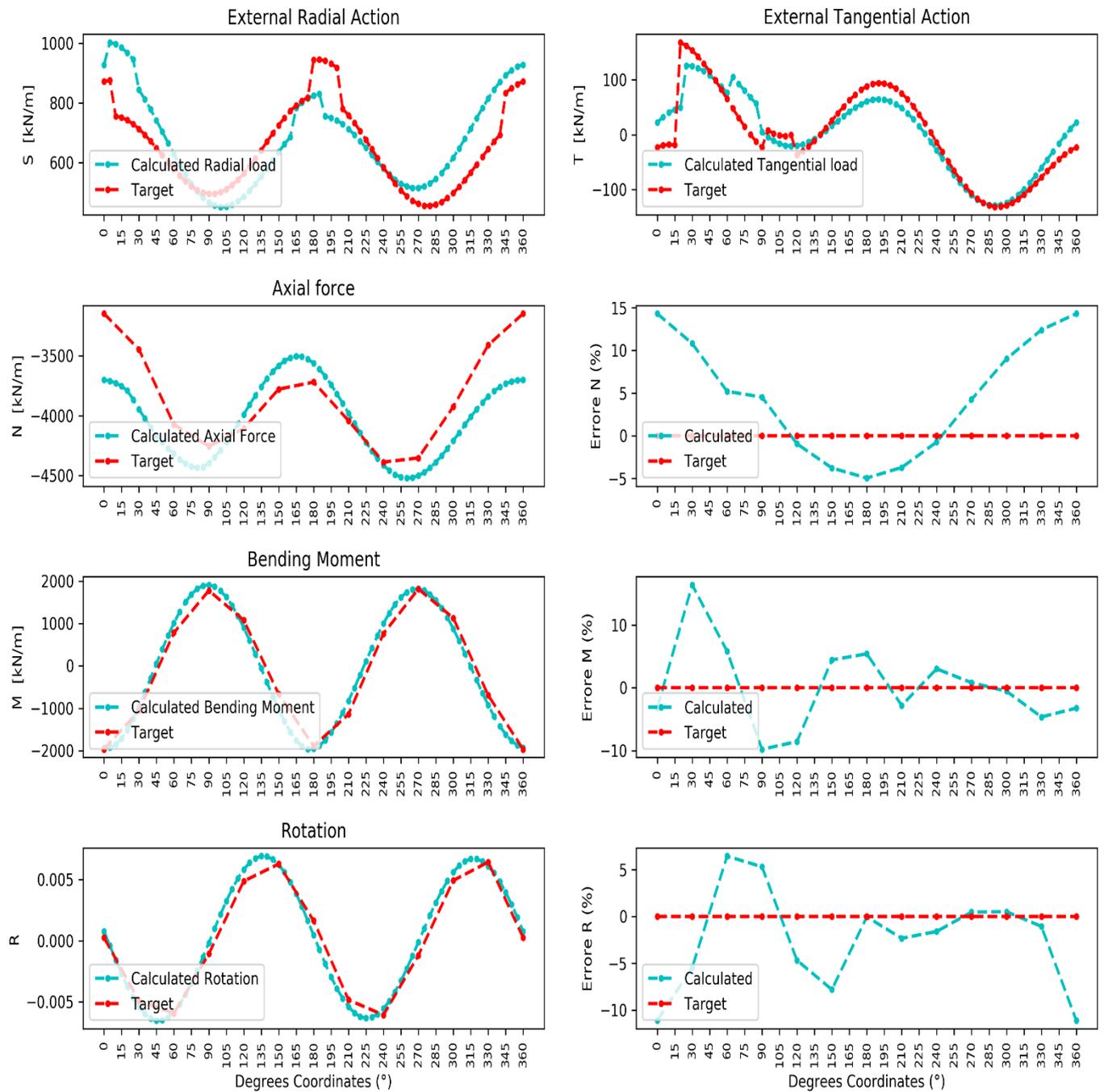


Figura 38 - Risultati della prima applicazione con 24 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

4.2.1.2 Popolazione iniziale con 48 individui

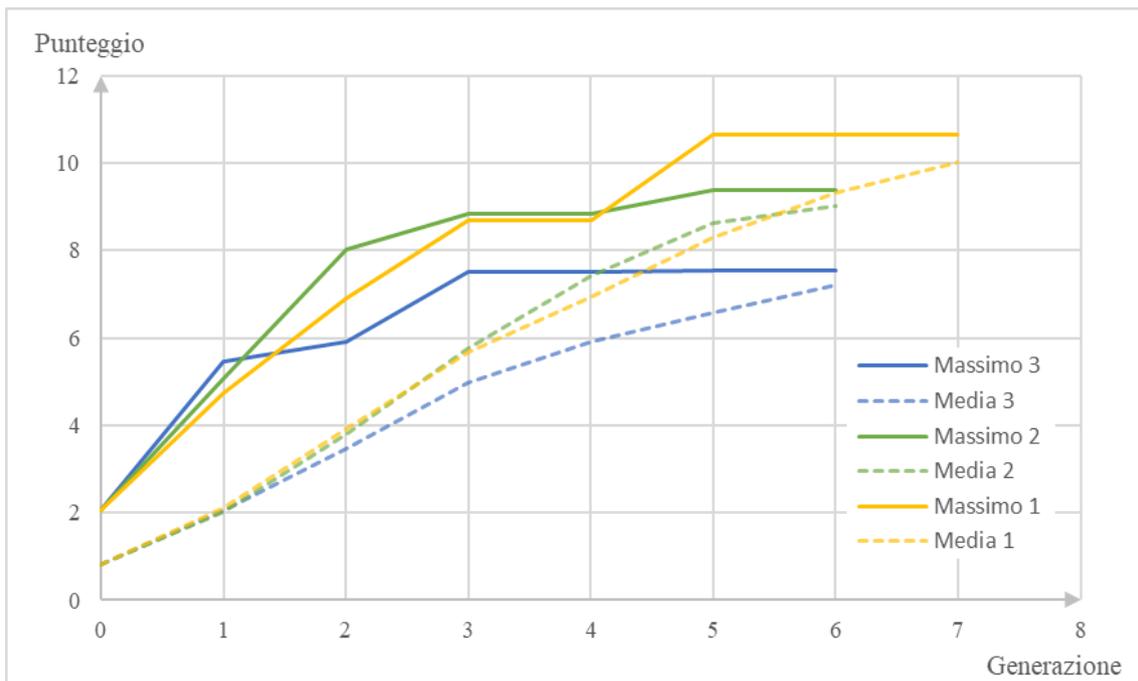


Figura 39 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 48 individui

Anche in questo caso, media e massimo delle varie esecuzioni partiranno dal medesimo valore, ma diverso rispetto al caso precedente poiché il numero di individui è raddoppiato, con la conseguenza di un aumento della diversità e quindi pure del numero delle combinazioni effettuate, in quanto deve risultare che ogni generazione deve avere sempre ugual numero di individui in ogni ciclo.

Facilmente prevedibile il fatto che il punteggio massimo sia aumentato rispetto al caso precedente, tuttavia entrambe è da segnalare le prove presentano profonde differenze nei risultati ma condividono tutte la forma di evoluzione cumulativa.

Come è possibile constatare anche dall'analisi dell'output delle Fig.40, Fig.41 e Fig.42, aumentando gli individui si raggiunge un migliore punteggio e quindi anche un migliore adattamento delle curve calcolate rispetto alle curve associate al target. Il miglioramento è quantificabile anche attraverso la lettura delle percentuali degli errori sulle sollecitazioni e sulle rotazioni, rispetto ai valori di target, che presentano variazioni medie inferiori rispetto al caso con 24 individui.

I risultati di queste esecuzioni sono riportati nelle pagine seguenti.

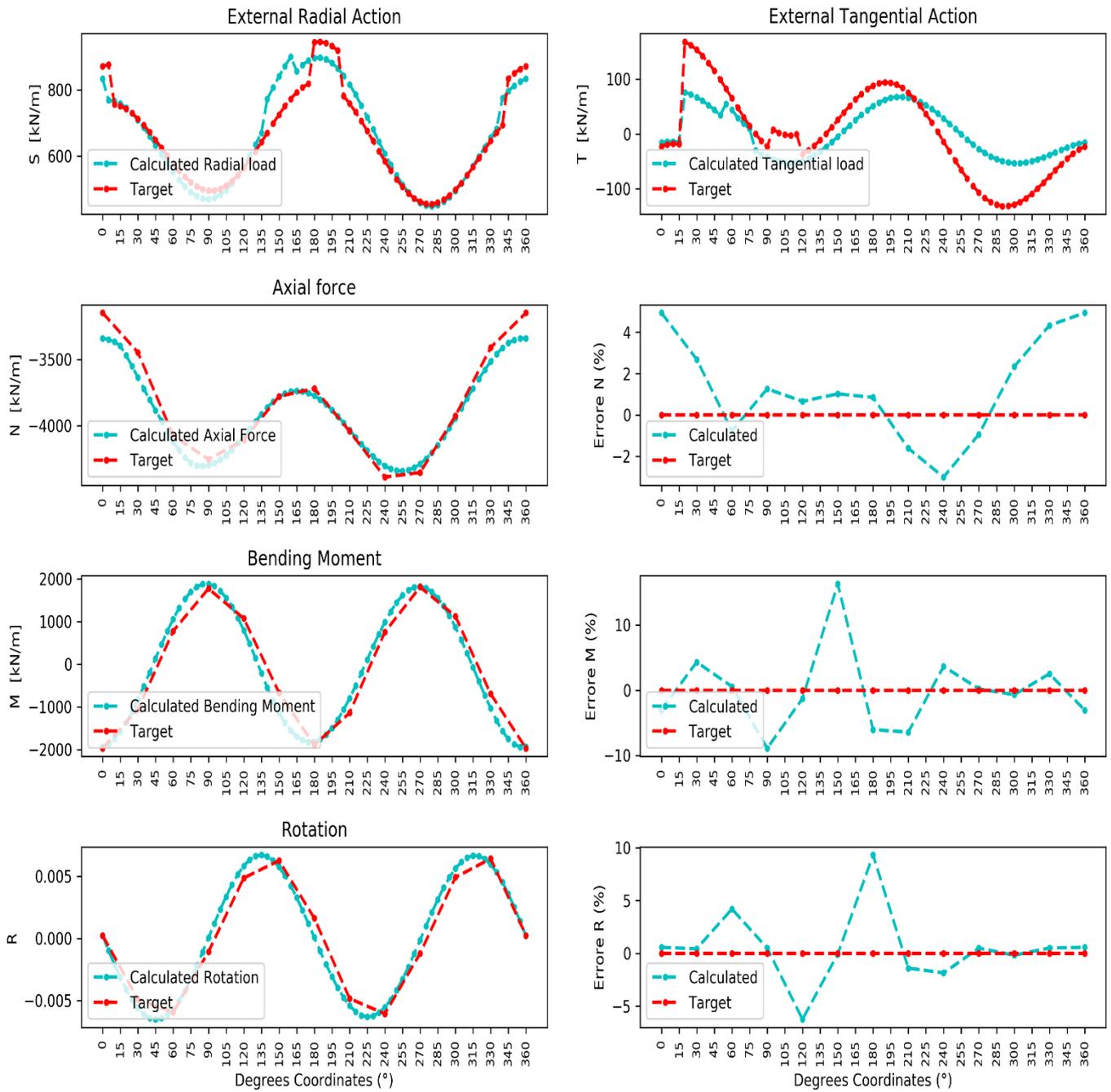


Figura 40 - Risultati della prima applicazione con 48 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

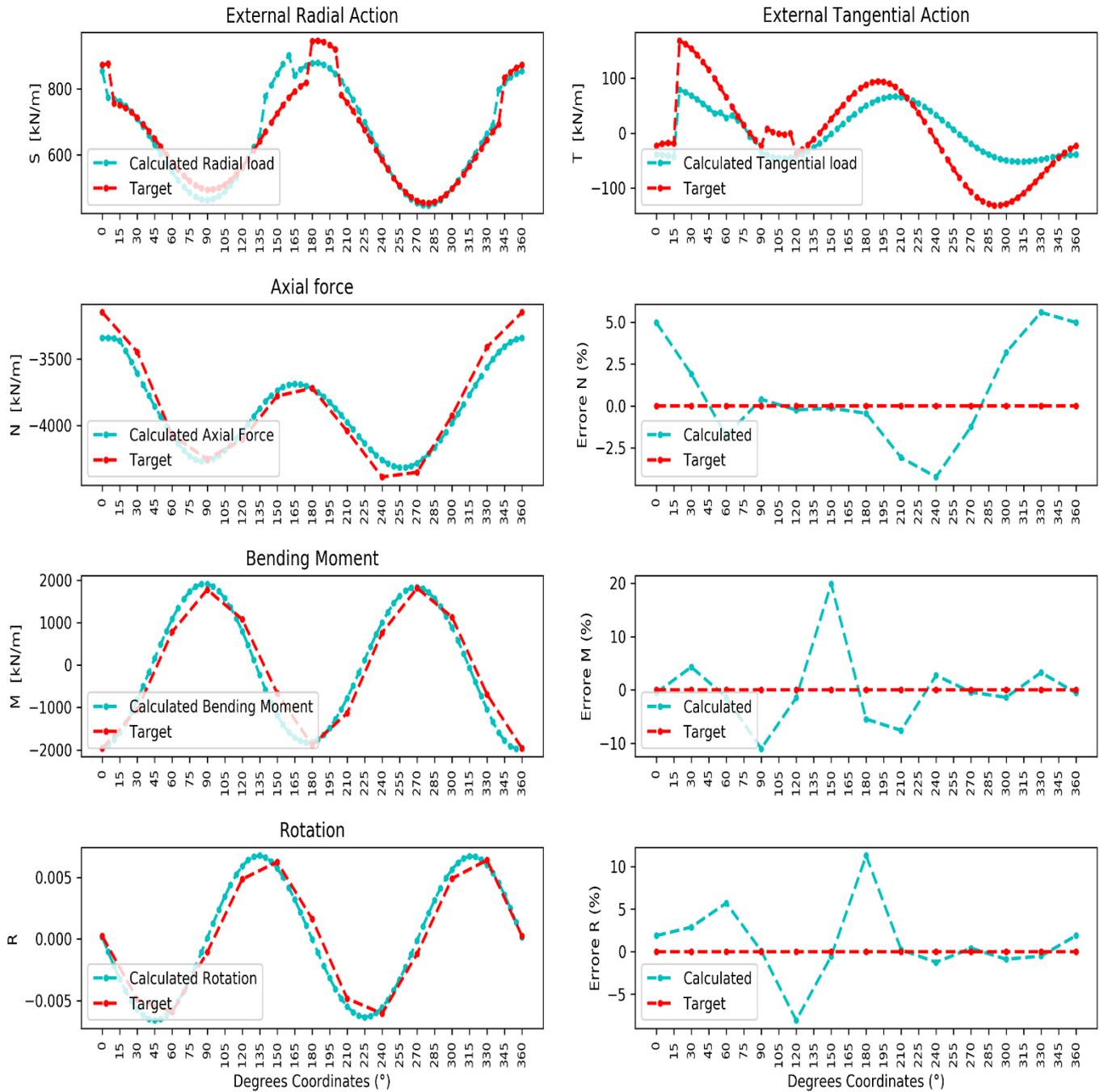


Figura 41 - Risultati della prima applicazione con 48 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

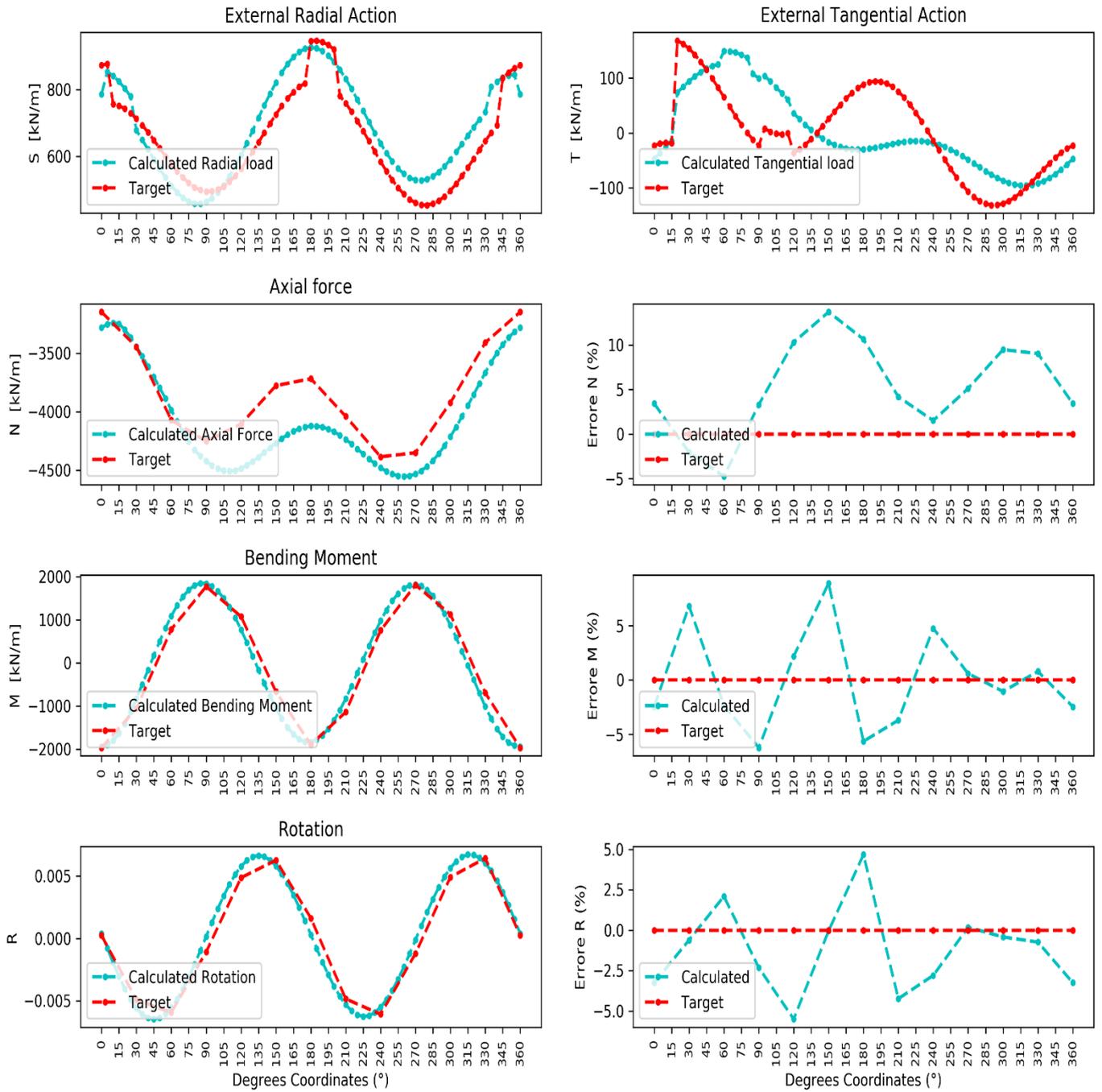


Figura 42 - Risultati della prima applicazione con 48 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

4.2.1.3 Popolazione iniziale con 72 individui

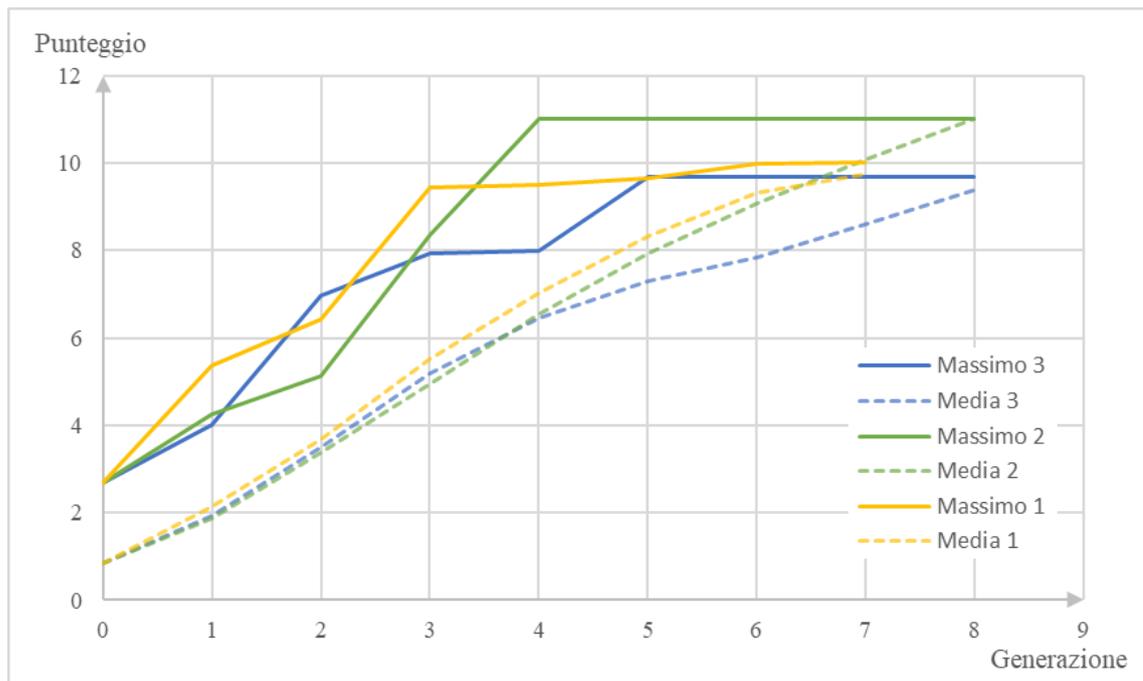


Figura 43- Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 72 individui

L'analisi della convergenza dell'esecuzione con una popolazione iniziale di 72 individui mette in evidenza alcuni aspetti importanti. È possibile notare come non ci sia stato un miglioramento nel punteggio rispetto al caso con la popolazione di 48 individui, a fronte di un aumento di 1/3 del numero di individui iniziali, e soprattutto a fronte dell'incremento del tempo di elaborazione dovuto alle più numerose combinazioni necessarie per l'avanzamento della generazione.

Questo risultato è giustificabile per il fatto che i 2/3 della popolazione risultano identici agli individui che caratterizzavano il caso precedente, dunque un incremento del punteggio era possibile ma non molto probabile.

Come è possibile osservare dalla Fig.45, l'esecuzione numero 2 presenta alti valori di punteggio e grande adattabilità delle curve calcolate rispetto a quelle relative target.

Questo aspetto lascia inevitabilmente intendere che il risultato finale è condizionato fortemente anche dalla qualità della popolazione iniziale; sarà possibile osservare tale caratteristica nell'analisi della variabilità della popolazione iniziale nel successivo paragrafo. Gli output delle varie esecuzioni sono riportati di seguito.

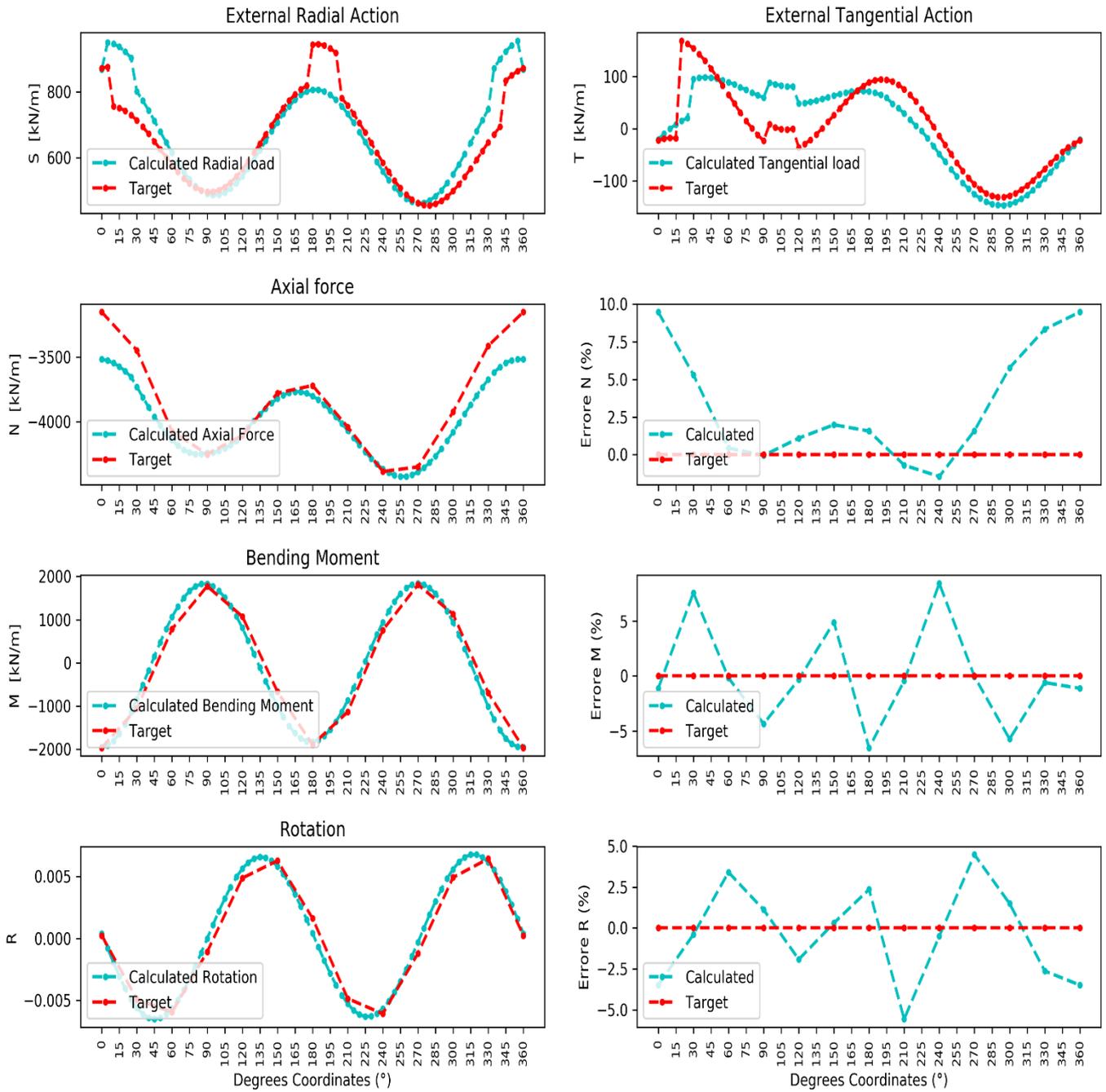


Figura 44 - Risultati della prima applicazione con 72 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

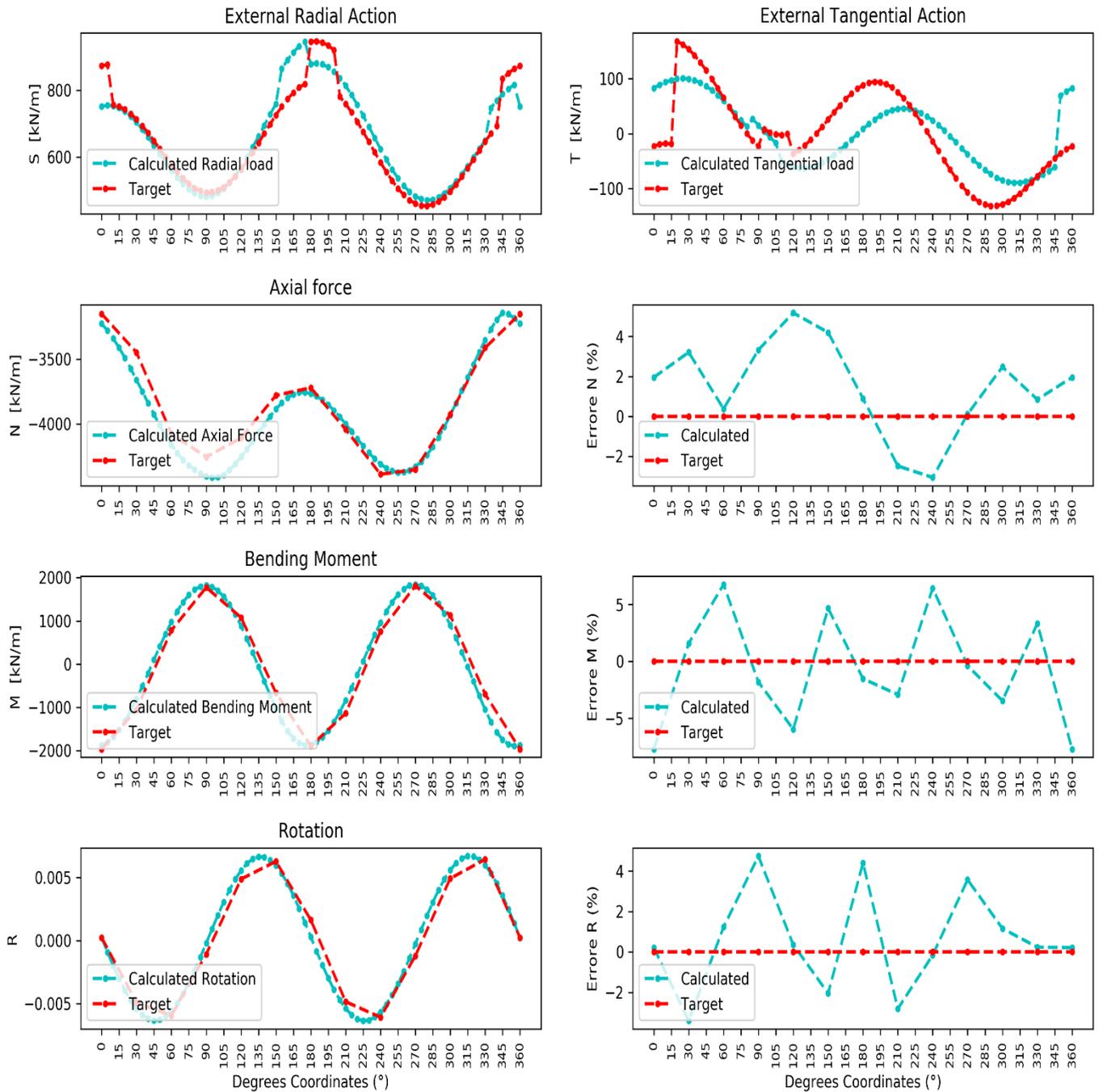


Figura 45 - Risultati della prima applicazione con 72 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

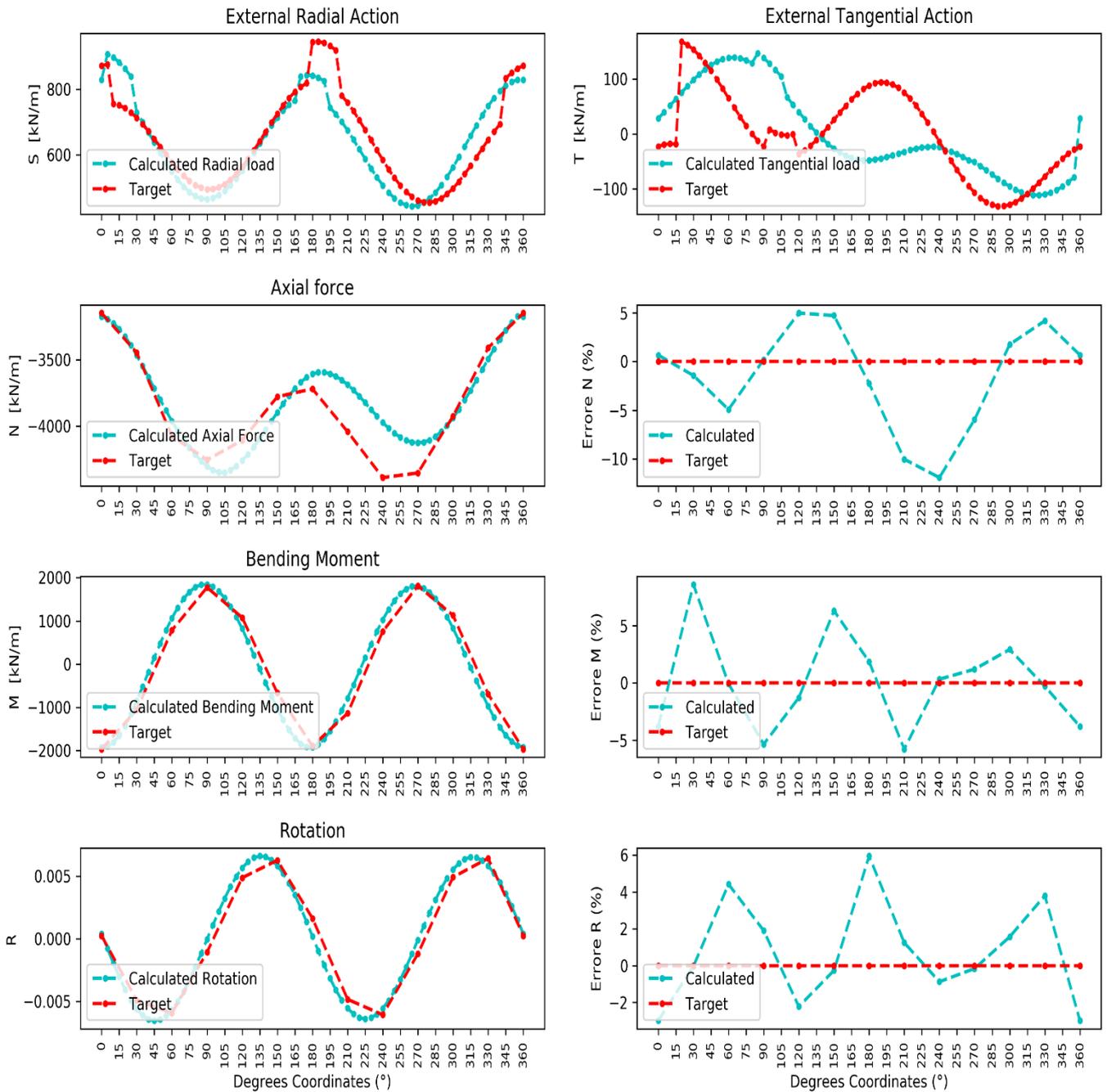


Figura 46 - Risultati della prima applicazione con 72 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

4.2.2 Analisi della variabilità della popolazione iniziale

Una volta terminate le analisi esposte in precedenza, sono state nuovamente ripetute prendendo in considerazione in ogni esecuzione individui sempre diversi, mantenendo però il format da 24,48 e 72 individui.

In questo caso le prove con 48 e 72 individui nella popolazione iniziale, non sono correlati all'applicazione con 24 individui; questa scelta è stata applicata proprio per osservare l'incidenza che ha la popolazione iniziale, nella sua diversità e numerosità, nel risultato finale. Si esporranno di seguito i risultati di queste operazioni:

4.2.2.1 Popolazione iniziale con 24 individui

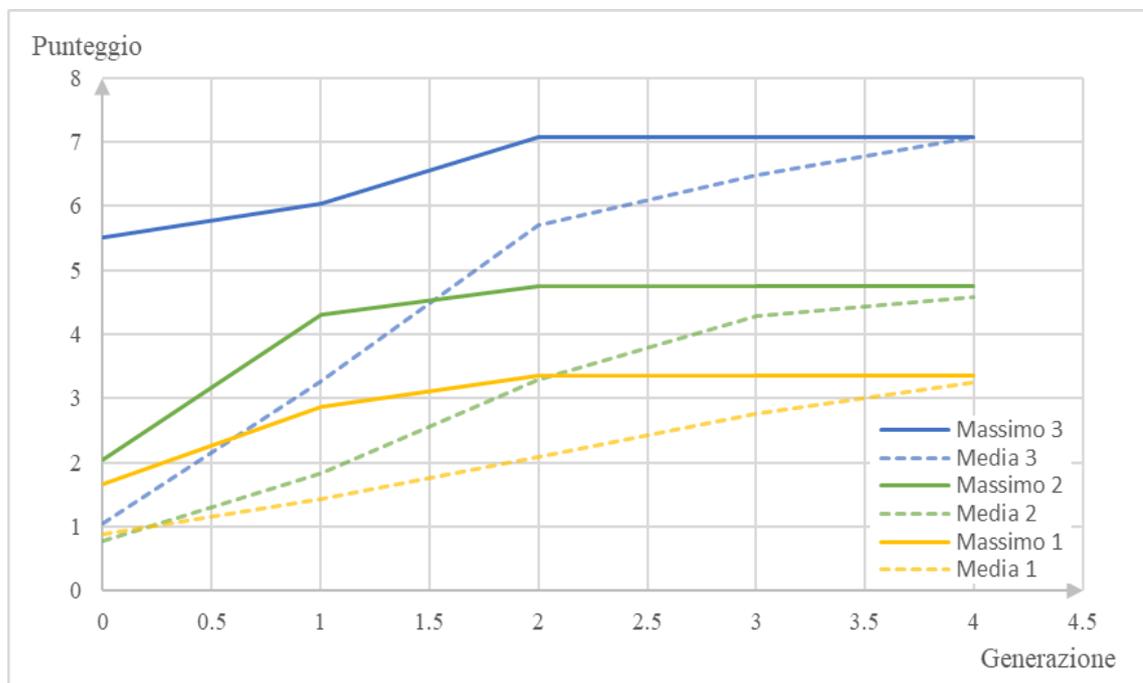


Figura 47 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 24 individui

Dall'analisi della convergenza dell'algoritmo di questo caso, è possibile subito notare come tutte le applicazioni abbiano medie e massimi iniziali diversi nelle diverse esecuzioni.

È possibile inoltre notare che, a differenza del caso precedente, l'esecuzione 3 presenta un individuo iniziale con un punteggio maggiore rispetto a gli altri massimi, e questo condiziona pesantemente il risultato finale dell'algoritmo.

Osservando i risultati ottenuti dalle Fig. 48, Fig. 49 e Fig. 50, con particolare attenzione alla previsione del carico esterno tangenziale, si può notare come tutte le forme del carico calcolato sono diverse le une dalle altre; questo risultato è dovuto al fatto che la modellazione del carico tangenziale presenta una variabilità superiore rispetto a quello radiale, infatti il carico tangenziale è stato formulato con la somma di tre onde tutte con frequenza diversa proprio per riuscire a simulare nel miglior modo possibile una reale distribuzione del carico.

Sollecitazioni, carichi e rotazioni associate a questo caso vengono quindi riportati di seguito:

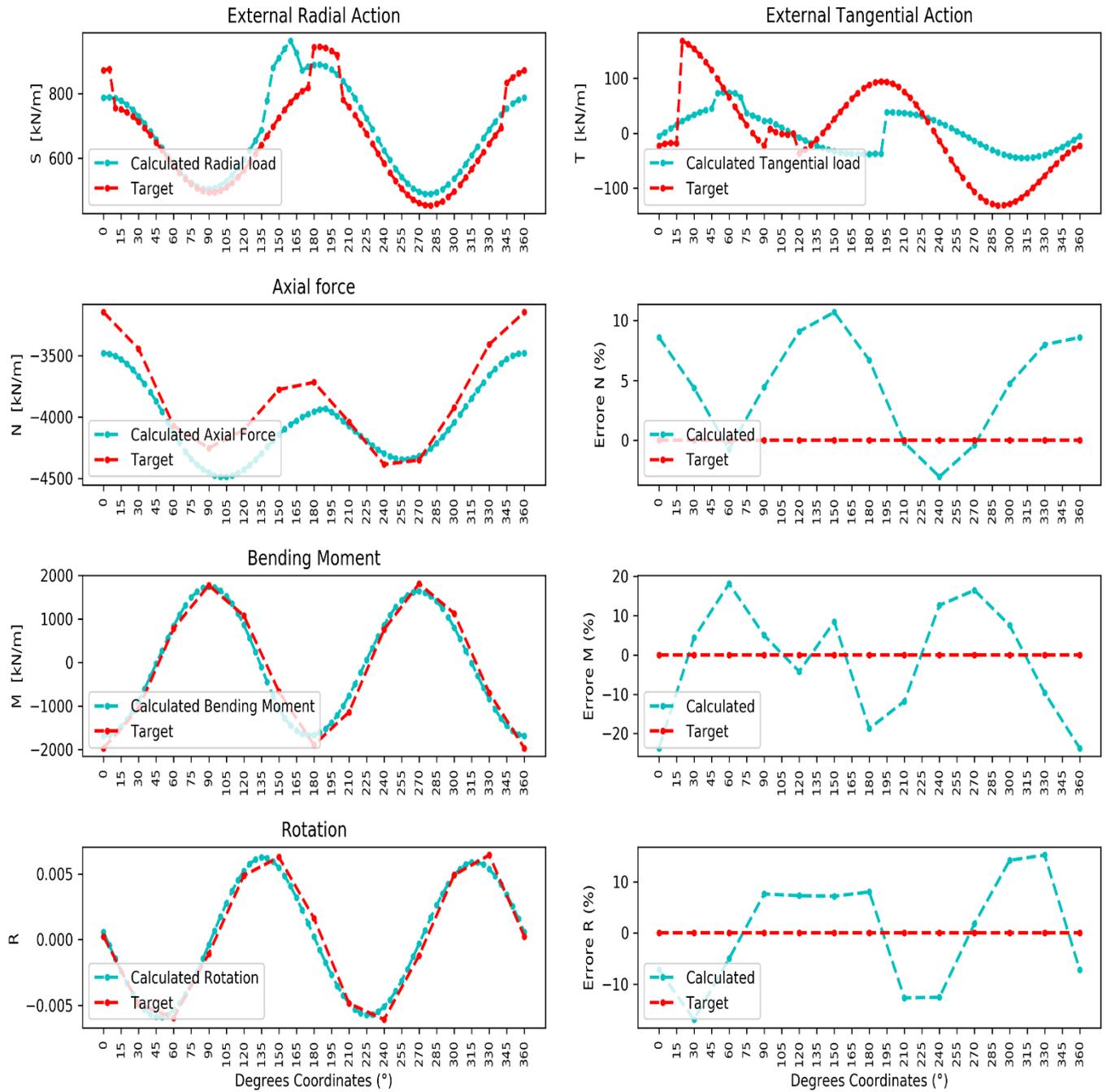


Figura 48 - Risultati della prima applicazione con 24 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variabilità della popolazione iniziale

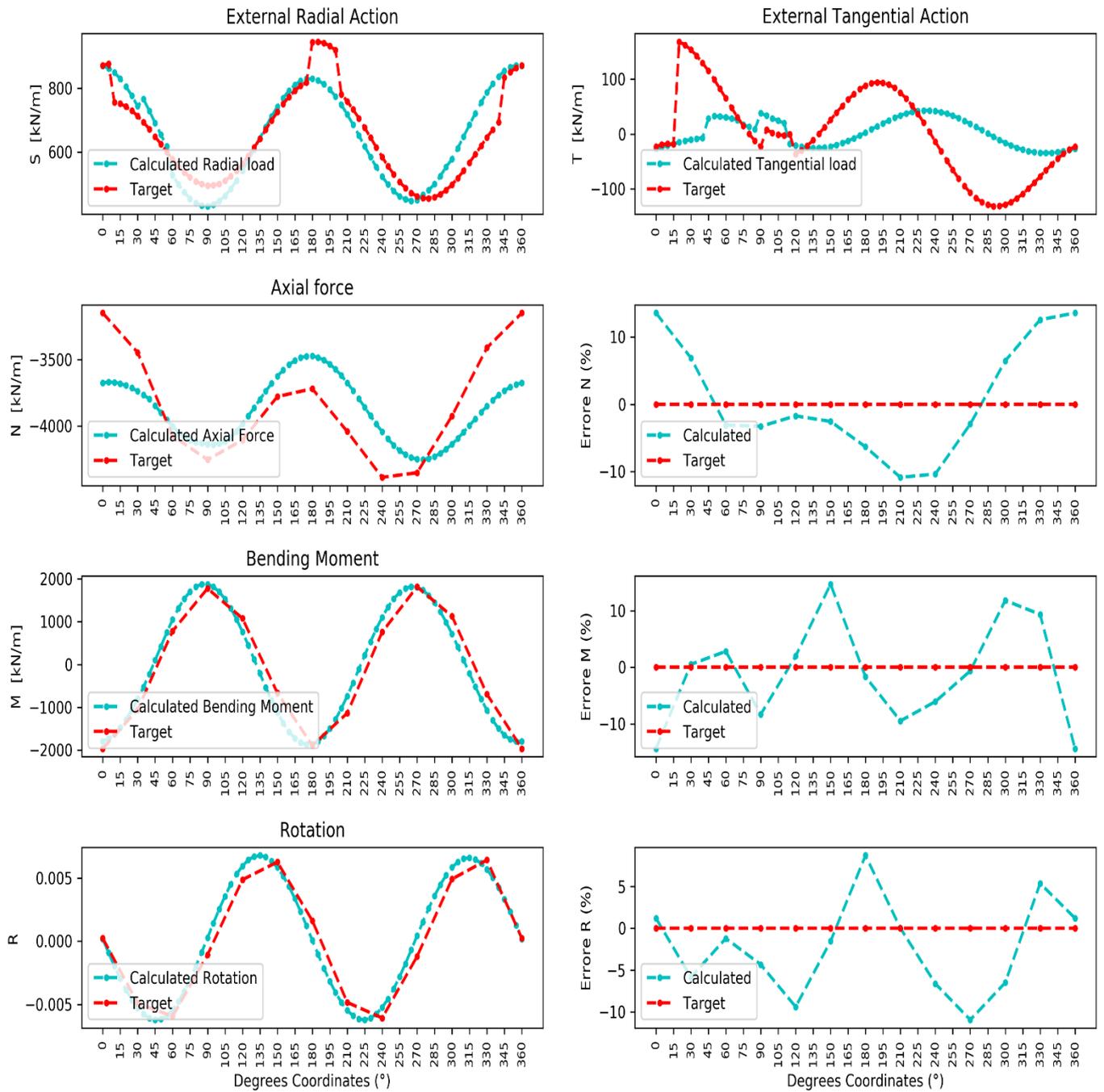


Figura 49 - Risultati della prima applicazione con 24 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variabilità della popolazione iniziale

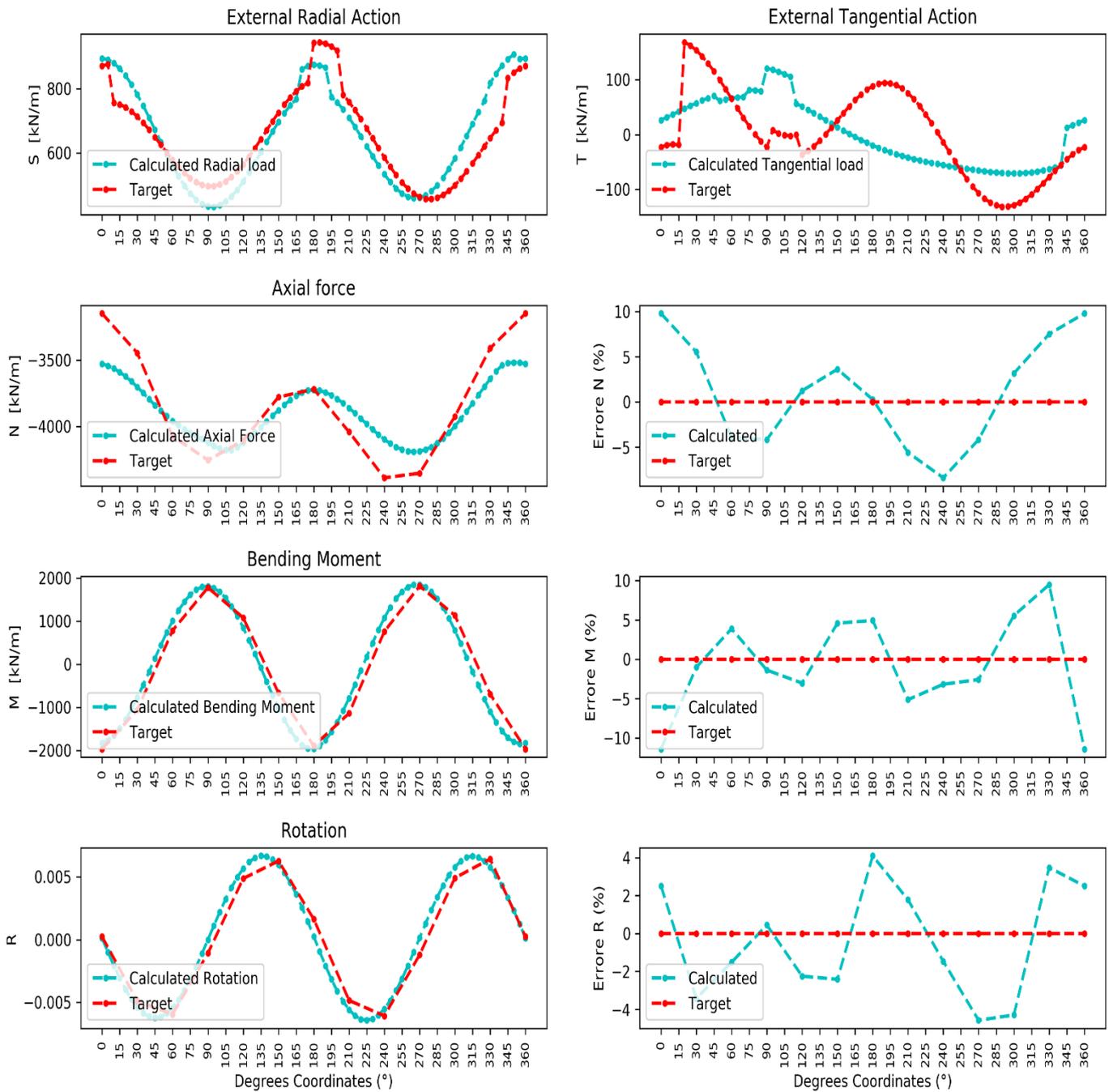


Figura 50 - Risultati della prima applicazione con 24 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variabilità della popolazione iniziale

4.2.2.2 Popolazione iniziale con 48 individui

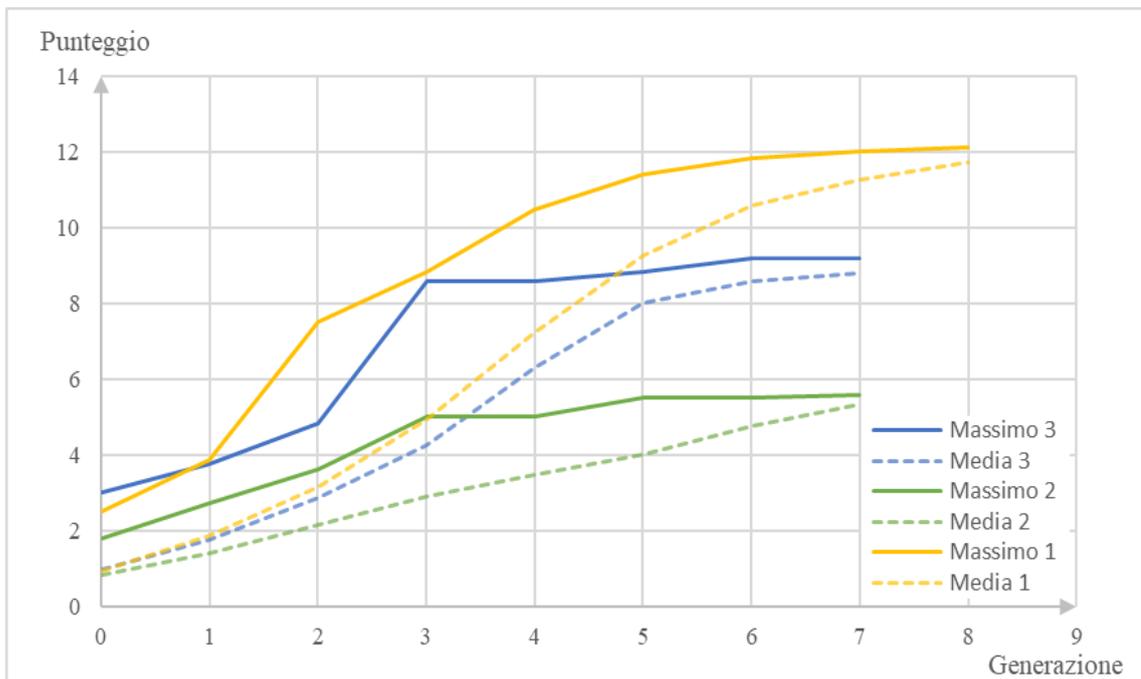


Figura 51 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 48 individui

L'incremento di punteggio si verifica anche in questo caso all'aumentare del numero degli individui e anche dalla loro diversità, ma a rimarcare l'incidenza della casualità nelle combinazioni, si verifica una forte differenza dei risultati in ogni esecuzione.

Dal confronto fra tutti gli output, è possibile notare che, a parità di errore medio della previsione sullo sforzo normale, il caso con 48 individui sviluppa un punteggio superiore perché ottiene un errore medio di rotazione e momento flettente inferiore rispetto al caso con 24 individui.

Queste due grandezze fisiche, essendo correlate, presenteranno sempre andamenti molto simili, dunque per come è stato progettato l'algoritmo, quando i carichi genereranno un migliore adattamento della rotazione e del momento flettente presenteranno punteggi sistematicamente maggiori rispetto ad un carico che individui bene il solo sforzo assiale.

I risultati del caso in esame sono riportati nelle pagine seguenti.

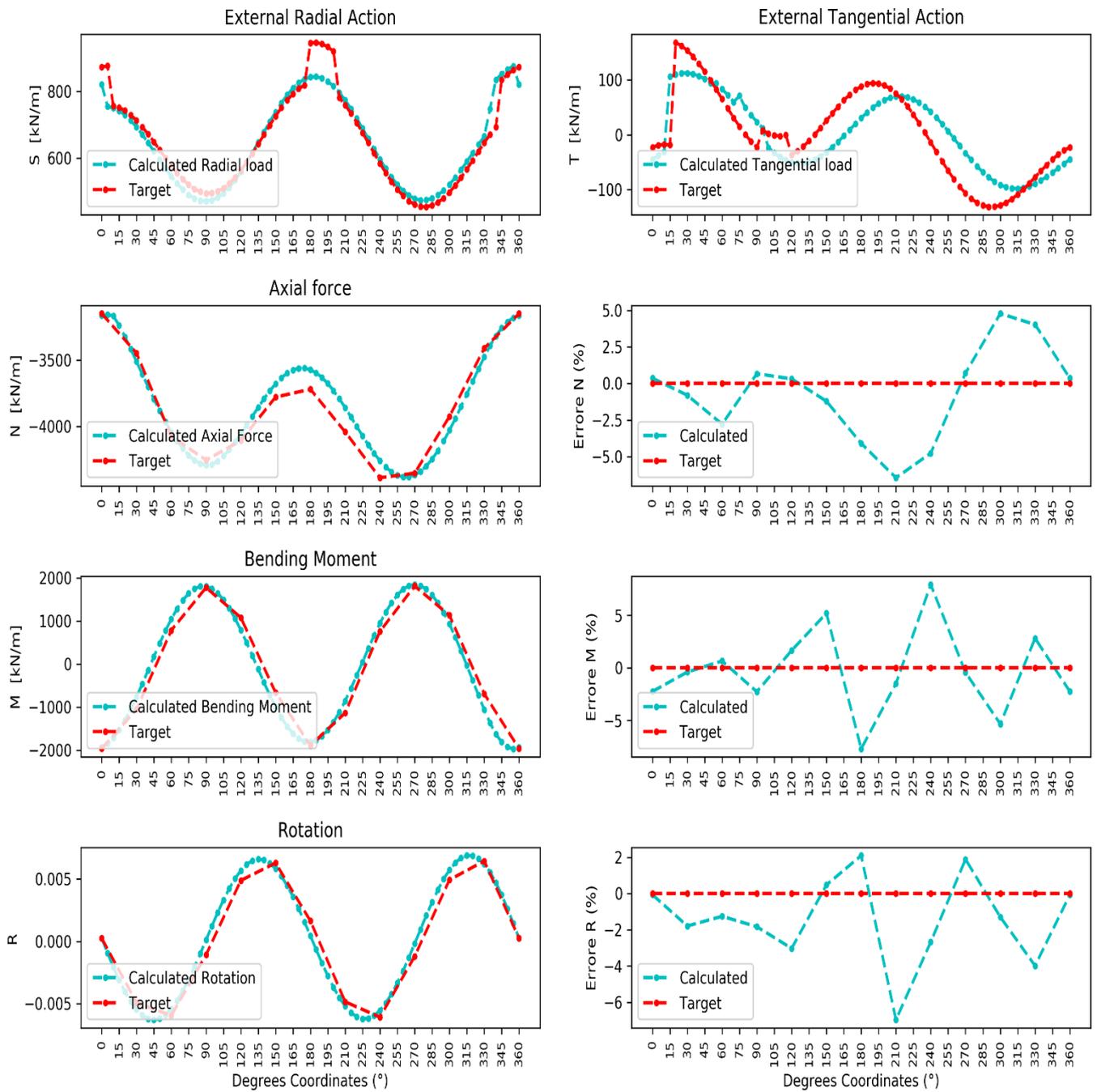


Figura 52 - Risultati della prima applicazione con 48 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variabilità della popolazione iniziale

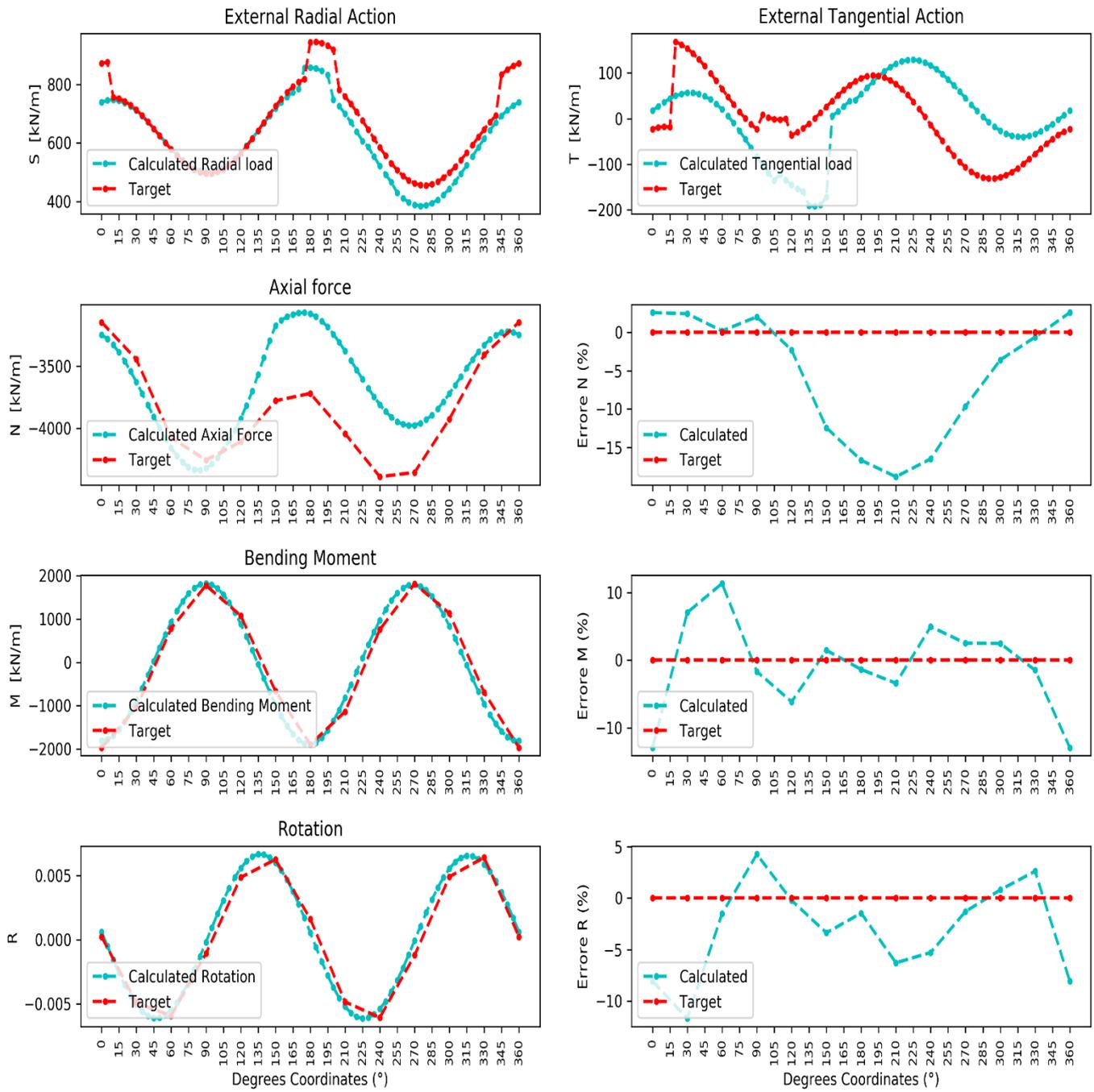


Figura 53 - Risultati della prima applicazione con 48 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variabilità della popolazione iniziale

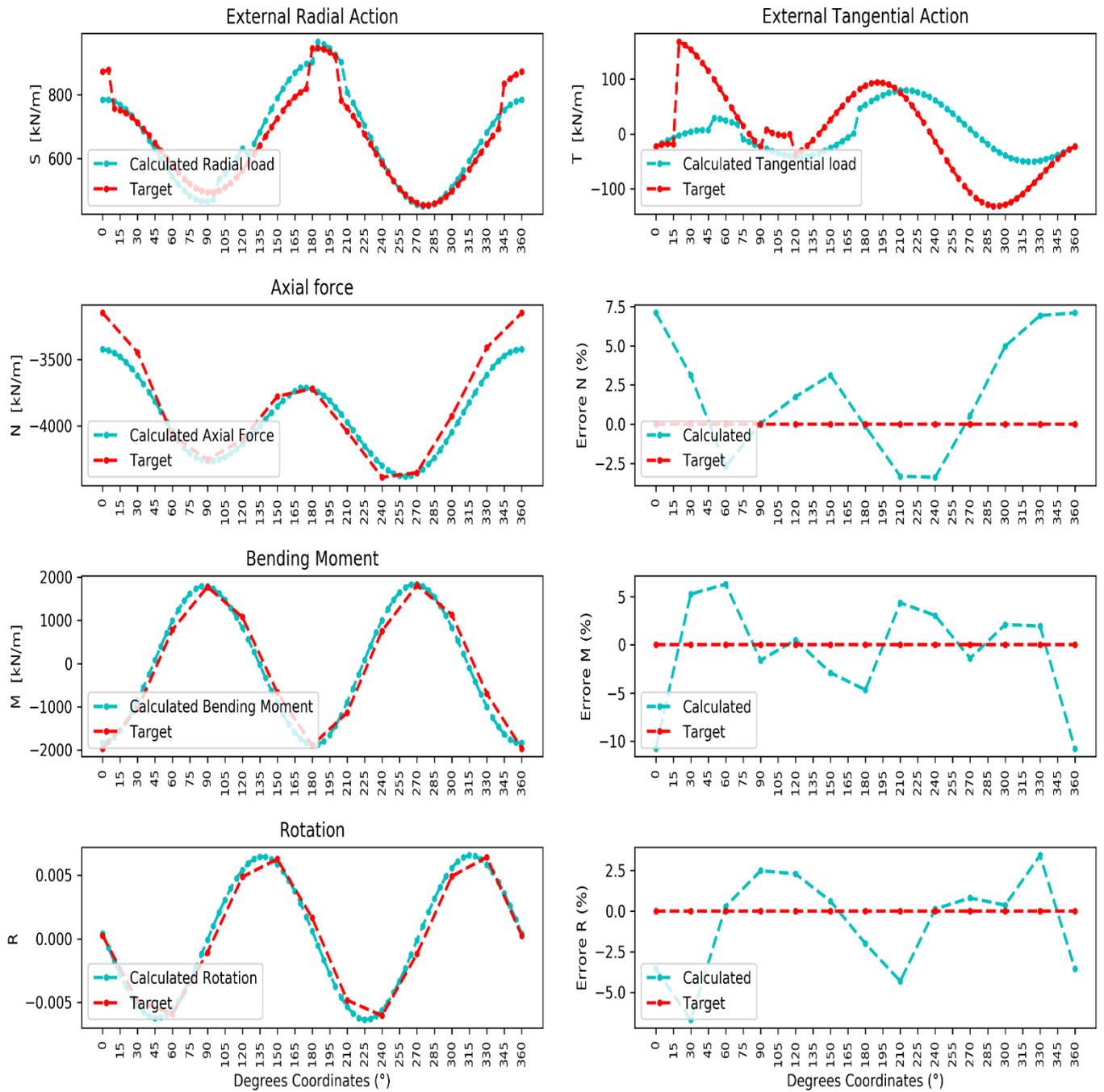


Figura 54 - Risultati della prima applicazione con 48 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variabilità della popolazione iniziale

4.2.2.3 Popolazione iniziale con 72 individui

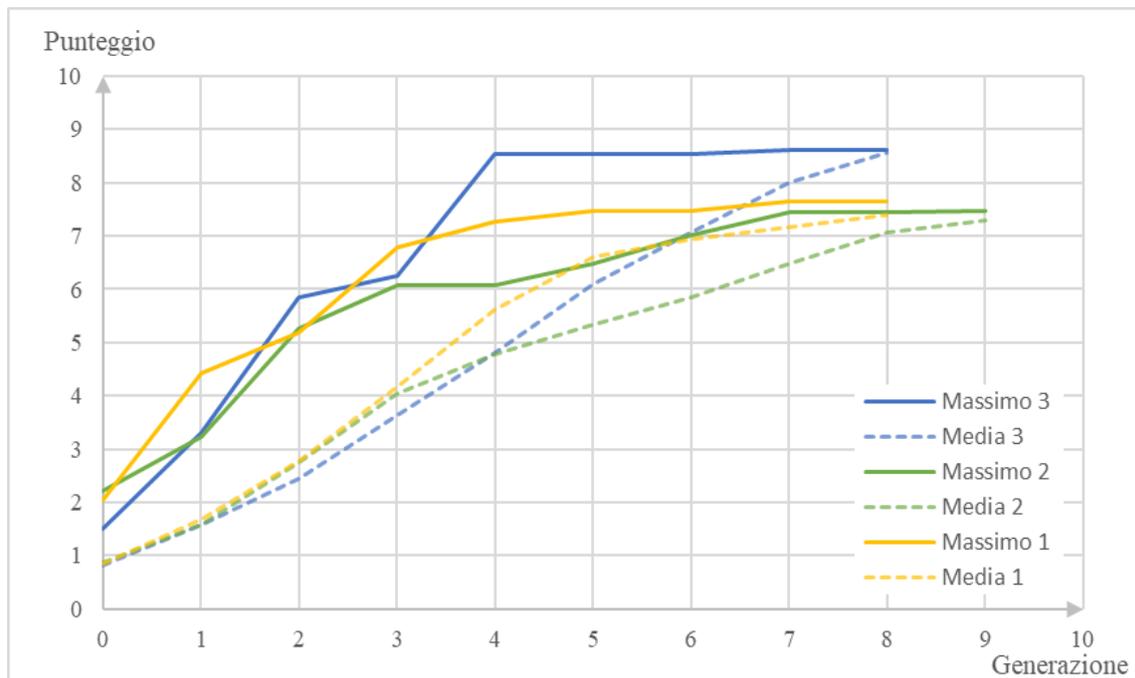


Figura 55 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 72 individui

Se si confronta questo caso con la convergenza dell'algoritmo con 48 individui (Fig. 51), riferiti sempre all'analisi della variabilità della popolazione, non si notano grandi miglioramenti, a testimonianza del fatto che, per via dei molti parametri liberi presi in considerazione, il semplice aumento del numero della popolazione e della loro eterogeneità non porta a risultati migliori, ma soltanto a grandi tempi di elaborazione. Il fatto di aver aumentato il numero degli individui ha soltanto portato ad una maggiore stabilità del risultato finale.

Anche dall'analisi dell'output dell'algoritmo attraverso le Fig. 56, Fig. 57 e Fig. 58, si evidenzia come non si riesce a migliorare significativamente la previsione del risultato rispetto al già ottimo risultato della popolazione con 48 individui. Dunque un aumento della popolazione, e dei tempi di elaborazione, non risulta essere sufficientemente giustificato. I risultati delle esecuzioni sono presentati di seguito

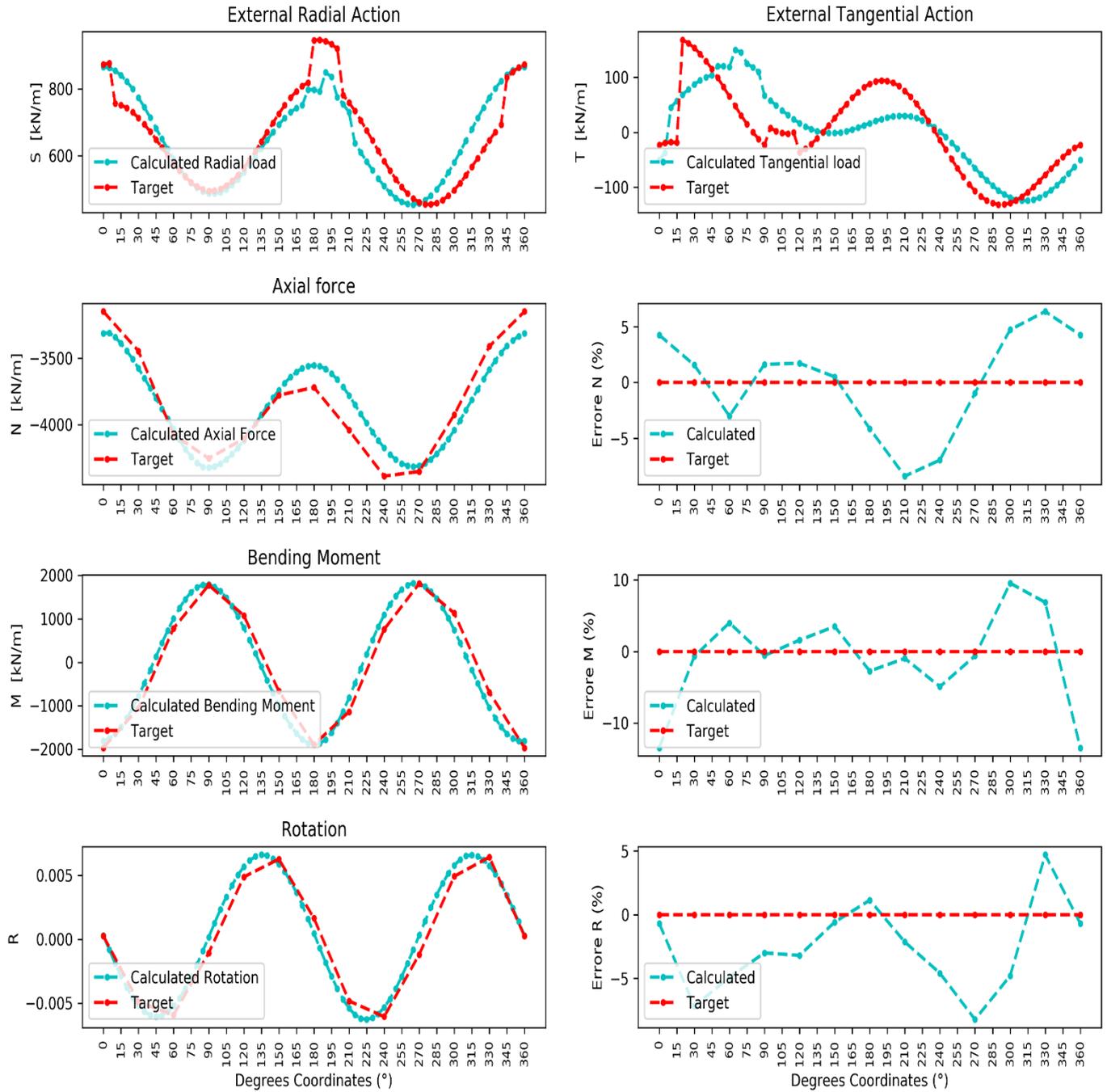


Figura 56 - Risultati della prima applicazione con 72 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variabilità della popolazione iniziale

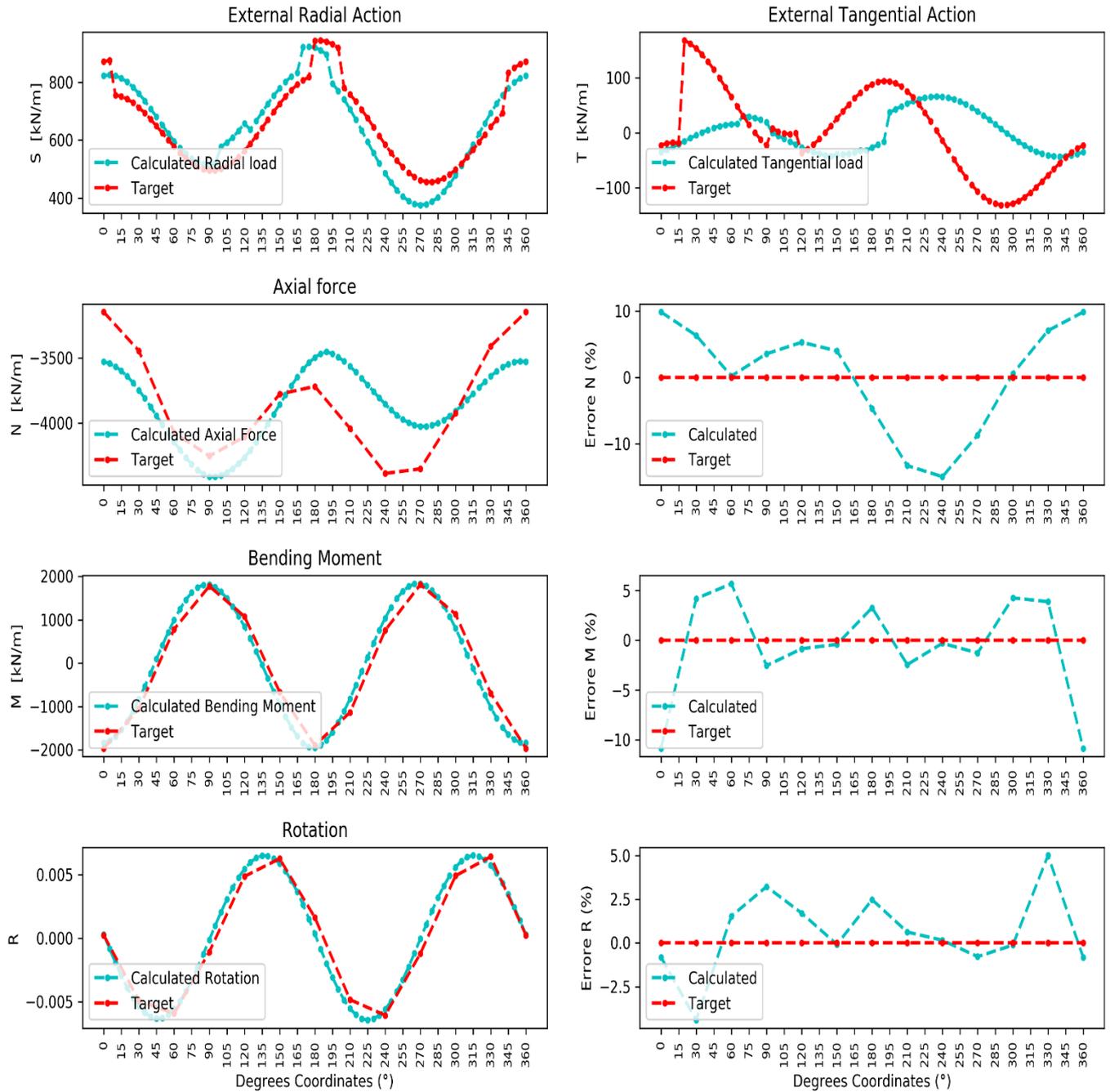


Figura 57 - Risultati della prima applicazione con 72 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variabilità della popolazione iniziale

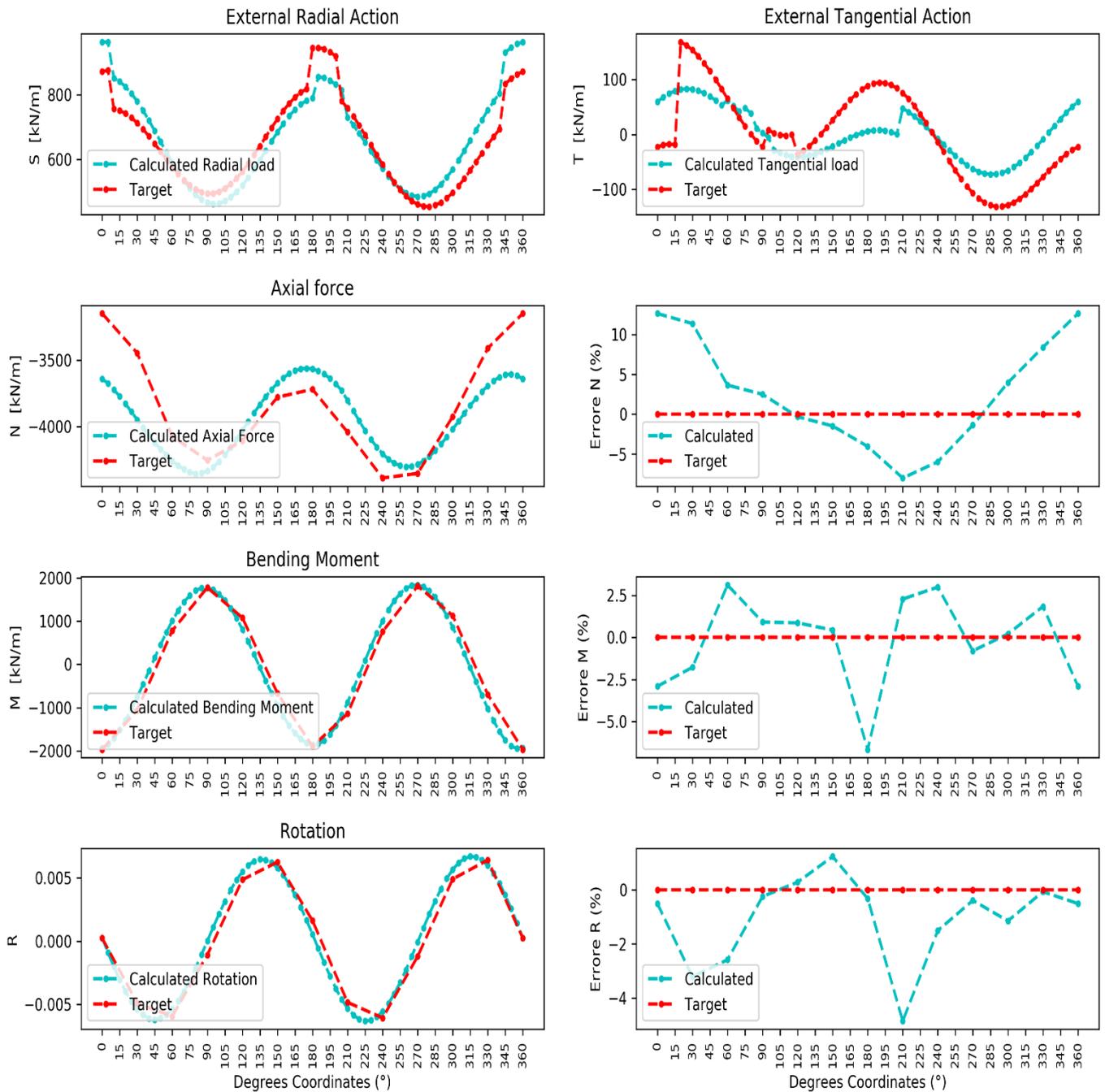


Figura 58- Risultati della prima applicazione con 72 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variabilità della popolazione iniziale

4.3 Seconda applicazione: Ovalizzazione e rotazione

Al fine di testare le capacità di convergenza del codice, l'algoritmo è stato impiegato in un'altra applicazione in cui il parametro di direzione è stato impostato con un'inclinazione di 60° rispetto all'orizzontale, ricercando volutamente un target più complesso che presenta le seguenti caratteristiche:

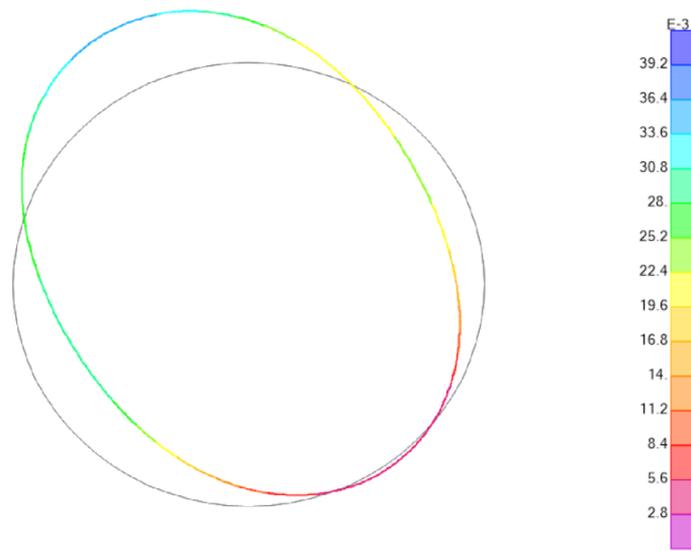


Figura 59 - Deformata target 2° applicazione

I carichi associati a questa deformata, e quindi gli obiettivi da raggiungere dall'algoritmo, saranno i seguenti:

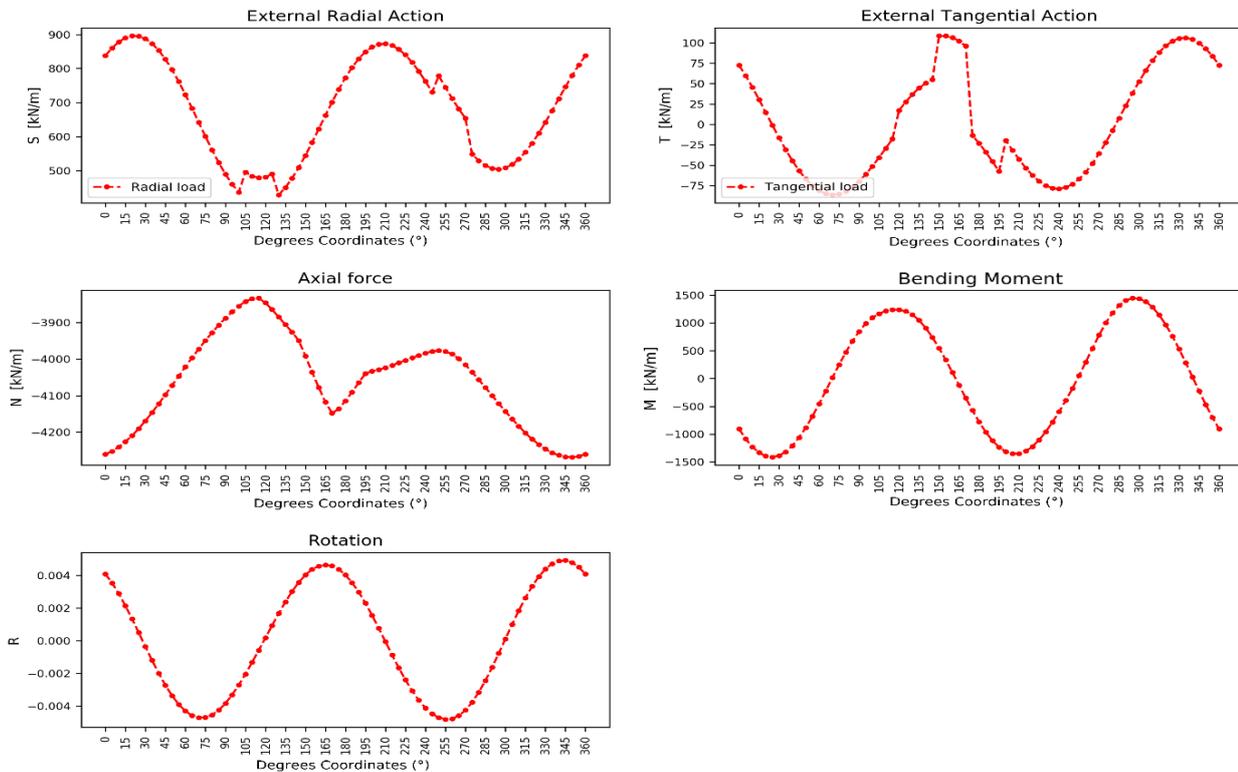


Figura 60 - Carichi, sollecitazioni e spostamenti 2° applicazione

4.3.1 Analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

Anche per questo caso è stata analizzata la convergenza dell'algoritmo al variare del numero della popolazione, considerando due incrementi gradualmente di 24 individui, partendo da una popolazione sempre di 24 individui sempre costante, ma diversa rispetto al caso precedente esposto nel paragrafo 4.2.1, poiché avendo impostato il parametro di direzione pari a 60° , i valori random dei parametri variabili saranno generati sulla base di range differenti.

I tre set di esecuzioni per ogni popolazione iniziale sono esposti di seguito.

4.3.1.1 Popolazione iniziale con 24 individui

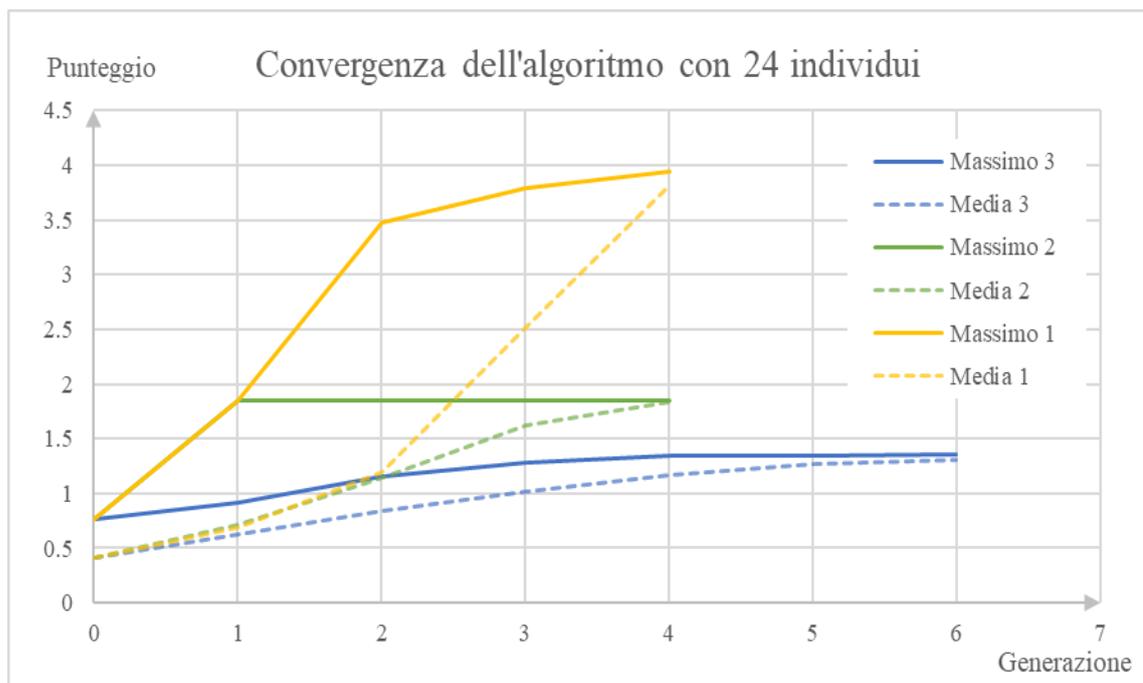


Figura 61 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 24 individui

Da quest'analisi sulla convergenza si evince subito che una popolazione fissa, con un numero così ridotto di individui non è in grado di arrivare ad una soluzione ottimale.

Tale evidenza è mostrata dal numero ridotto di generazioni raggiunte ad ogni esecuzione poiché infatti gli individui non hanno avuto il numero di sufficiente di combinazioni, e nemmeno l'eterogeneità, per sviluppare una soluzione accettabile.

Dall'analisi dell'output dell'algoritmo, osservando la Fig. 62 e la Fig. 63, è possibile notare la grande somiglianza delle due soluzioni. L'uguale predizione del carico tangenziale porta in entrambi i casi alla grande somiglianza delle due distribuzioni dello sforzo assiale, infatti gli errori su tale sollecitazione sono simili, invece la predizione della forma del carico radiale è anch'essa simile in entrambi i casi, tuttavia i coefficienti amplificativi legati a questi due individui sono diversi, il che comporta ad una diversa distribuzione di momenti e rotazioni nelle due esecuzioni e dunque anche a diversi valori di punteggio.

Le differenze fra momento e quindi anche rotazioni, portano dunque a grandi variazioni di punteggio, a parità di predizione di sforzo normale.

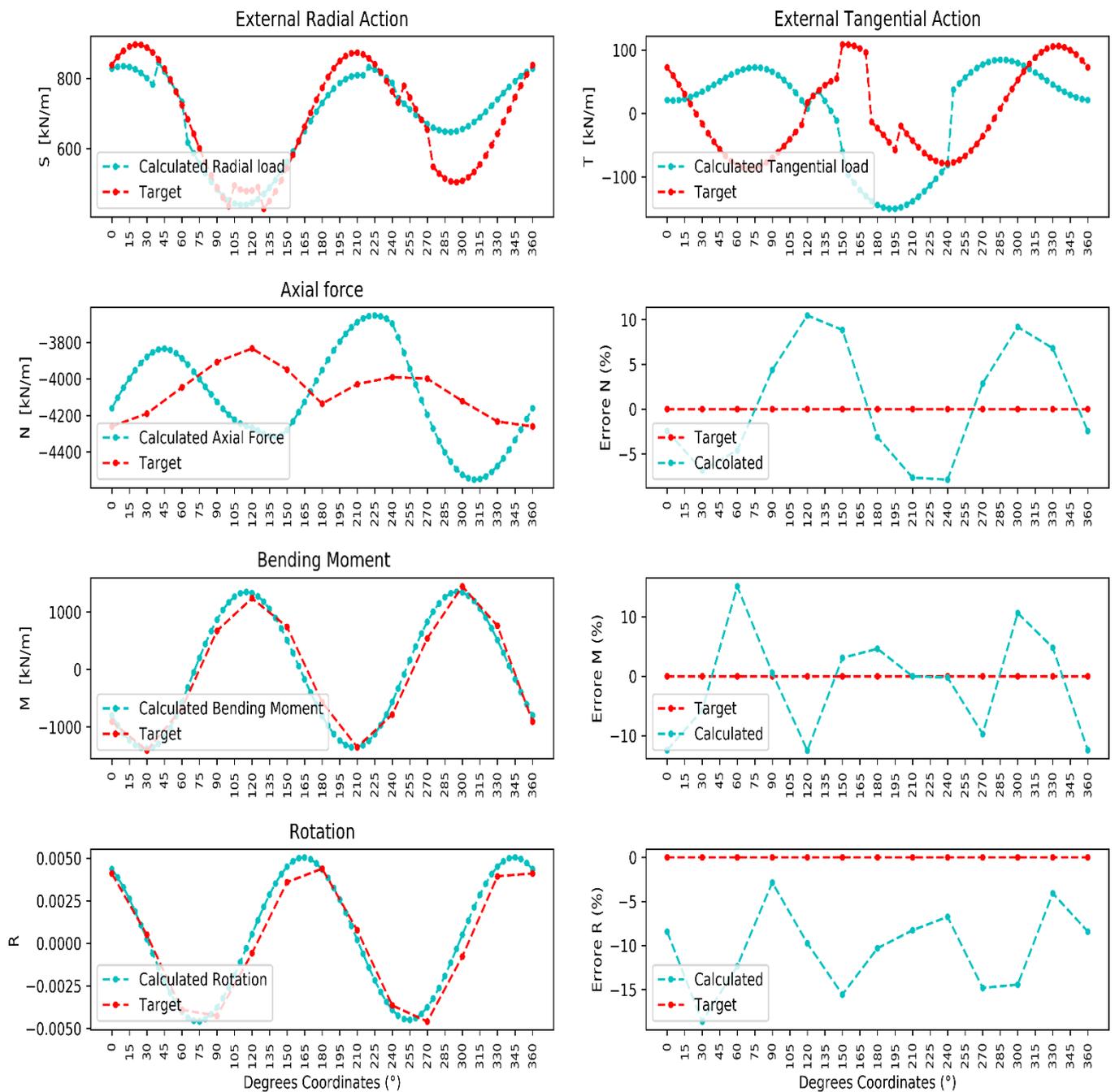


Figura 62 - Risultati della seconda applicazione con 24 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

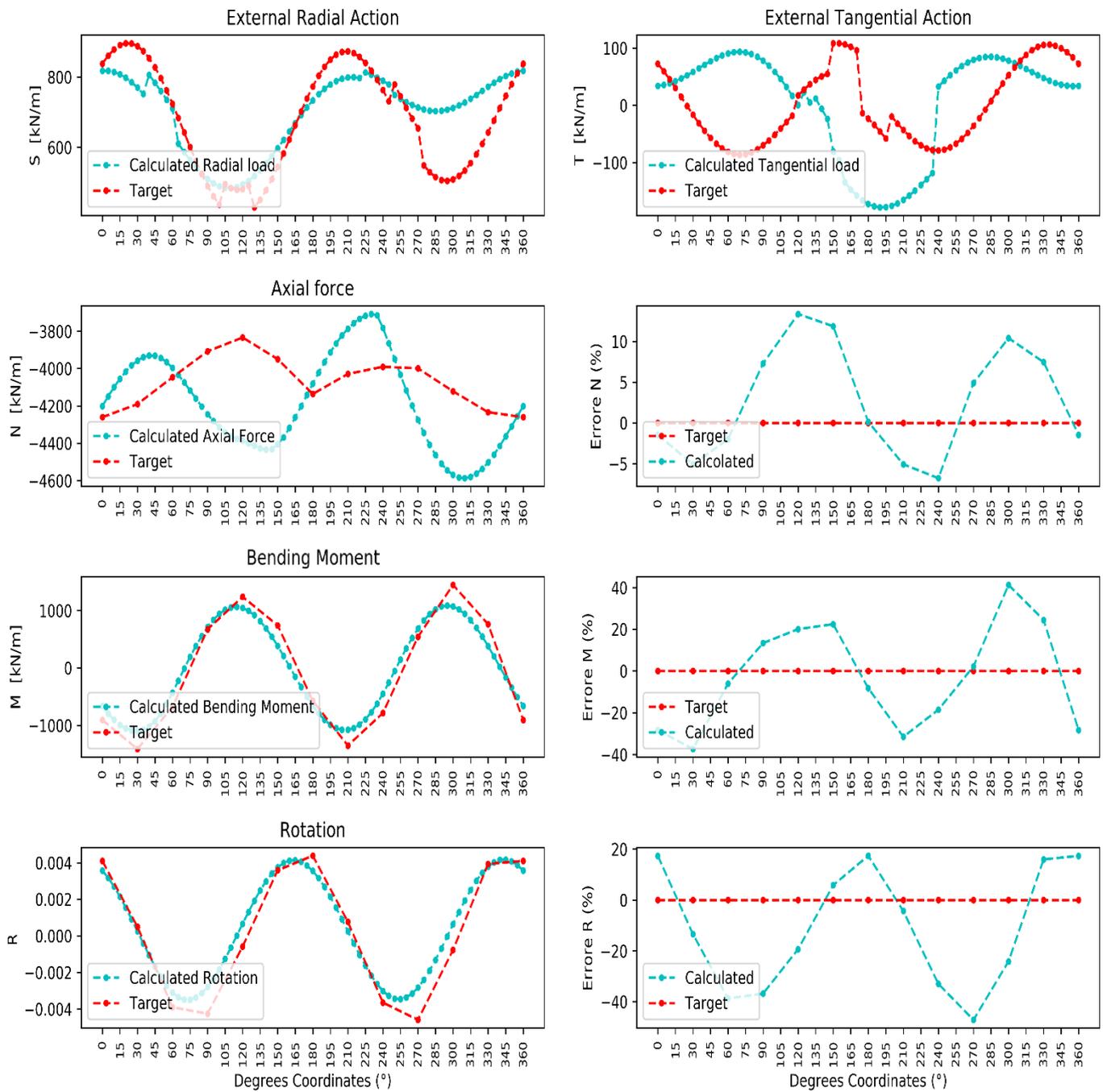


Figura 63 - Risultati della seconda applicazione con 24 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

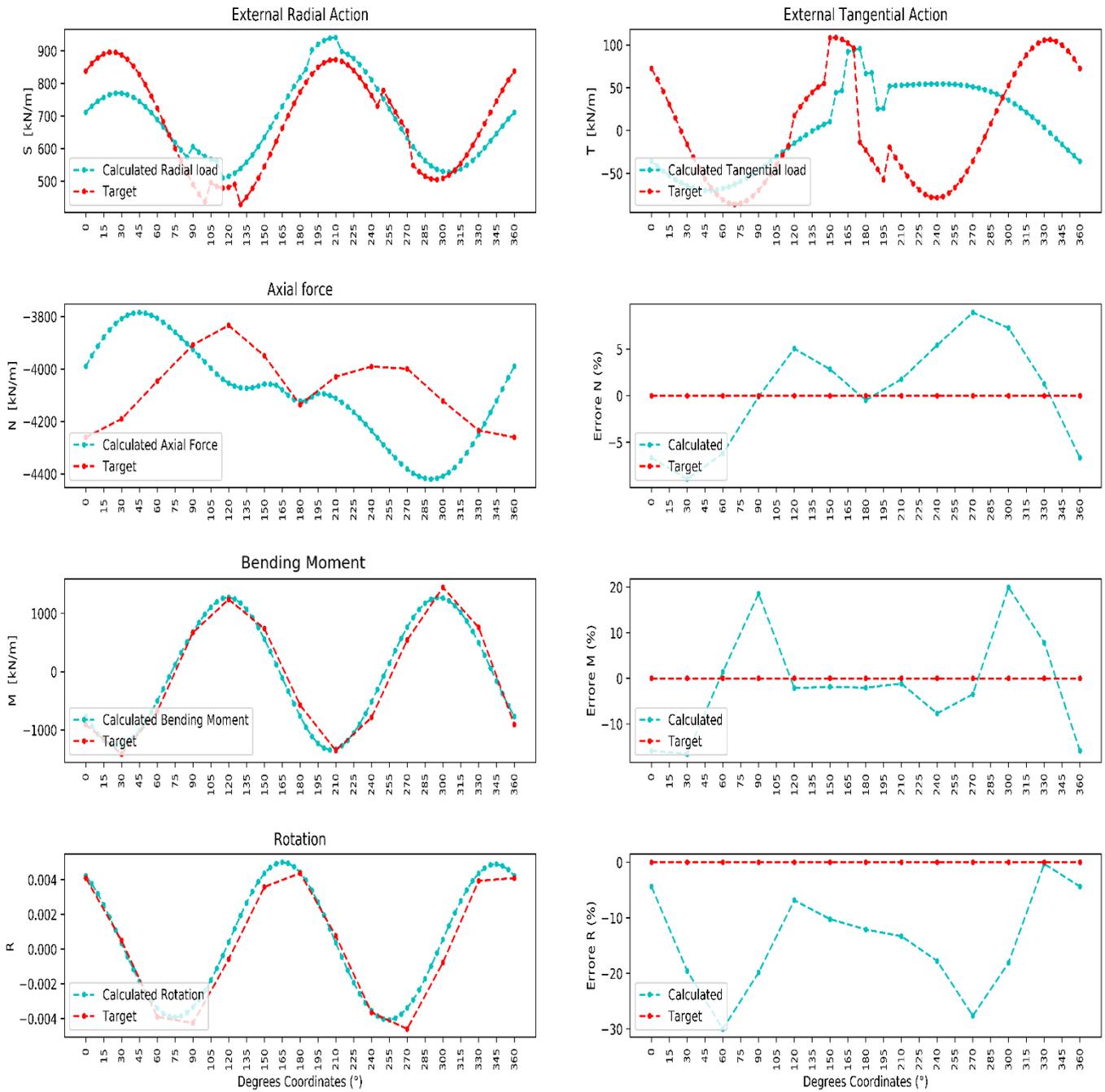


Figura 64 - Risultati della seconda applicazione con 24 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

4.3.1.2 Popolazione iniziale con 48 individui

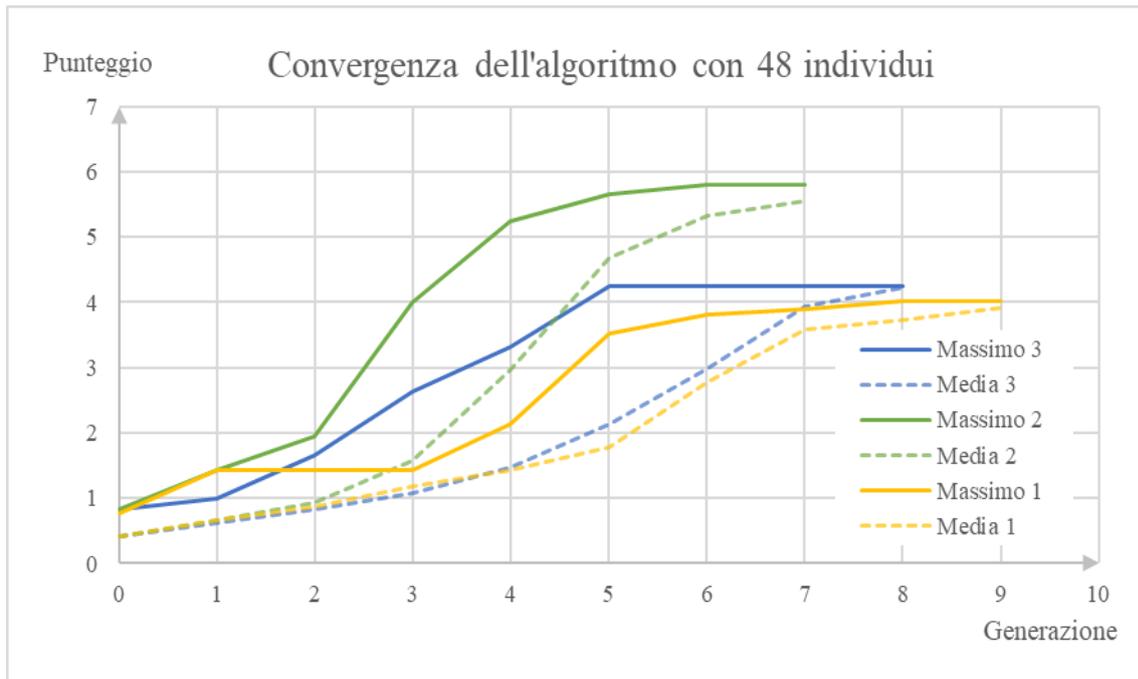


Figura 65 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 48 individui

Dall'analisi di questo caso, si può notare che la differenza rispetto al caso con 24 individui consiste nel raggiungimento di valori più alti, in generazioni successive a quelle raggiunte precedentemente. Questo aspetto è la dimostrazione di come più individui comportano più combinazioni, e quindi più probabilità di evoluzione nonostante il 50% della popolazione è comune al caso precedente.

Analizzando le Fig. 66, Fig. 67 e Fig. 68, si può notare come alcune delle forme di carico radiale e tangenziale, siano comuni al caso di 24 individui, dunque l'incremento della popolazione ha portato un aumento di punteggio dovuto non alla bontà dei nuovi individui ma alla loro eterogeneità.

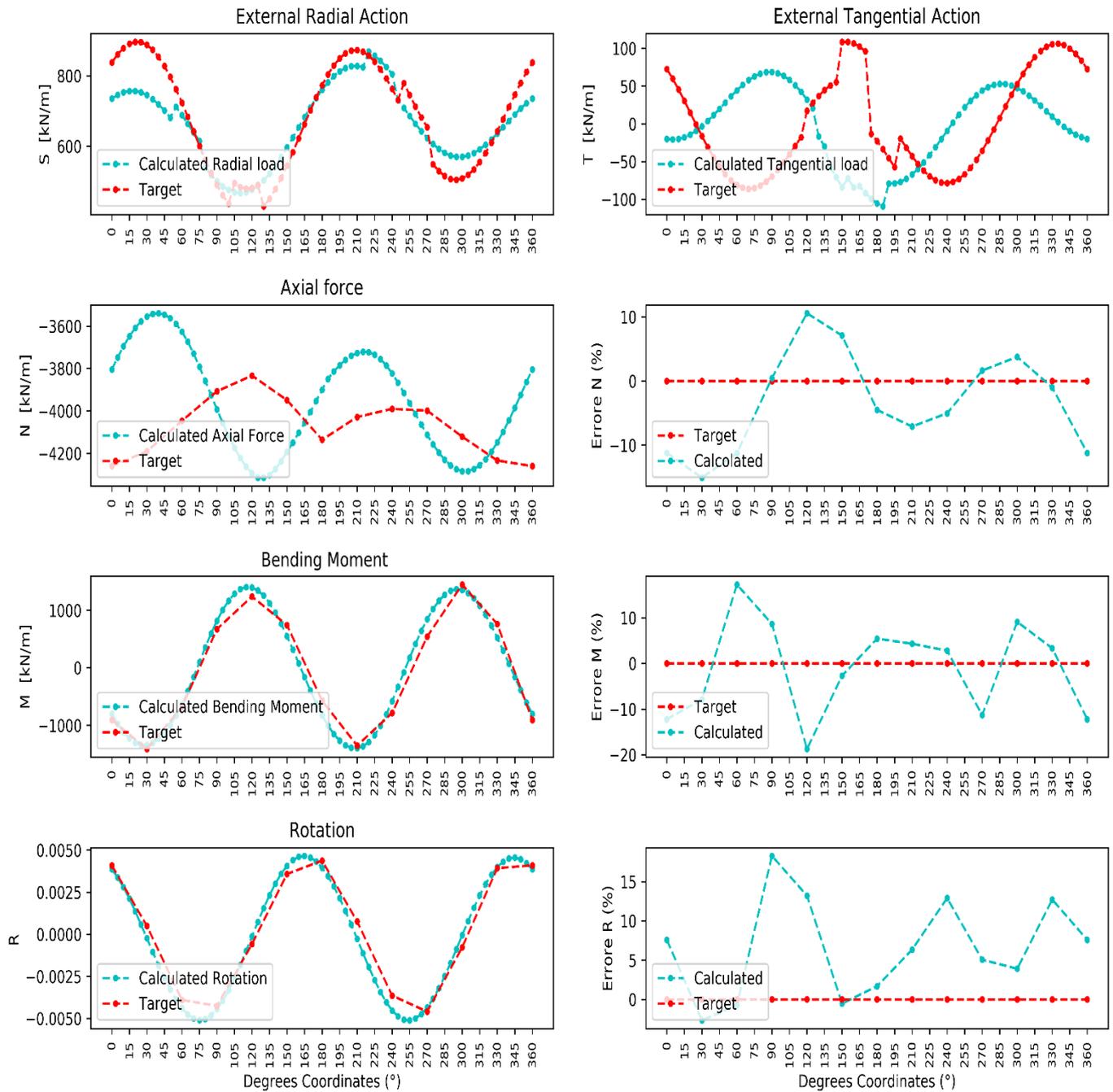


Figura 66 - Risultati della seconda applicazione con 48 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

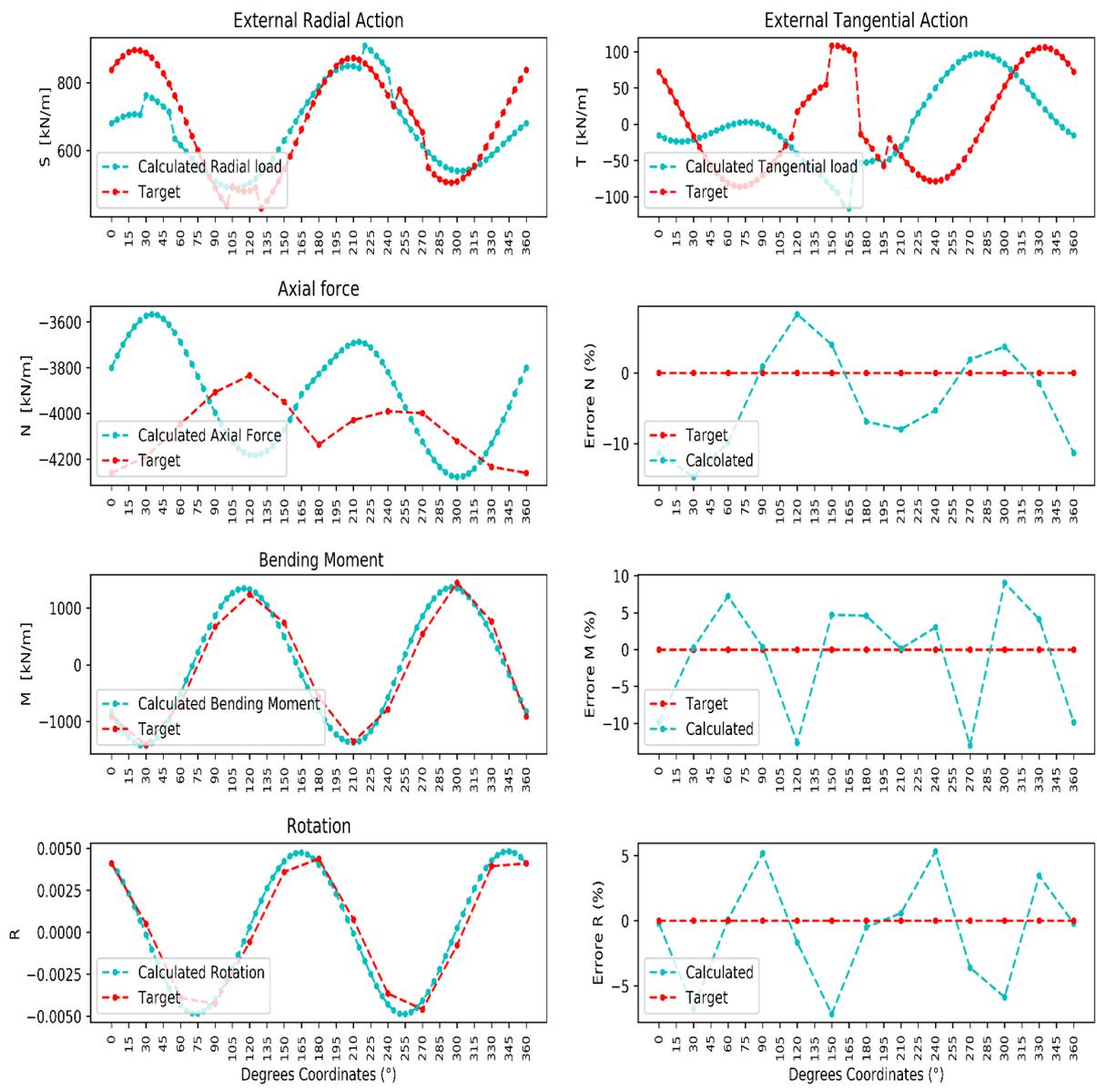


Figura 67 - Risultati della seconda applicazione con 48 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

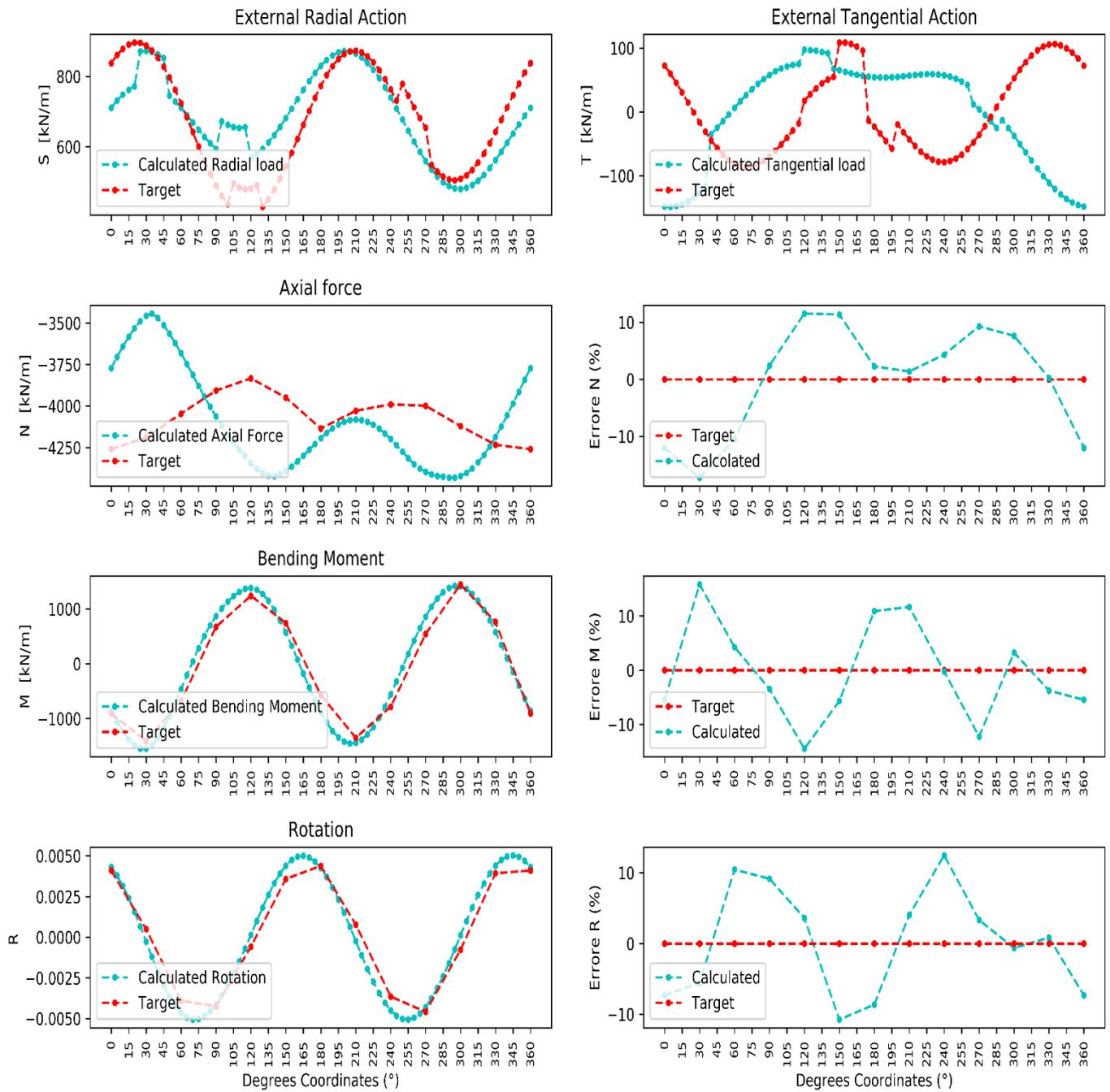


Figura 68 - Risultati della seconda applicazione con 48 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

4.3.1.3 Popolazione iniziale con 72 individui

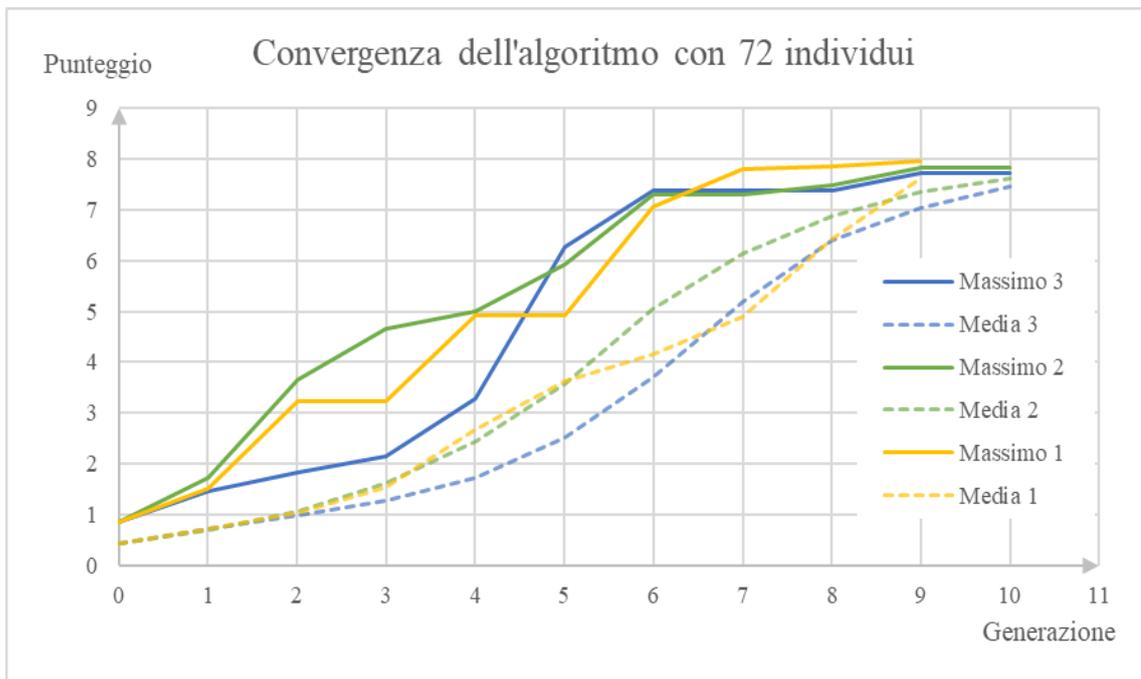


Figura 69 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 48 individui

L'ulteriore incremento della popolazione ha portato un netto e significativo miglioramento dei risultati, con un'evoluzione di tipo cumulativo. Il punteggio raggiunto è molto simile in ogni esecuzione svolta, in particolare si sottolinea che l'esecuzione numero 3, anche se non è quella che ha prodotto il punteggio maggiore, risulta essere l'unica che, alla decima generazione, non presentava una convergenza assoluta, cioè non si è verificato il raggiungimento della soglia di interruzione dell'algoritmo, impostata preliminarmente come il rapporto fra la media dei punteggi della popolazione e il massimo della popolazione stessa. Ciò implica che la generazione, conservava ancora un minimo livello di eterogeneità che, con le combinazioni dettate dalla roulette wheel, avrebbero potenzialmente creato un individuo a punteggio maggiore del massimo registrato fino a quel momento.

Confrontando gli output dell'algoritmo, è possibile osservare un ulteriore affinamento del risultato, indicato anche da un maggior valore di punteggio, ma si denota ancora la forte differenza che esiste fra le forme di carico, che tendono a convergere ad una forma "equivalente" a quella reale.

Si riportano di seguito i risultati delle esecuzioni.

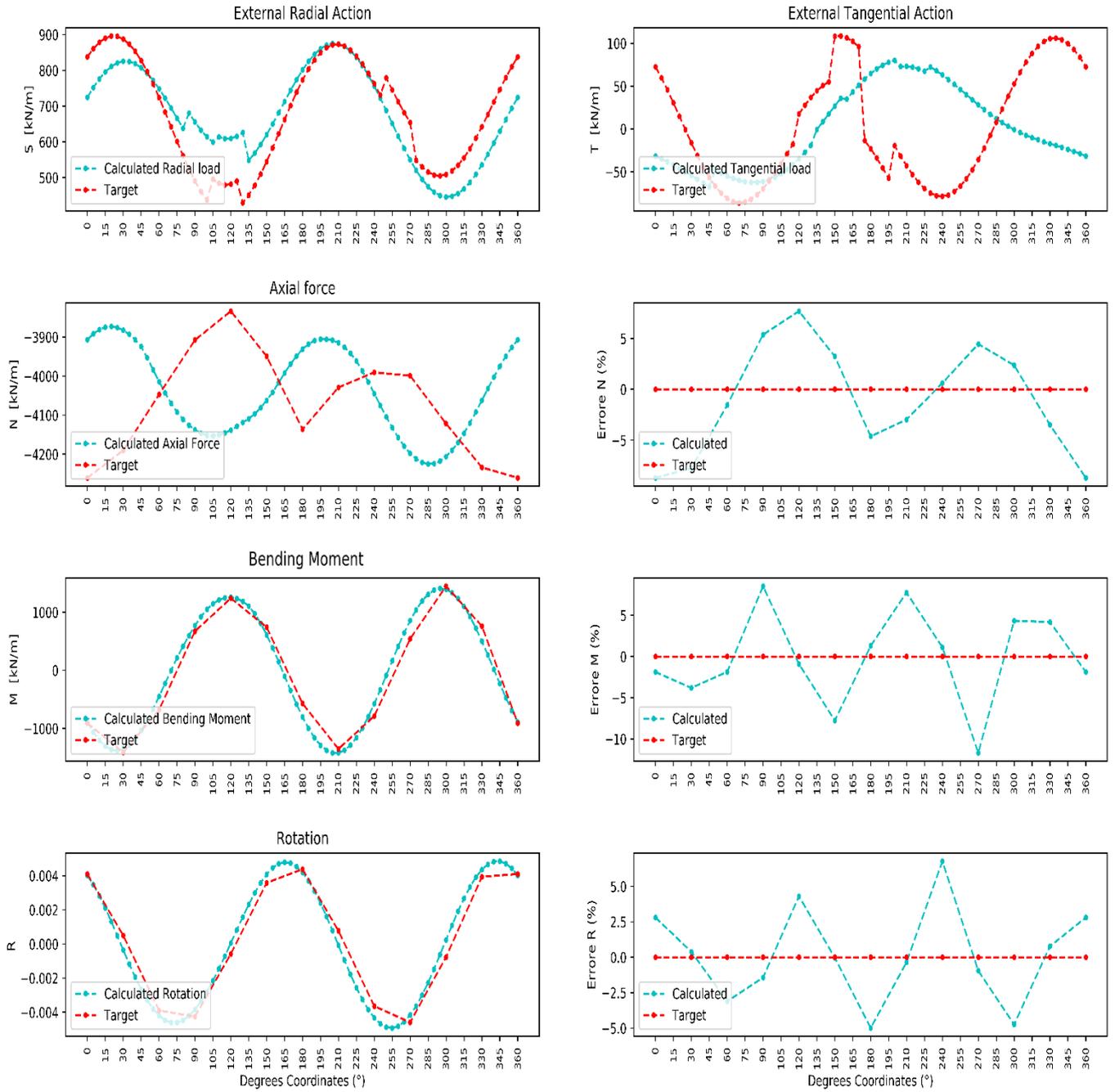


Figura 70 - Risultati della seconda applicazione con 72 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

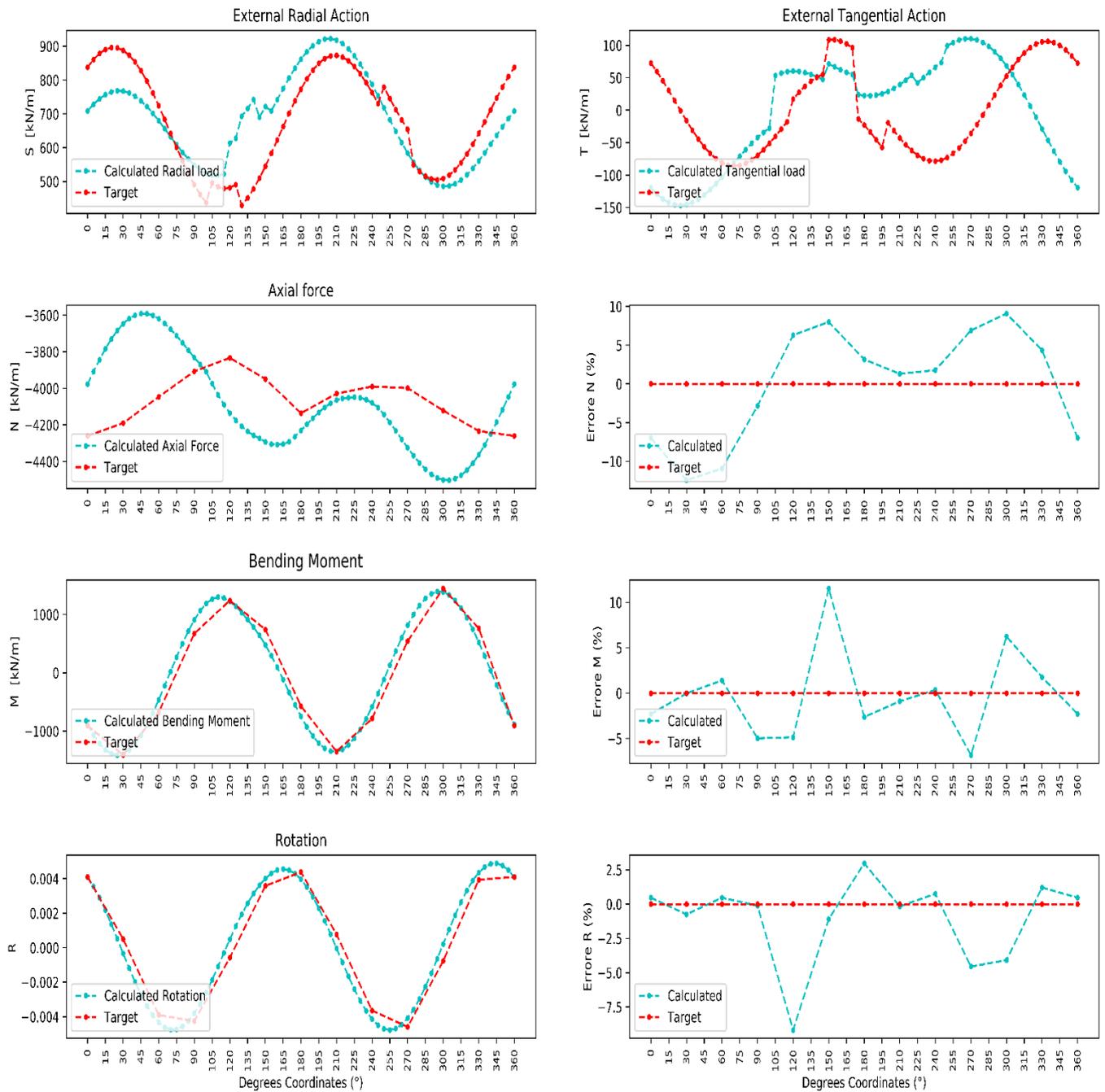


Figura 71 - Risultati della seconda applicazione con 72 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

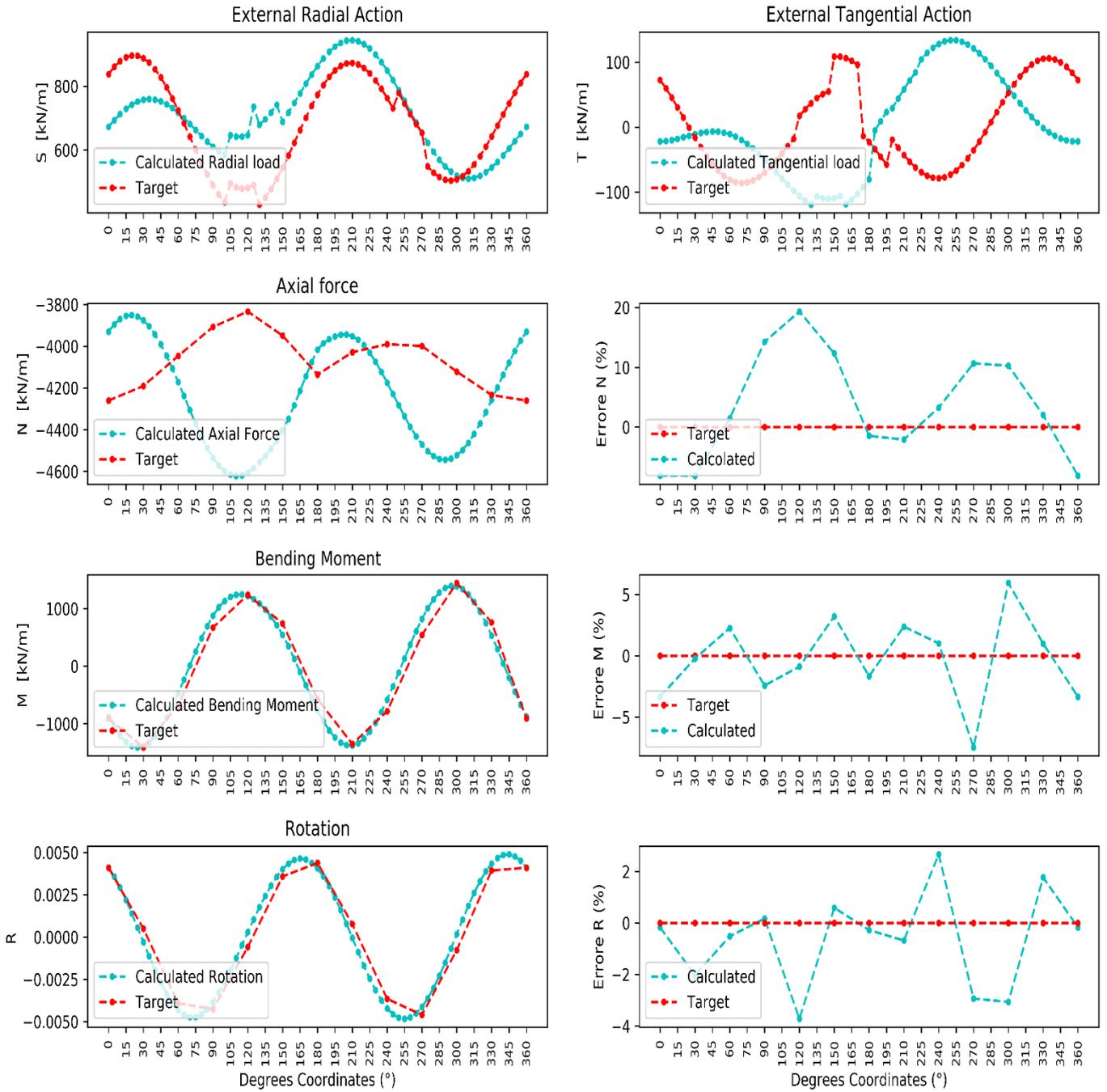


Figura 72- Risultati della seconda applicazione con 72 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione del numero degli individui della popolazione iniziale

4.3.2 Analisi della variabilità della popolazione iniziale

Fissare una popolazione iniziale costante in tutte le esecuzioni, può rivelarsi utile per evidenziare aspetti associati alle variabilità delle combinazioni e dunque l'influenza del numero degli individui presenti nelle popolazioni; tuttavia quando esistono tanti parametri variabili, è probabile che non si sviluppi in esso un individuo che possa costituire una già buona soluzione finale, dunque il risultato dipenderà esclusivamente dalle combinazioni casuali che si andranno a creare.

Anche per questo target sono state provate una serie di esecuzioni al variare del numero degli individui, considerando popolazioni sempre variabili fra una popolazione e l'altra al fine di studiare, anche in queste condizioni, l'importanza dell'eterogeneità.

Sono state analizzate anche in questo caso set di 24, 48 e 72 individui per popolazione e i risultati verranno esposti di seguito.

4.3.2.1 Popolazione iniziale con 24 individui

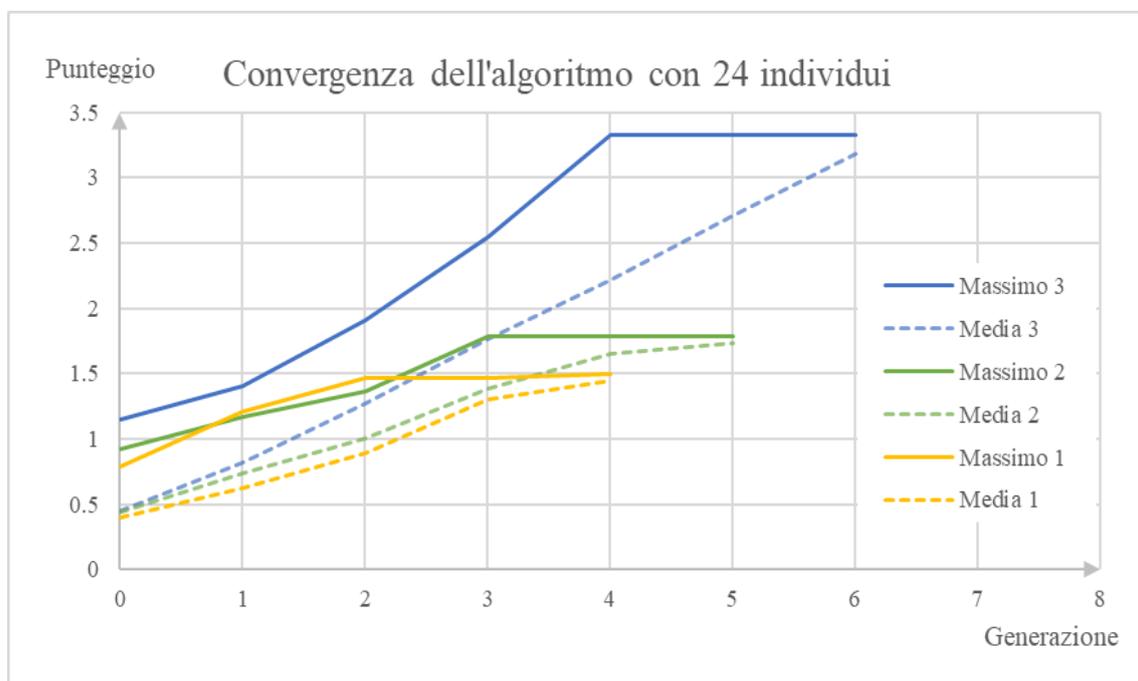


Figura 73 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 24 individui

Il comportamento dell'algoritmo con popolazioni variabili da 24 individui è speculare al caso di popolazione costante, dunque non presenta adeguate previsioni su carichi e sollecitazioni. Un ulteriore fattore in comune con il caso di popolazione costante nelle diverse esecuzioni, è il basso numero di generazioni necessarie per raggiungere la convergenza, a dimostrazione del fatto che il numero degli individui, oltre la loro eterogeneità, incide notevolmente sul risultato finale.

Anche in questo caso è presente un'esecuzione con punteggio maggiore rispetto alle altre, tuttavia è una soluzione non idonea, come è possibile vedere negli output esposti di seguito.

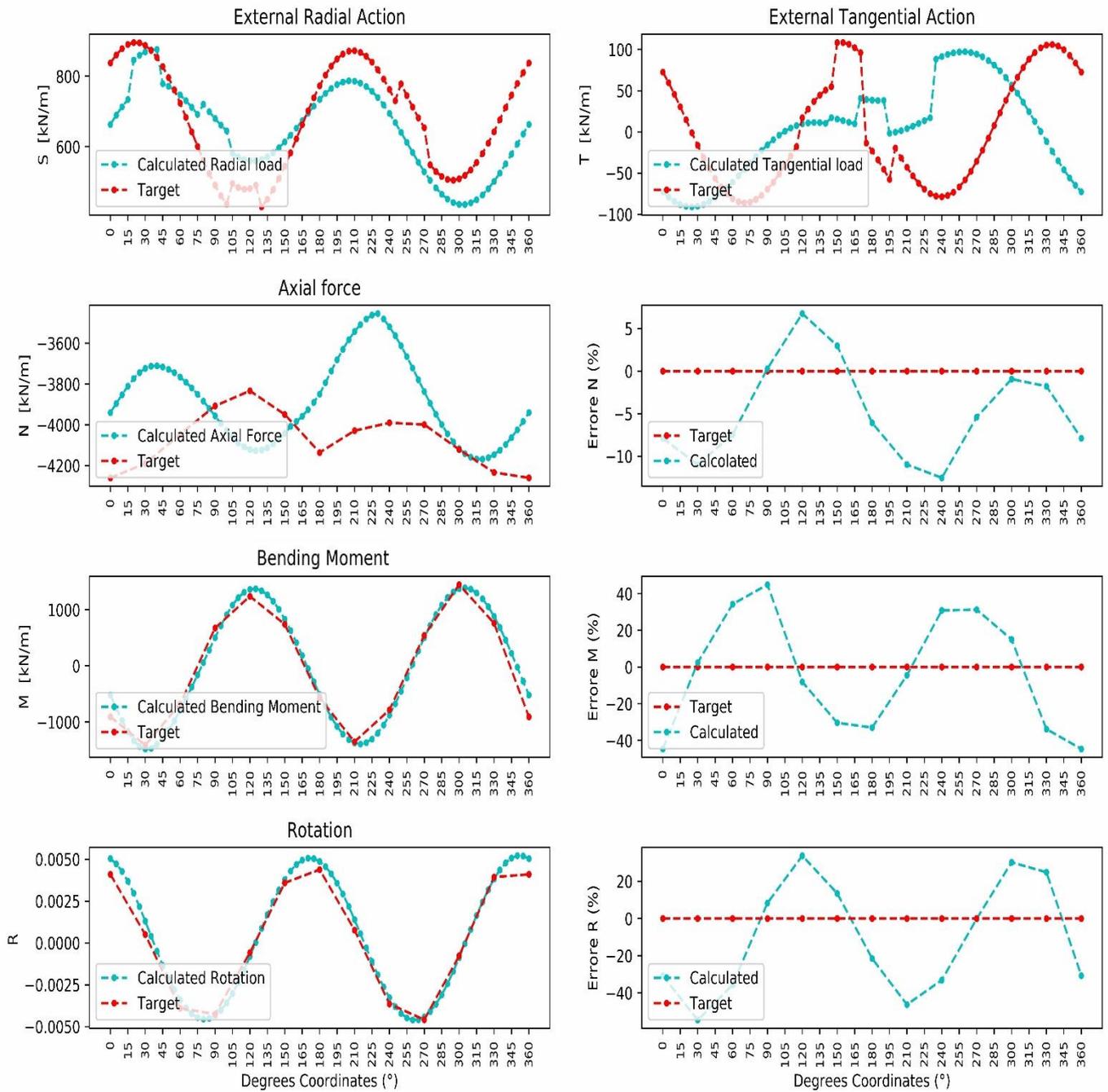


Figura 74 - Risultati della seconda applicazione con 24 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione della variabilità e del numero della popolazione iniziale

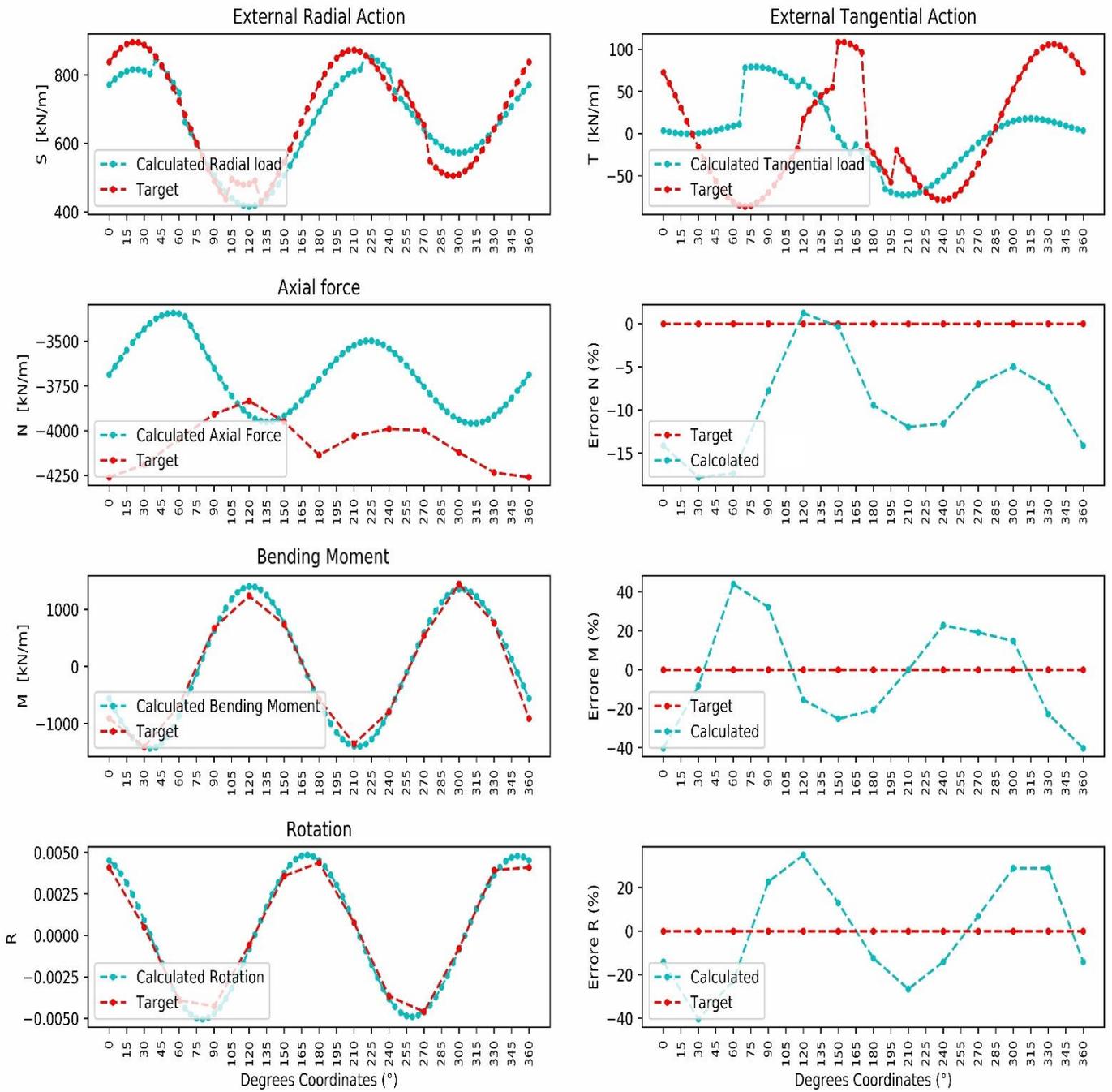


Figura 75 - Risultati della seconda applicazione con 24 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione della variabilità e del numero della popolazione iniziale

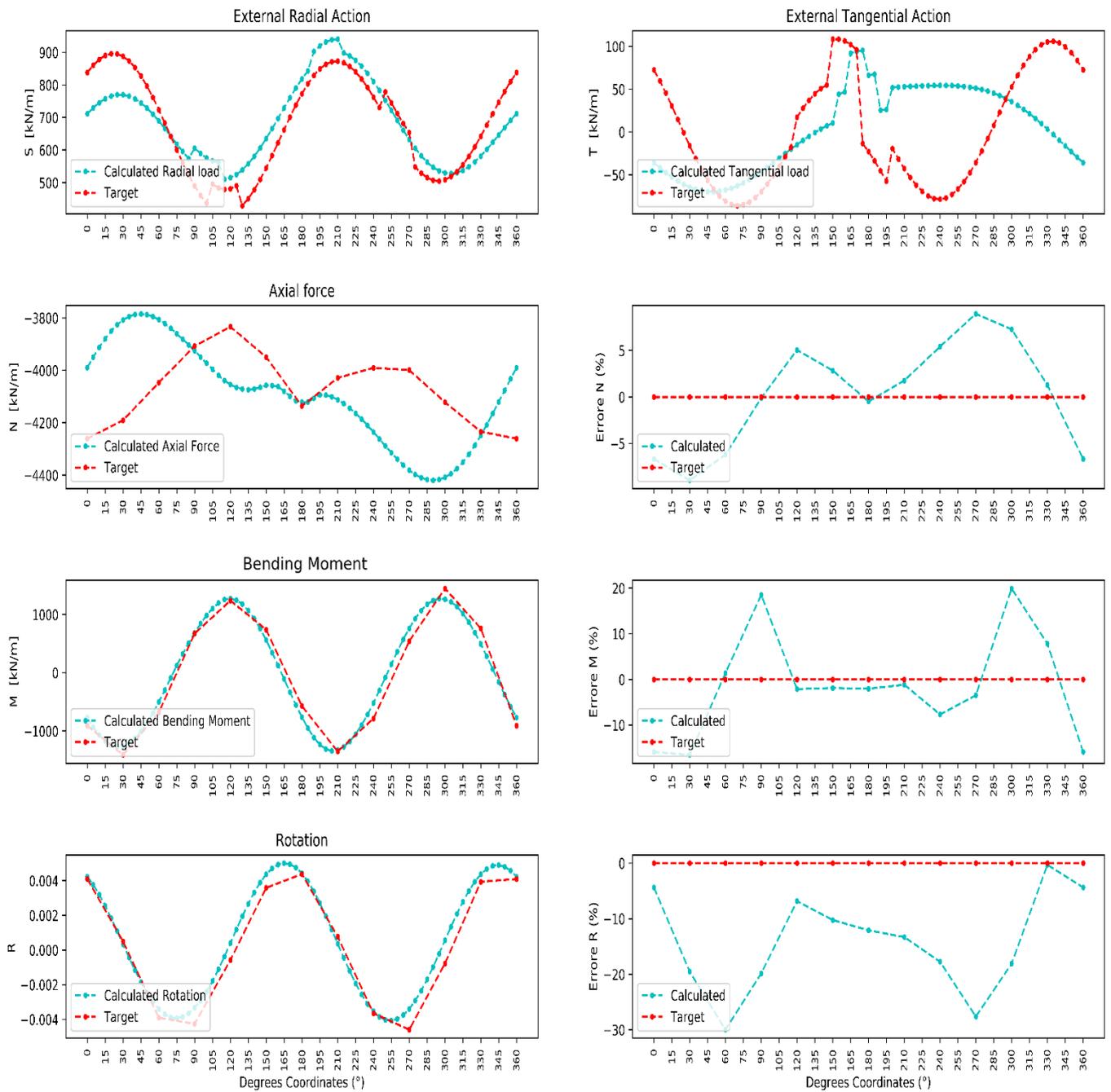


Figura 76 - Risultati della seconda applicazione con 24 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione della variabilità e del numero della popolazione iniziale

4.3.2.2 Popolazione iniziale con 48 individui

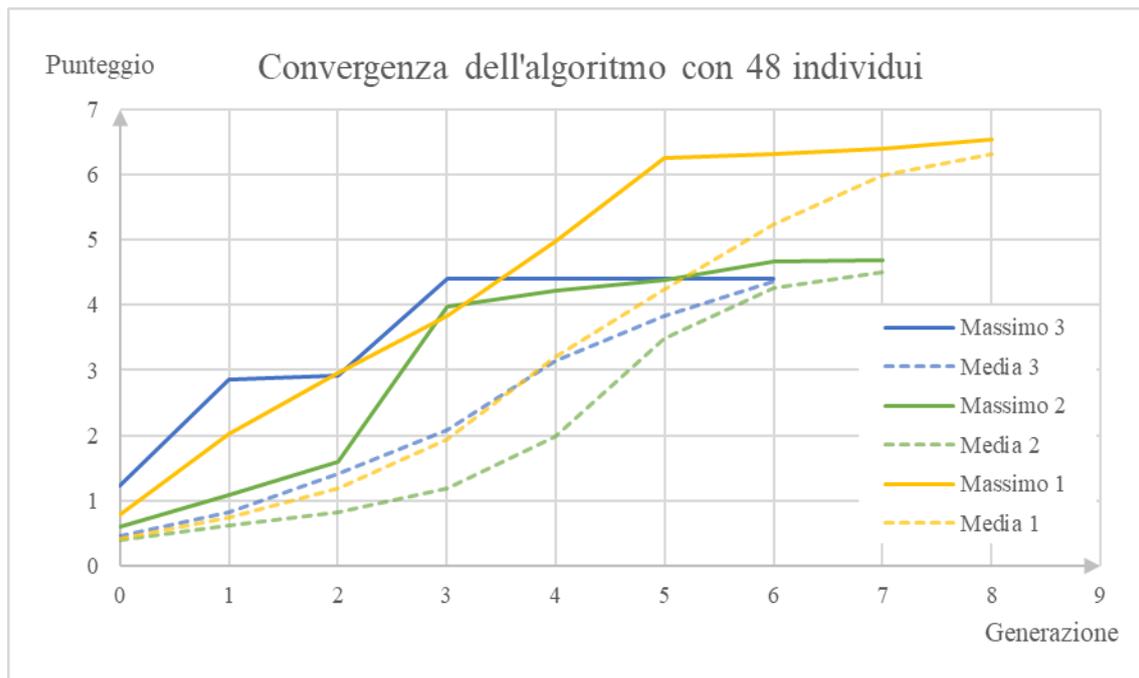


Figura 77 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 48 individui

L'incremento del numero degli individui anche in questo caso porta all' incremento del punteggio rispetto al caso precedente, poiché aumentano il numero di combinazioni effettuate e anche alla diversità degli individui stessi.

Anche grazie all'incremento del numero degli individui viene superato in parte il problema della prematura convergenza, in quanto in tale caso vengono raggiunti numeri maggiori di generazioni che indicano proprio l'evoluzione, di tipo cumulativo, che caratterizza queste esecuzioni.

Dall'analisi delle Fig. 78, Fig. 79 e Fig. 80 emerge ancora un forte discostamento relativo nella forma dello sforzo assiale, del quale l'algoritmo fornisce soltanto una soluzione approssimata, anche se da valutare alla opportuna scala. Tale aspetto è dovuto ancora all'approssimazione errata del carico tangenziale, impostato in questo particolare target con una serie di salti in successione, di difficile previsione.

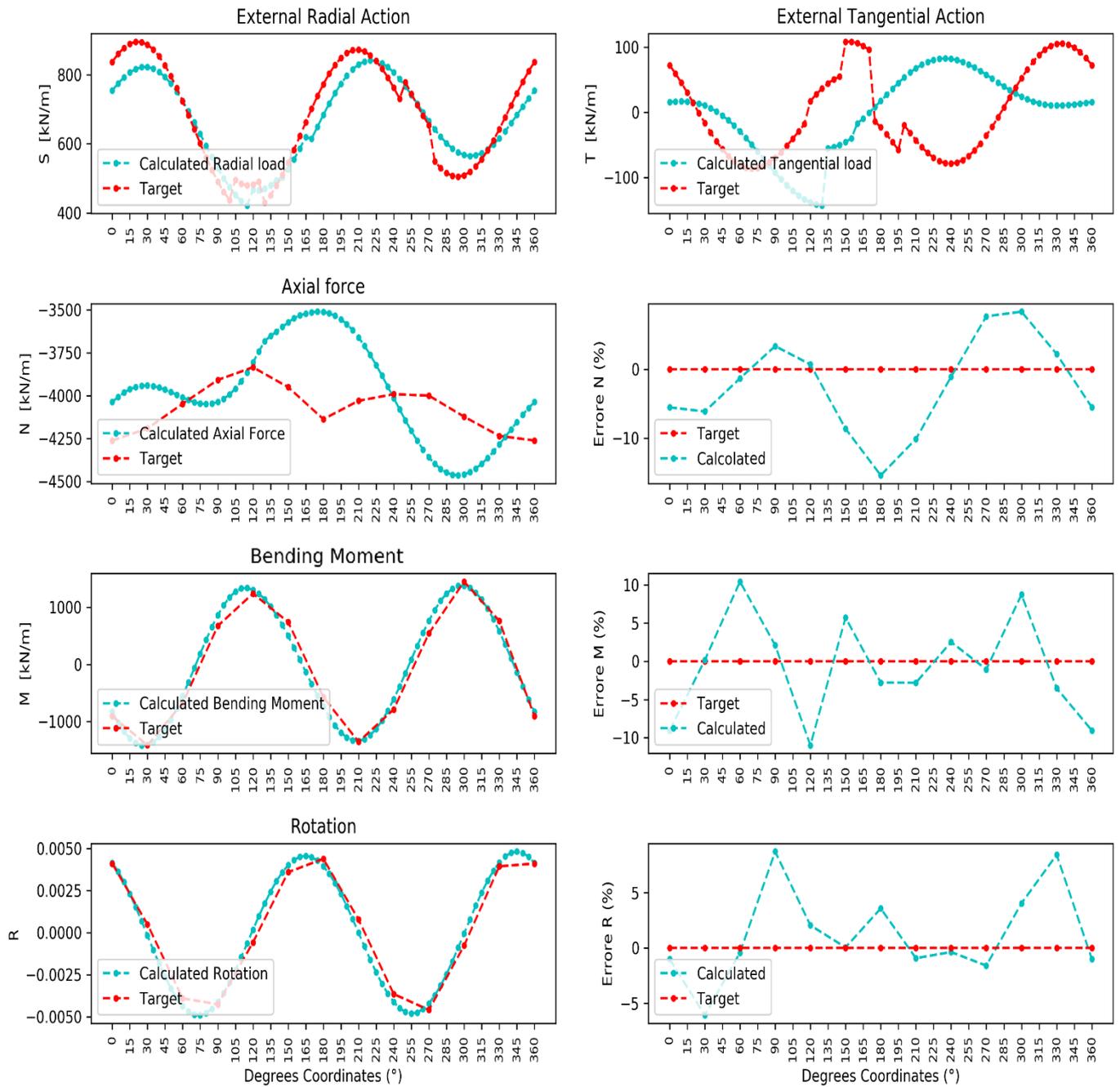


Figura 78 - Risultati della seconda applicazione con 48 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione della variabilità e del numero della popolazione iniziale

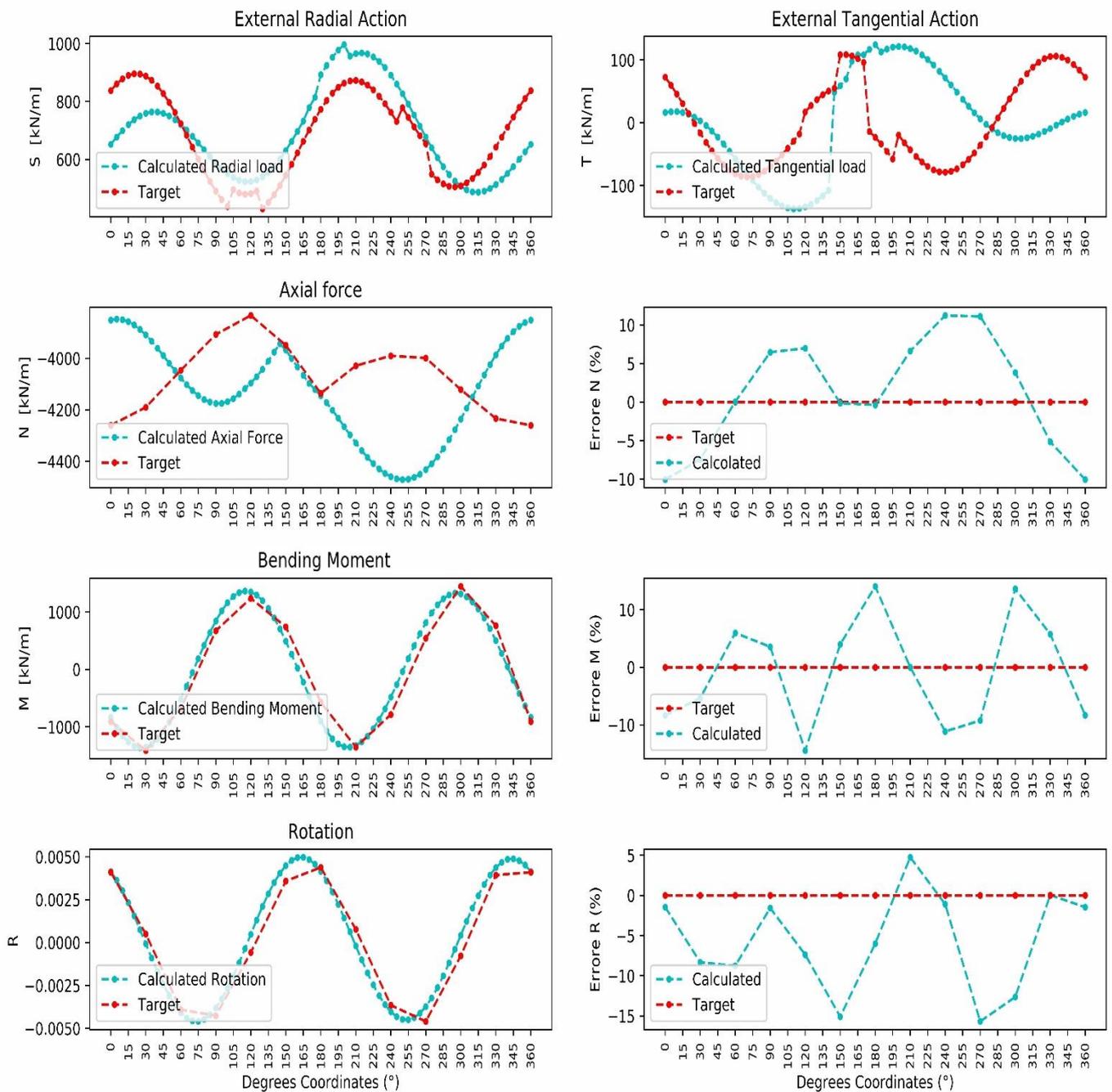


Figura 79 - Risultati della seconda applicazione con 48 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione della variabilità e del numero della popolazione iniziale

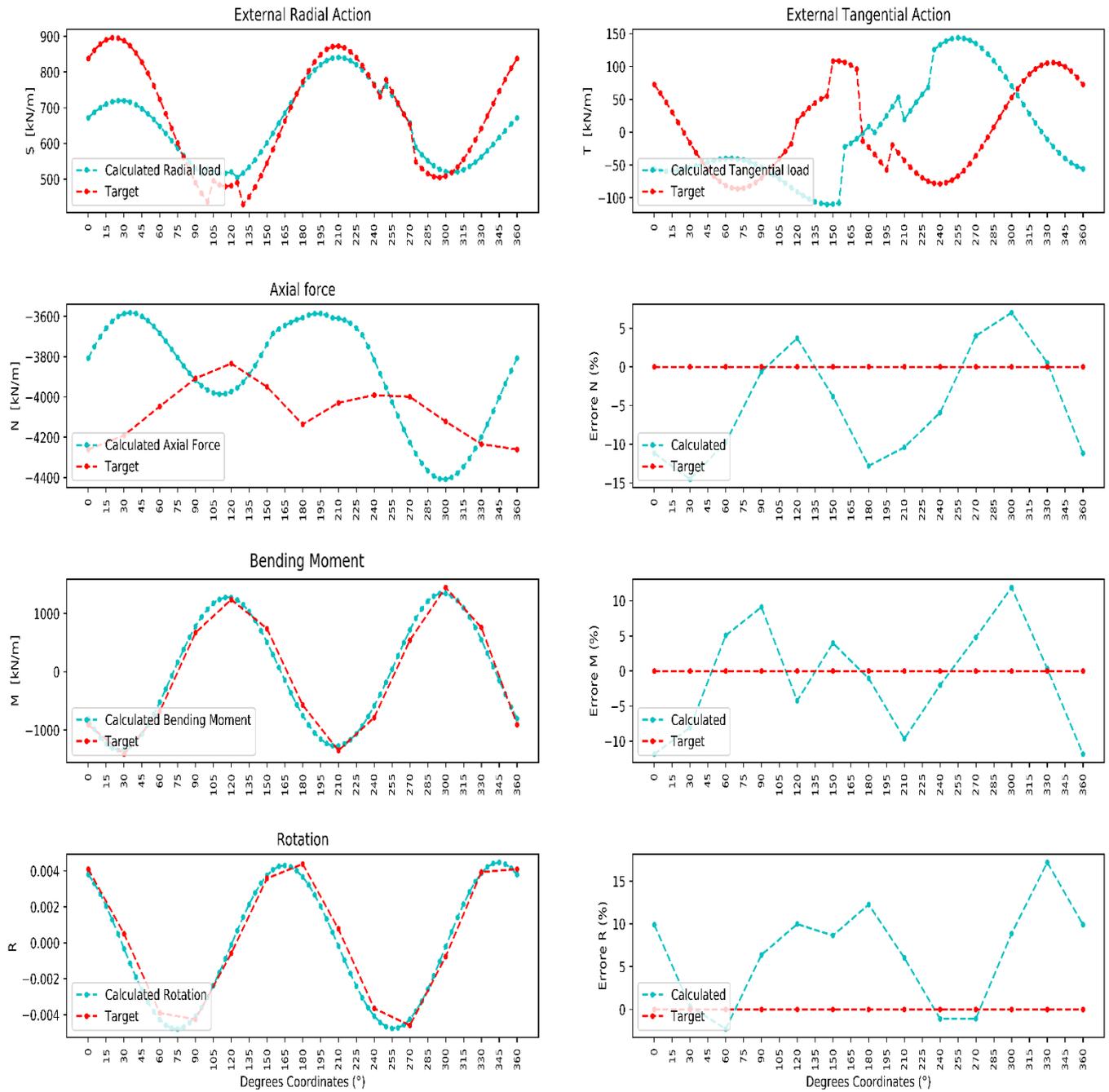


Figura 80 - Risultati della seconda applicazione con 48 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione della variabilità e del numero della popolazione iniziale

4.3.2.3 Popolazione iniziale con 72 individui

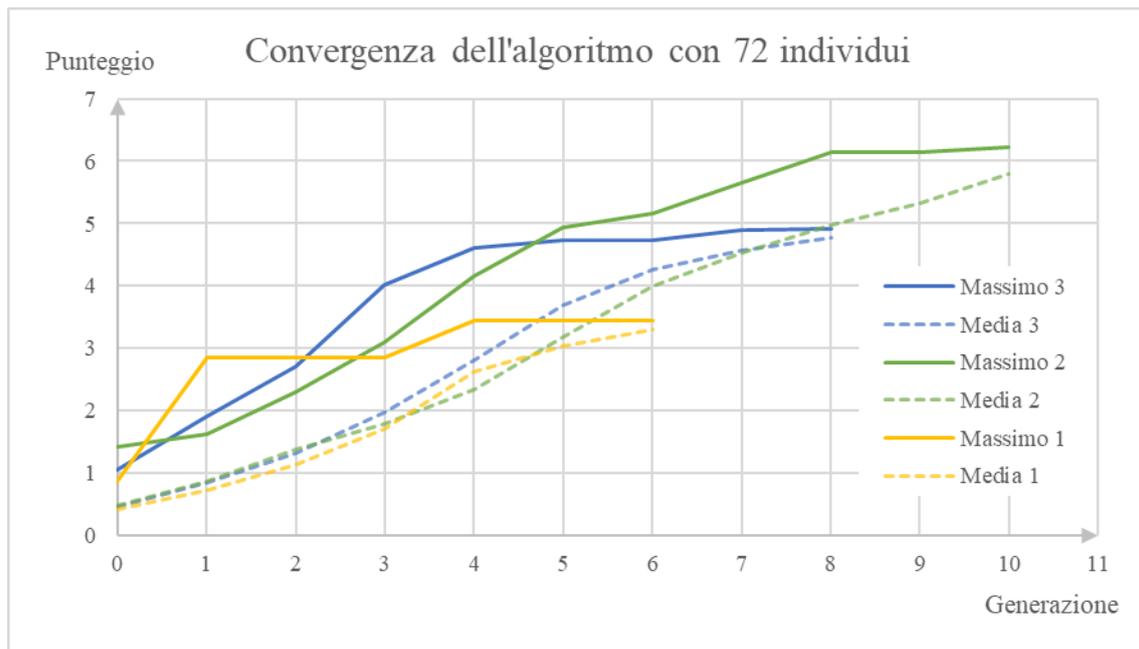


Figura 81 - Valori massimi e medi degli individui nelle 3 esecuzioni nel corso delle generazioni, partendo da una popolazione iniziale di 72 individui

Da questa analisi di convergenza si può constatare che nemmeno l'ampliamento a 72 individui con popolazione sempre variabile non è stato in grado di riuscire ad ottenere una soluzione soddisfacente in termini di punteggio.

Medesime conclusioni possono essere ottenute analizzando gli output dell'algoritmo, riportate nelle figure seguenti, infatti è possibile osservare che il massimo raggiunto è stato dovuto ad una buona previsione del carico radiale, che ha portato quindi un'ottima sovrapposizione del momento e della rotazione calcolata nei confronti delle rispettive associate al target.

Lo sforzo assiale presenta infatti una forma differente, ma se si considera la sua rappresentazione in una scala opportuna, le differenze fra queste due curve si riducono fino ad annullarsi.

È possibile quindi affermare che la mancata previsione del carico tangenziale, con la conseguente differenza della forma dello sforzo assiale, è dovuto principalmente alla modellazione di quest'ultimo e dalla forma specifica che assume nel target, in quando con una forma più regolare come quella della prima applicazione, una soluzione ottimale è effettivamente raggiungibile, ma per come è stato progettato il codice, né la casualità e né l'eterogeneità degli individui sono in grado di ottenere la forma corretta.

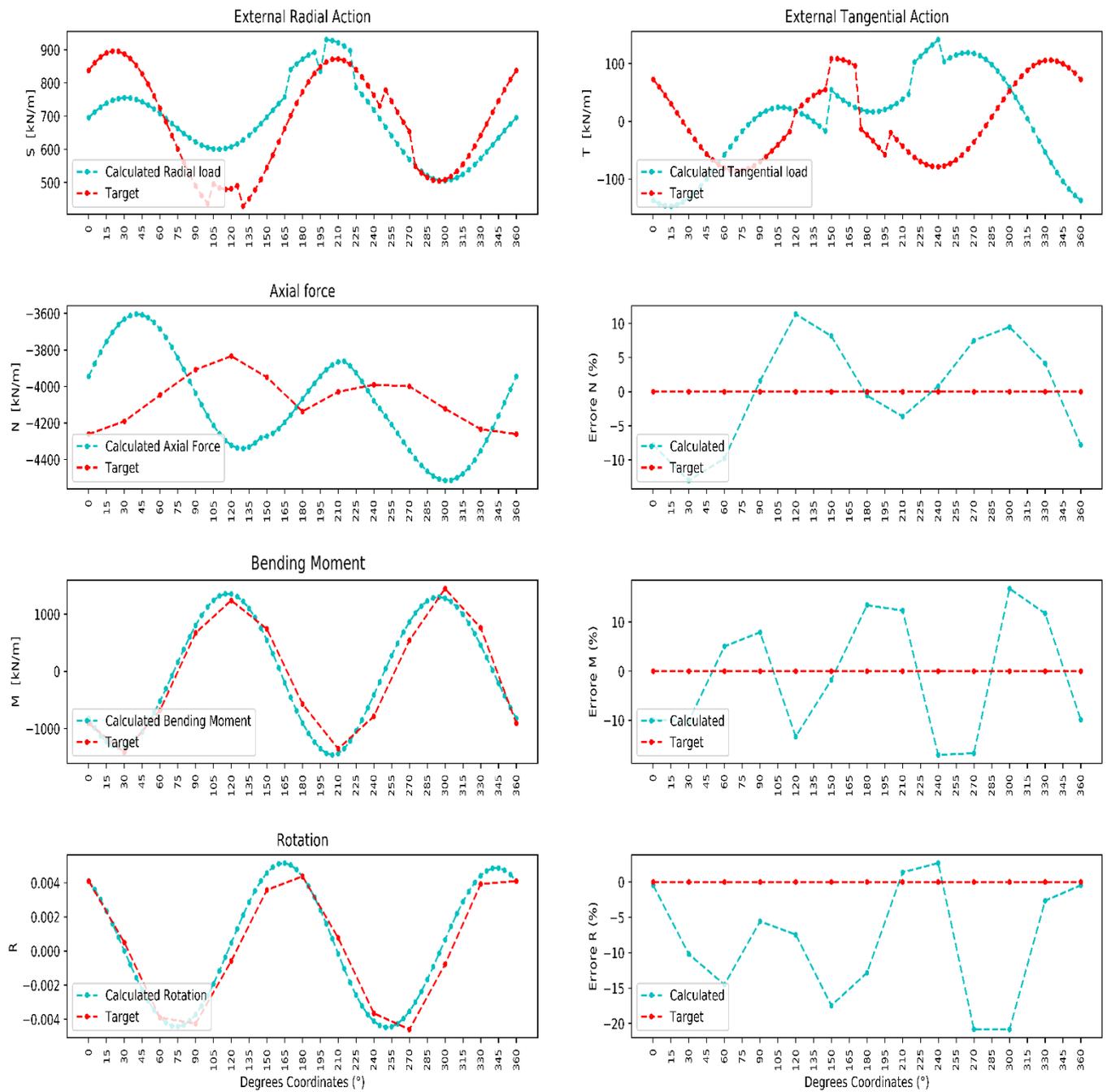


Figura 82 - Risultati della seconda applicazione con 72 individui, alla prima esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione della variabilità e del numero della popolazione iniziale

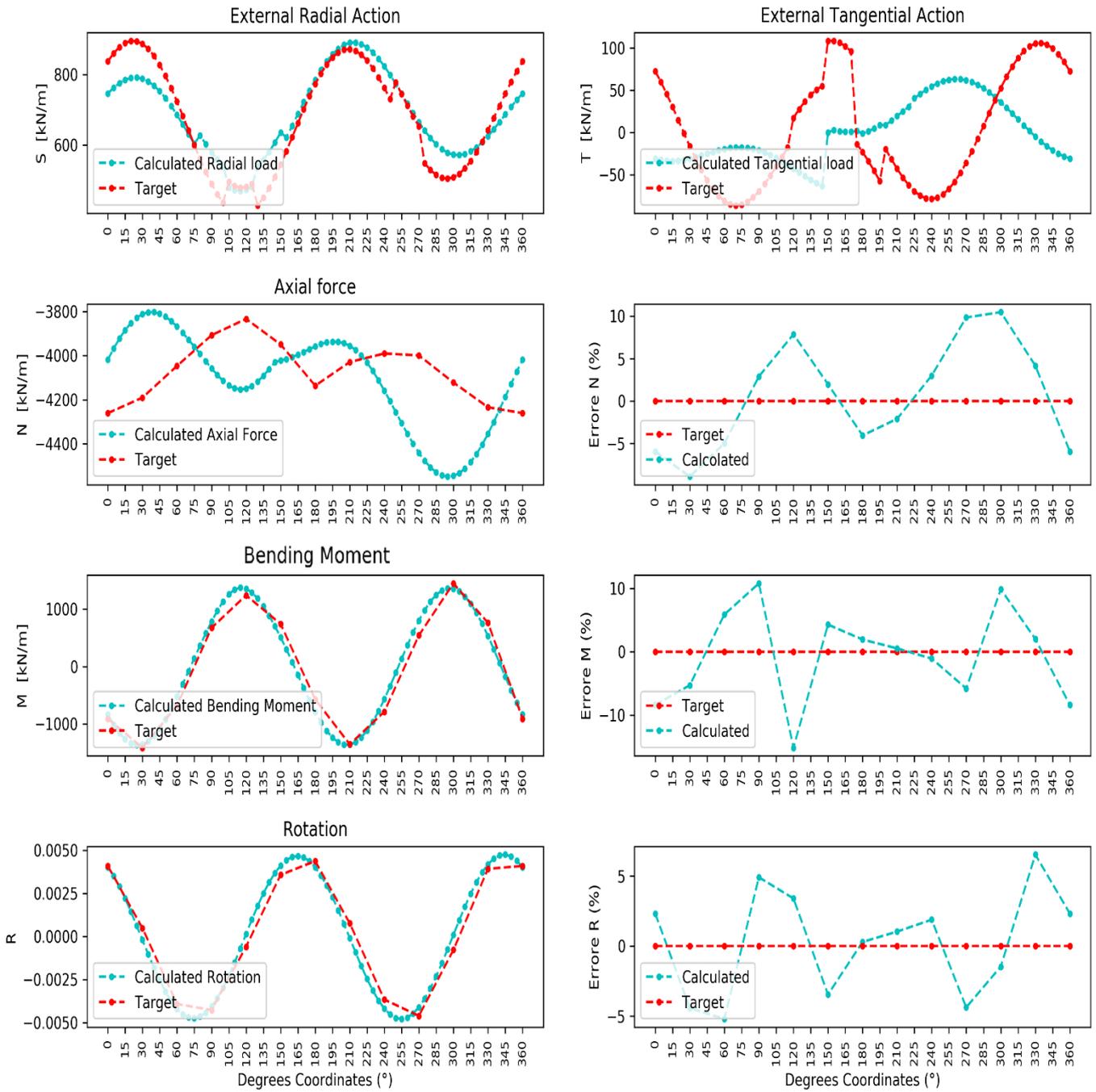


Figura 83 - Risultati della seconda applicazione con 72 individui, alla seconda esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione della variabilità e del numero della popolazione iniziale

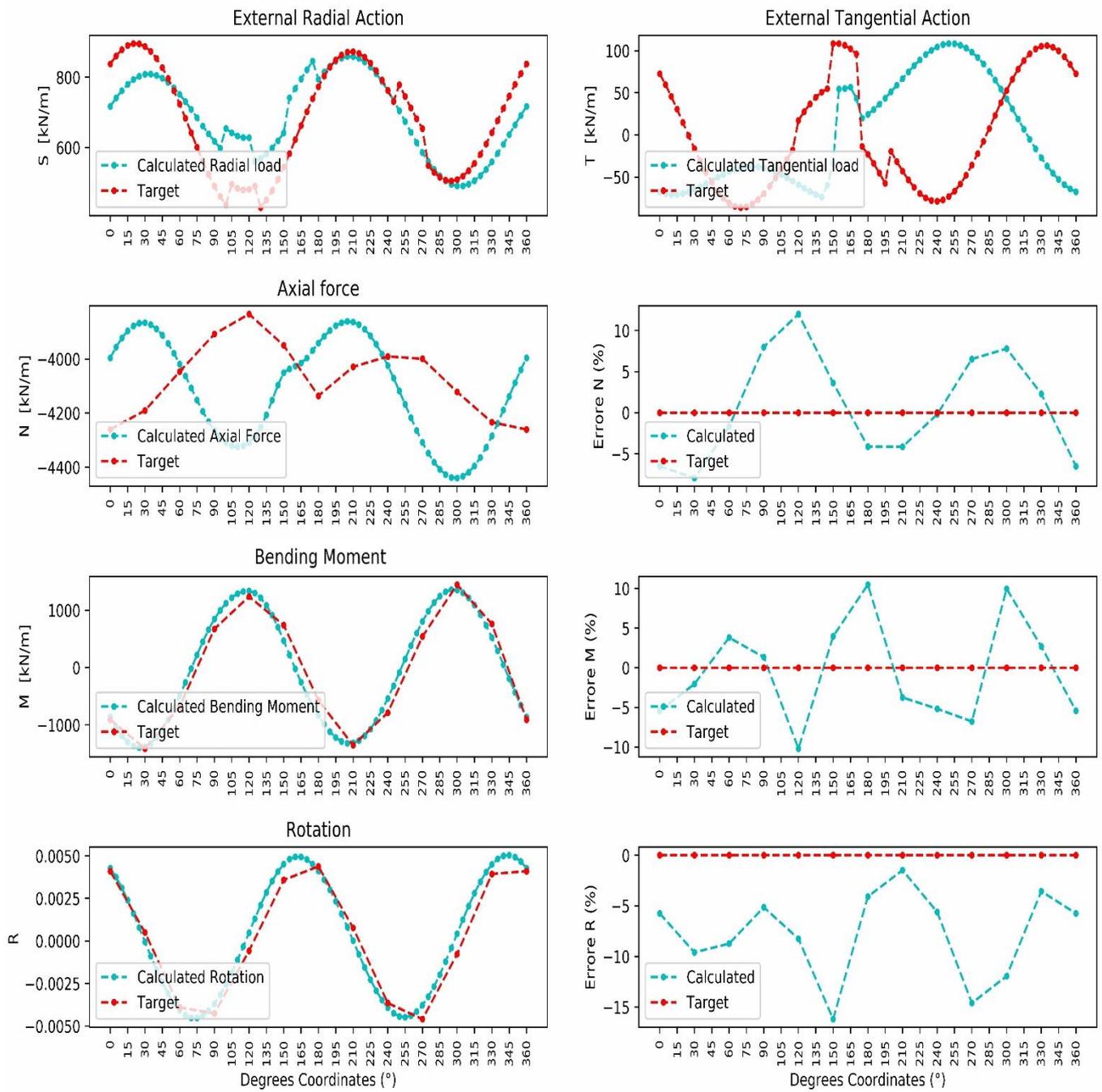


Figura 84 - Risultati della seconda applicazione con 72 individui, alla terza esecuzione, riferiti al caso dell'analisi della variazione della variabilità e del numero della popolazione iniziale

4.4 Incidenza del valore di rigidità delle molle del modello strutturale

Il modello della galleria, come è possibile osservare dalla Fig. 15, è vincolato mediante delle molle disposte in maniera radiale e tangenziale, con lo scopo di simulare il confinamento che il materiale circostante esercita sul rivestimento della galleria; queste molle saranno quindi dotate di una rigidità assiale e tangenziale.

Le esecuzioni svolte fino precedentemente sono state fatte con un valore di rigidità standard, pari a 1000 kN/m. Per capire l'incidenza della rigidità delle molle nel risultato finale, sono state effettuate diverse esecuzioni dell'algoritmo, impostando come Target, il caso esaminato nel paragrafo 4.2, andando a considerare un modello strutturale caratterizzato da un valore di rigidità dimezzata; successivamente allo stesso modello è stata impostata una rigidità doppia rispetto al valore standard di riferimento.

In particolare sono state svolte tre esecuzioni con 24 individui con rigidità pari a 500 kN/m e tre esecuzioni con 24 individui con rigidità 2000 kN/m; la ridondanza delle esecuzioni è necessaria per estrapolare un trend dai risultati con lo scopo di contenere la variabilità dell'algoritmo., al fine di tarare il modello strutturale e comprendere l'adeguato valore di questi elementi nelle future applicazioni.

4.4.1 Modello strutturale con rigidità delle molle pari a 500 kN/m.

I risultati ottenuti dall'algoritmo, per questo specifico caso sono i seguenti:

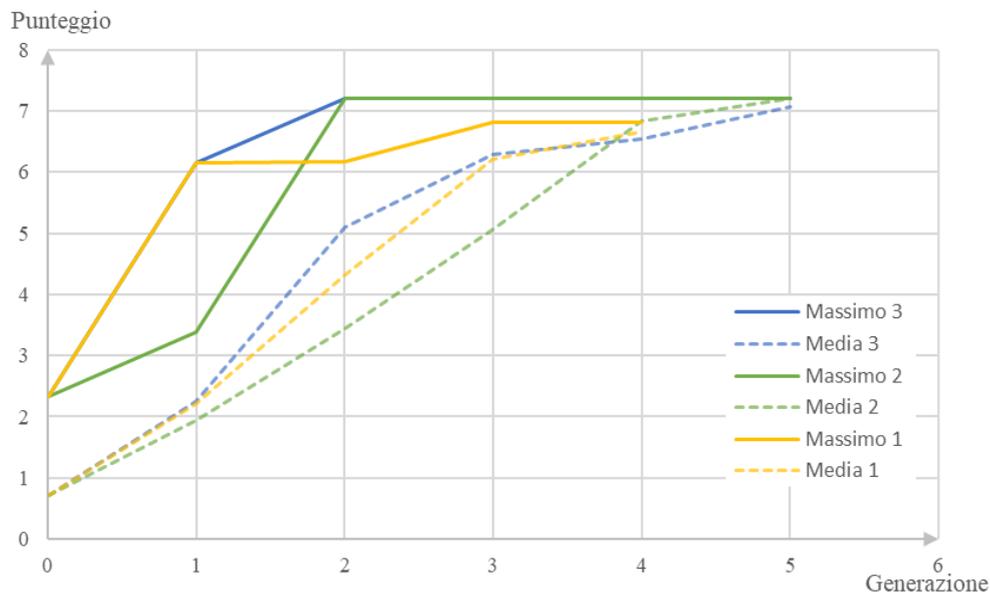


Figura 85 - Convergenza dell'algoritmo con una popolazione costante di 24 individui e rigidità delle molle del modello strutturale pari a 500 kN/m

Anche in questo caso è possibile osservare come, con una popolazione con un numero ridotto di individui, il numero di generazioni raggiunte è molto limitato. Tuttavia in questo caso, l'algoritmo ha fornito un risultato pressoché costante in termini di punteggio, e dunque anche in termini di errori percentuali nelle sollecitazioni e negli spostamenti, fornendo delle

soluzioni molto simili a quella fornita dal target, nonostante quest'ultimo sia stato calcolato con un valore di rigidezza delle molle pari a 1000 kN/m.
 Si riportano di seguito gli output dell'algoritmo.

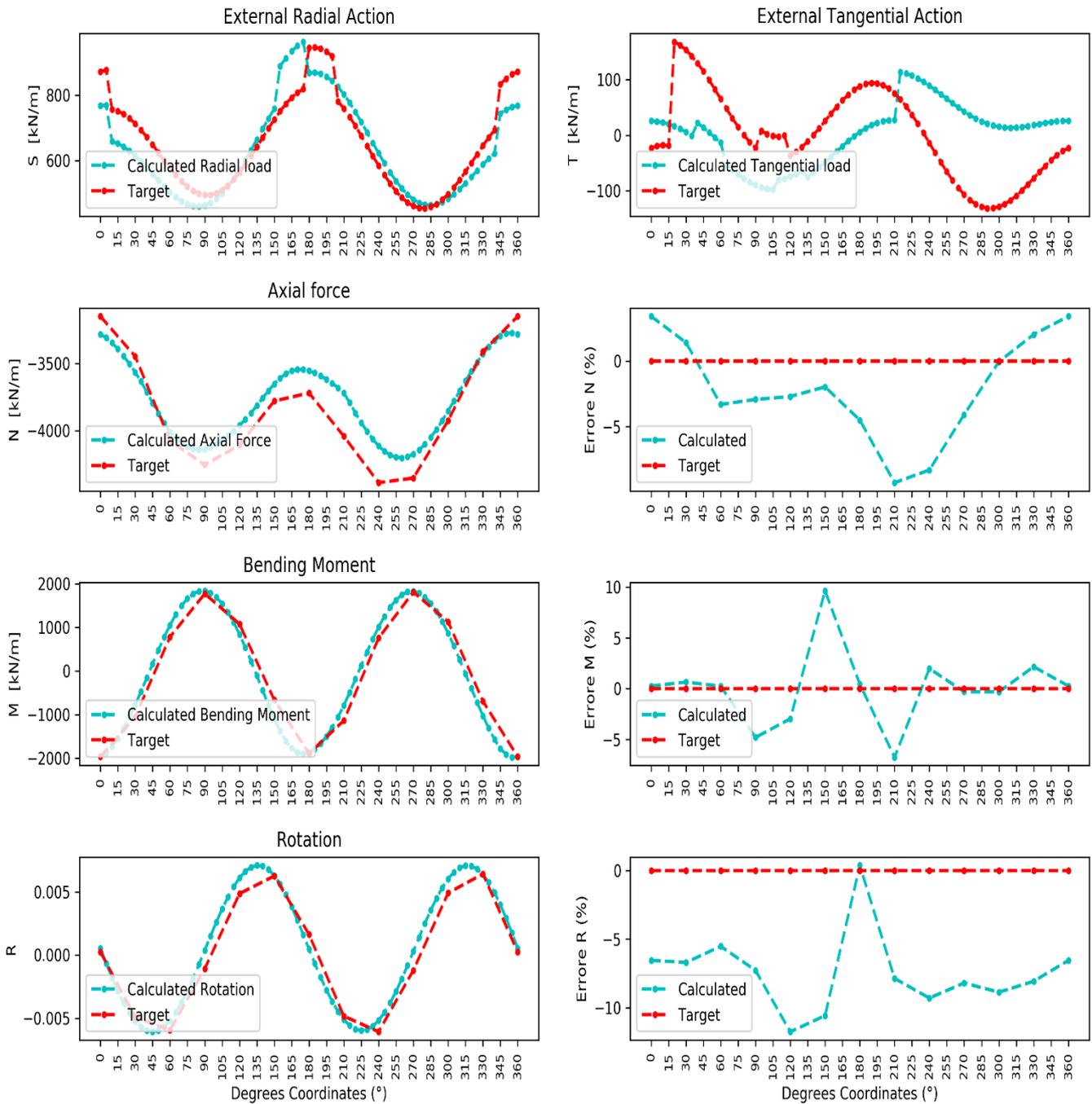


Figura 86 - Risultati della prima esecuzione, con una popolazione costante di 24 individui, riferiti ad un modello strutturale con rigidezza delle molle pari a 500 kN/m

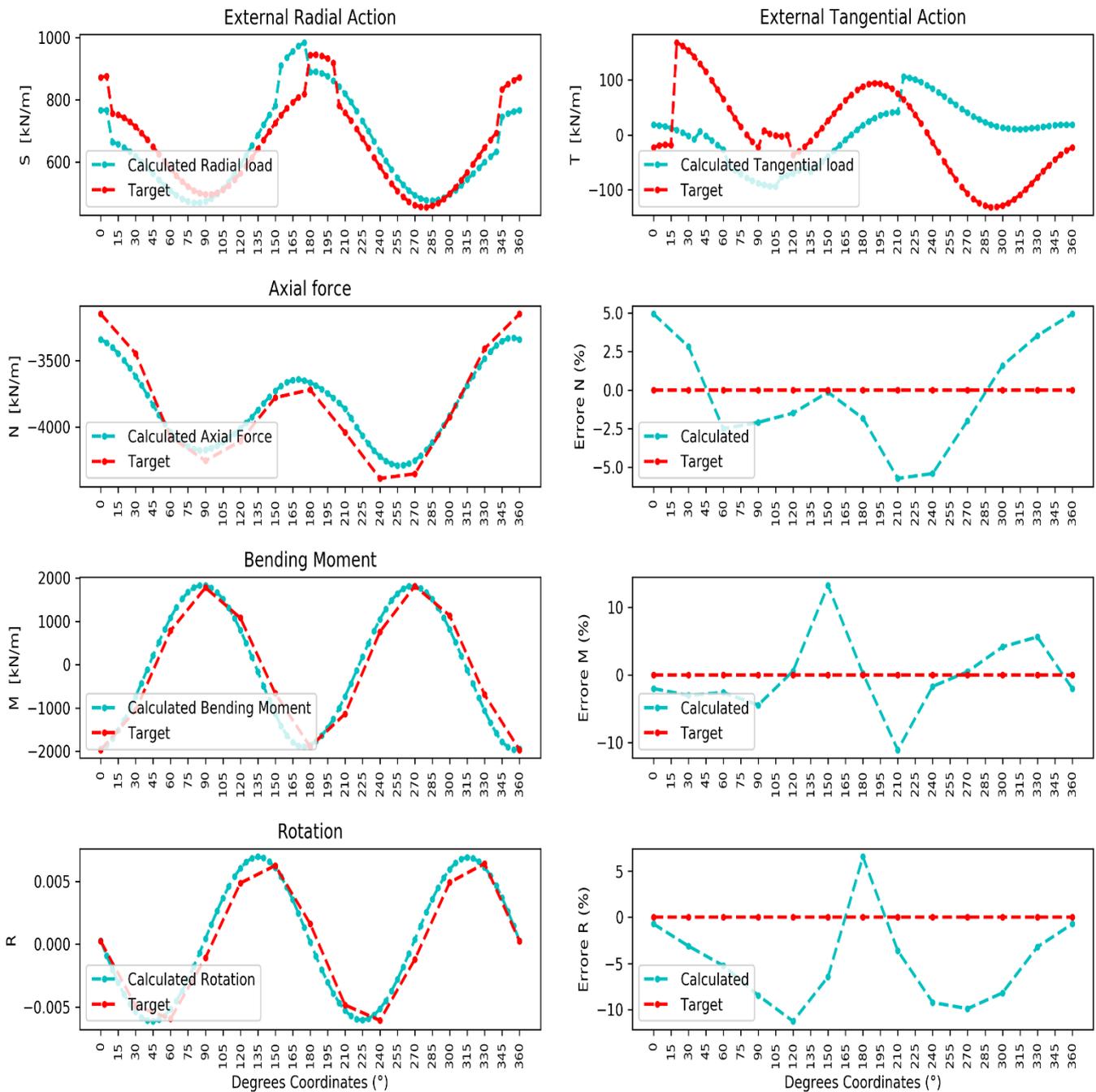


Figura 87 - Risultati della seconda esecuzione, con una popolazione costante di 24 individui, riferiti ad un modello strutturale con rigidezza delle molle pari a 500 kN/m

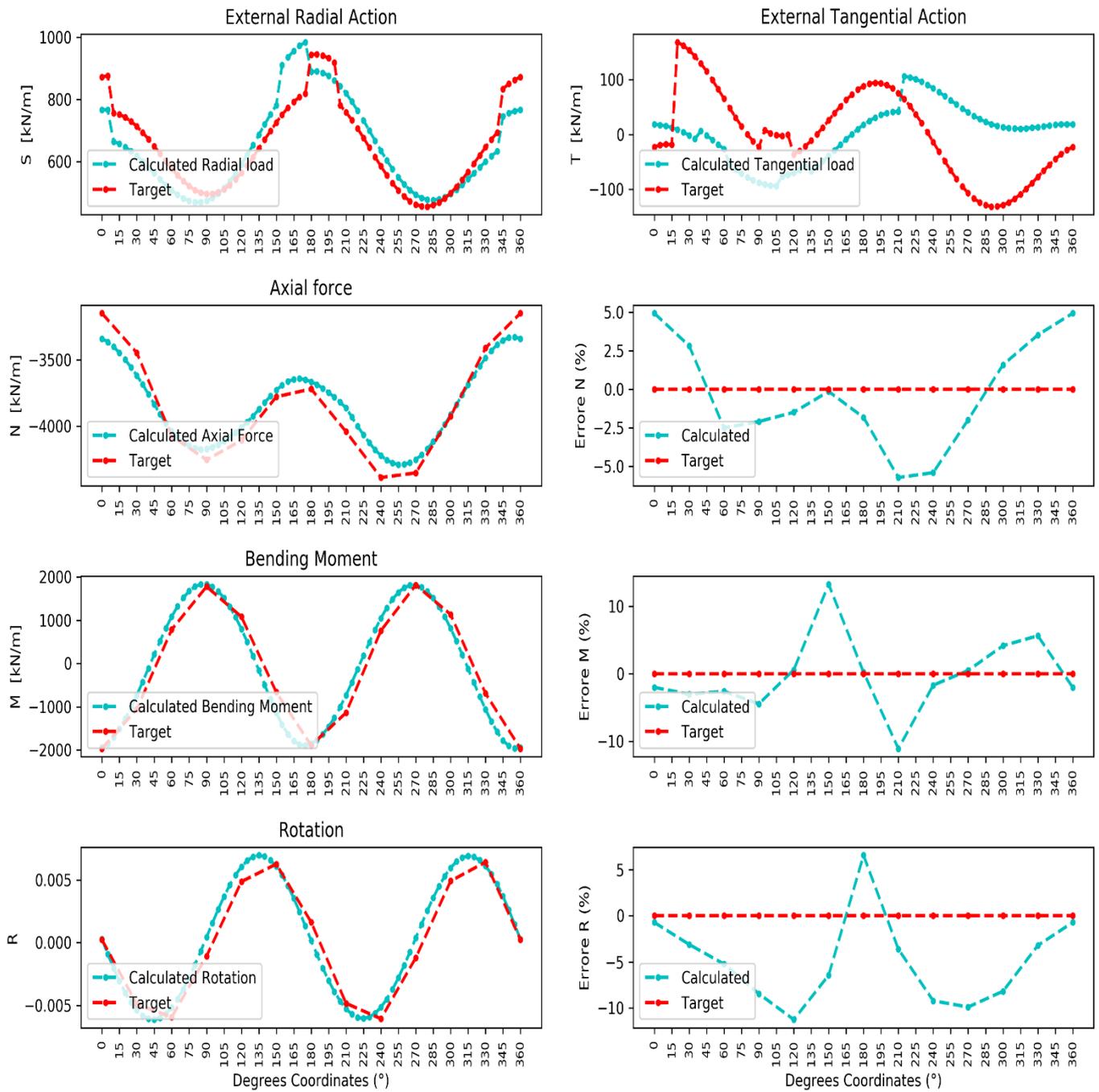


Figura 88 - Risultati della terza esecuzione, con una popolazione costante di 24 individui, riferiti ad un modello strutturale con rigidezza delle molle pari a 500 kN/m

4.4.2 Modello strutturale con rigidezza delle molle pari a 2000 kN/m.

I risultati riferiti al caso in esame sono i seguenti:

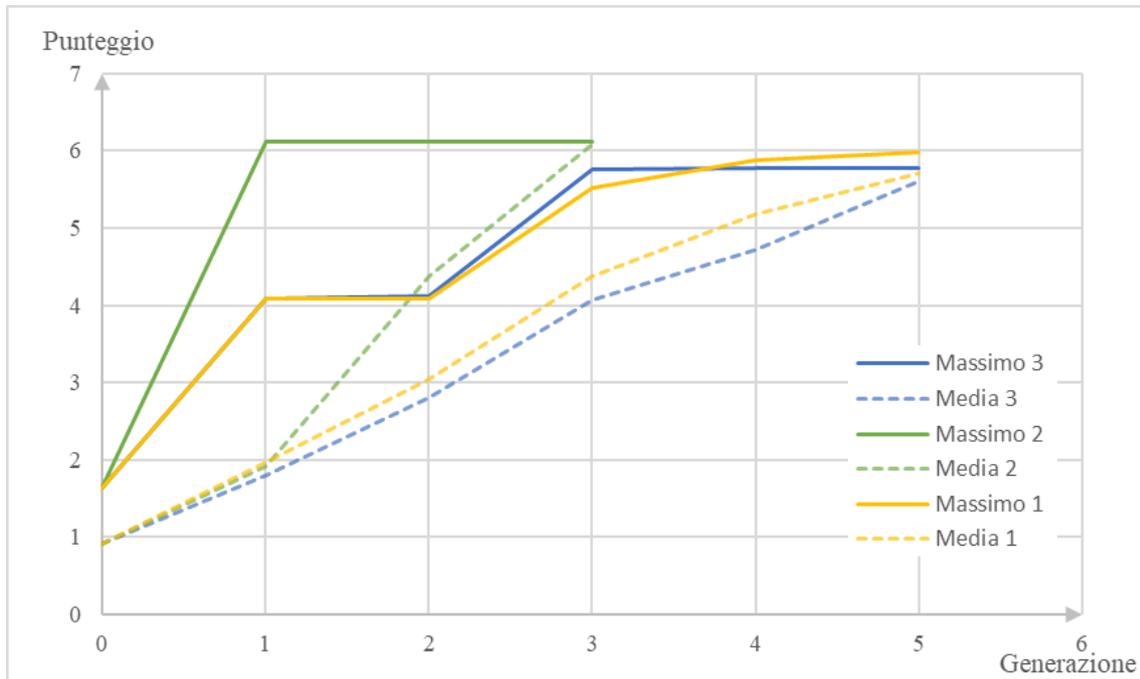


Figura 89 - Convergenza dell'algorithm con una popolazione costante di 24 individui e rigidezza delle molle del modello strutturale pari a 2000 kN/m

Con un modello strutturale con molle impostate ad un valore doppio si ottengono ancora dei risultati molto simili in termini di punteggio nelle varie esecuzioni, ed anche in termini di errori percentuali medi si registrano valori accettabili, ma pur sempre diversi rispetto ai risultati ottenuti con un modello strutturale le cui molle presentano la stessa rigidezza del modello strutturale utilizzato per definire i valori target.

Vengono di seguito riportati gli output, in modo da poter osservare il discostamento fra gli andamenti di sforzo normale, momento flettente e rotazioni calcolate dall'algorithm e le curve delle analoghe grandezze riferite al target.

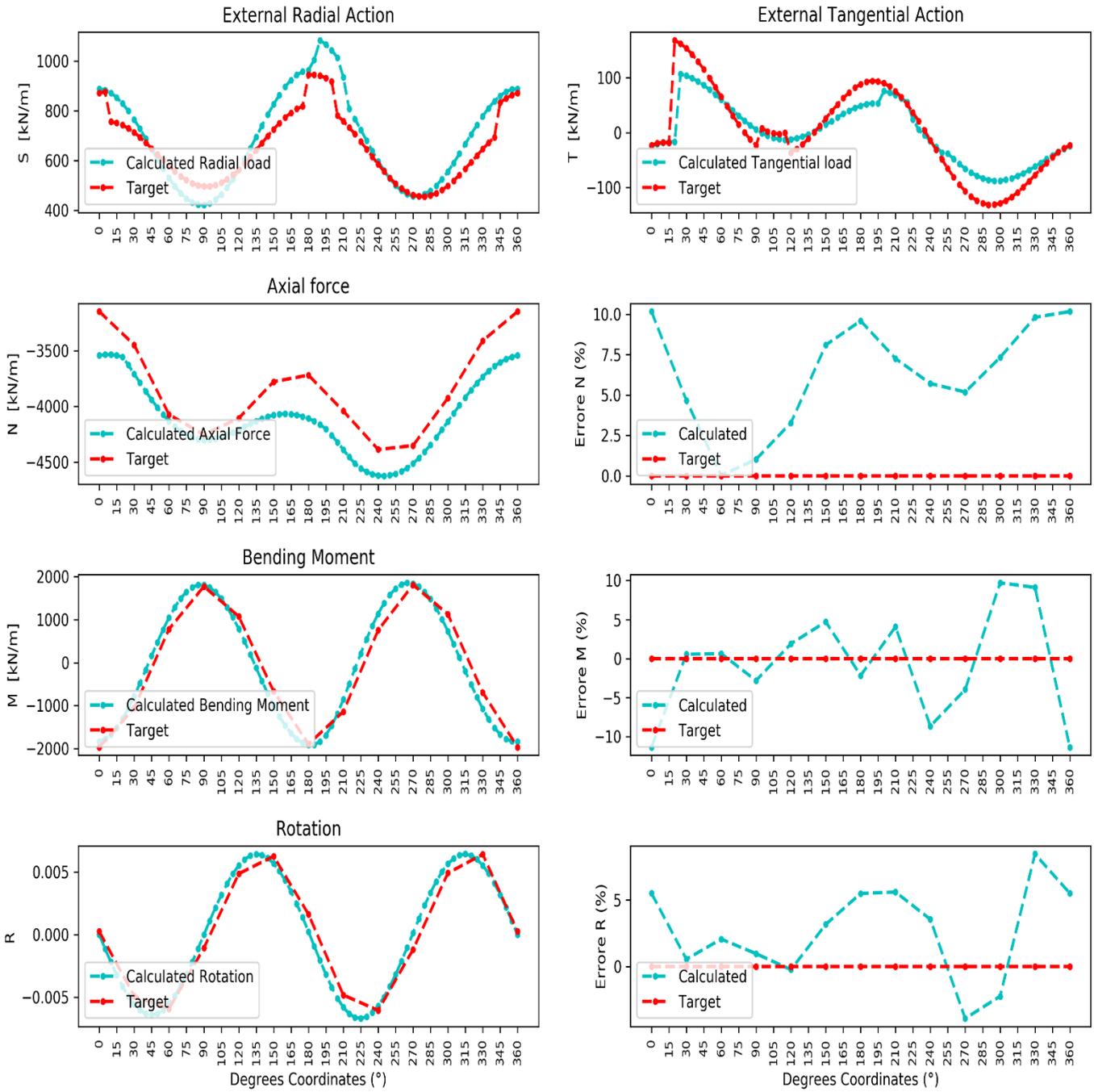


Figura 90 - Risultati della prima esecuzione, con una popolazione costante di 24 individui, riferiti ad un modello strutturale con rigidezza delle molle pari a 2000 kN/m

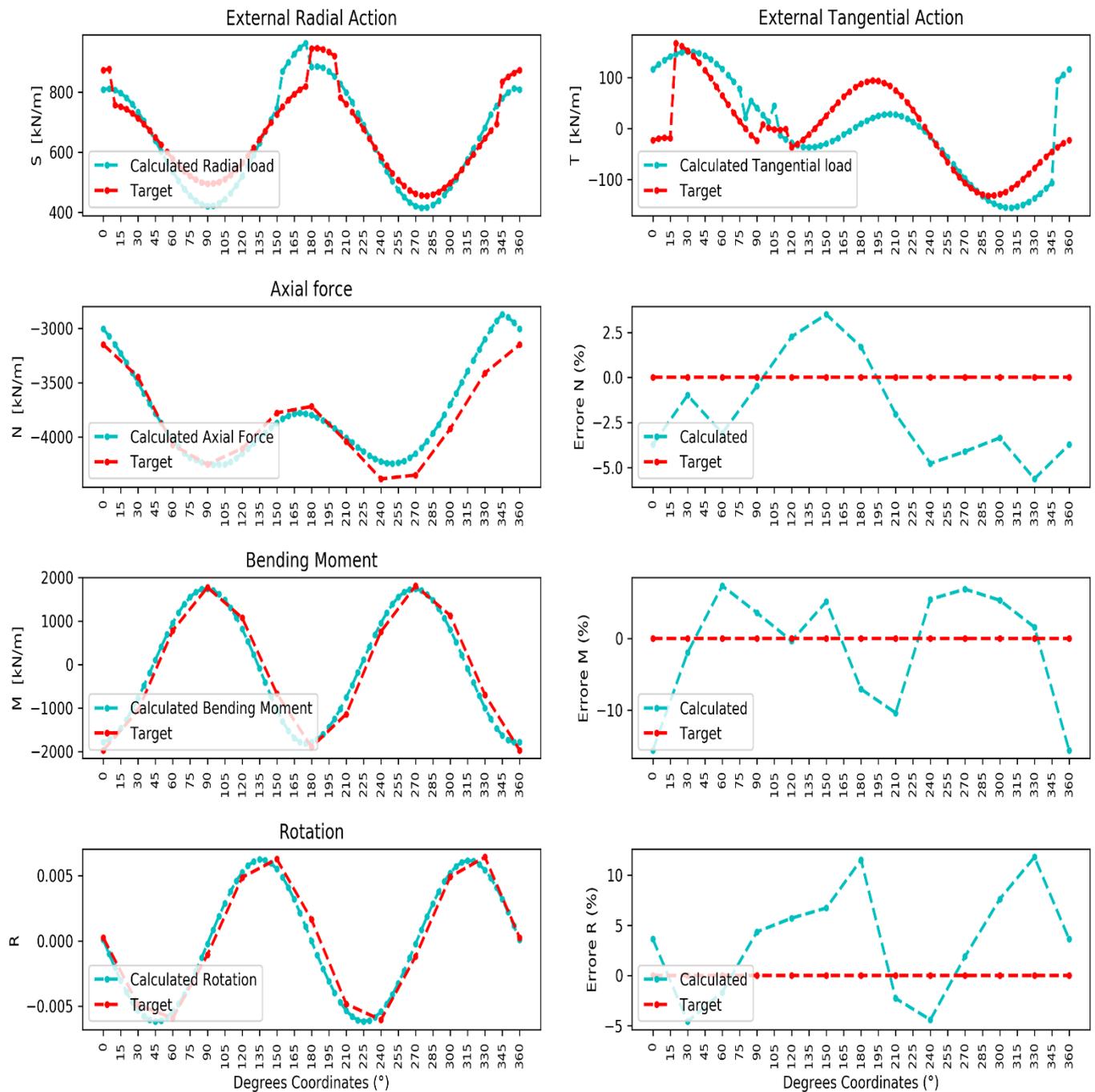


Figura 91 - Risultati della seconda esecuzione, con una popolazione costante di 24 individui, riferiti ad un modello strutturale con rigidezza delle molle pari a 2000 kN/m

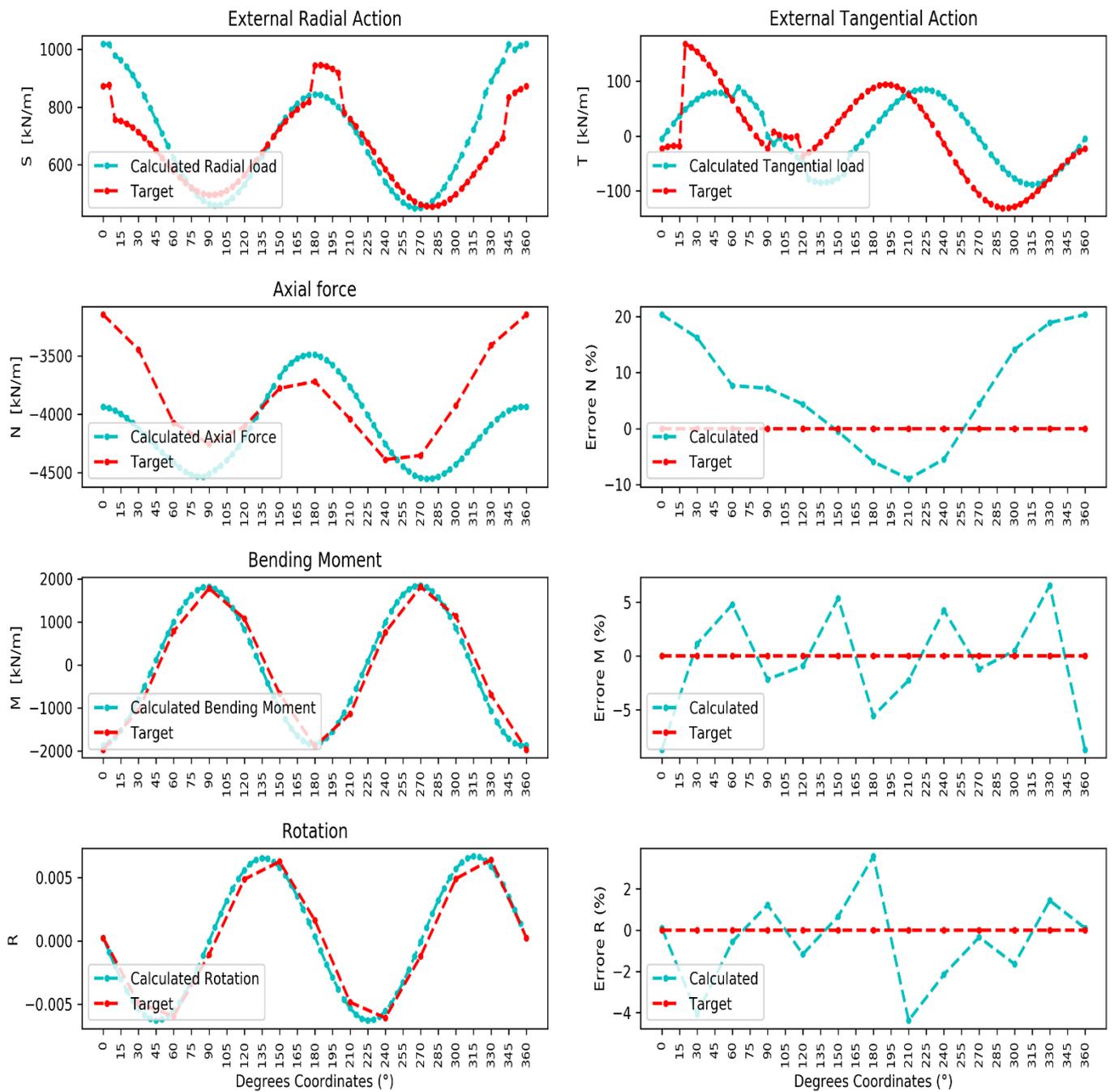


Figura 92 - Risultati della terza esecuzione, con una popolazione costante di 24 individui, riferiti ad un modello strutturale con rigidezza delle molle pari a 2000 kN/m

4.4.3 Confronto dei risultati al variare della rigidezza delle molle

Quando l'algoritmo arriva a convergenza, oltre alla realizzazione dell'output in termini di grafici, fornisce anche i valori dei singoli coefficienti, e delle rispettive fasi, che caratterizzano i carichi adimensionali precedentemente esposti. Questi coefficienti saranno i fattori moltiplicativi dei carichi adimensionali, che assieme al carico medio, costituiranno i carichi applicati al modello strutturale.

Al variare della rigidezza delle molle del modello strutturale, risulta variare contestualmente anche il comportamento della struttura. Questo aspetto è apprezzabile andando ad analizzare i grafici dei carichi adimensionali applicati alla struttura, come già visto nel paragrafo 3.3.2, considerando gli effetti dei carichi adimensionali su strutture aventi molle con rigidezza di 500 e 2000 kN/m (vedere la Fig. 26 per il caso di rigidezza pari a 1000 kN/m).

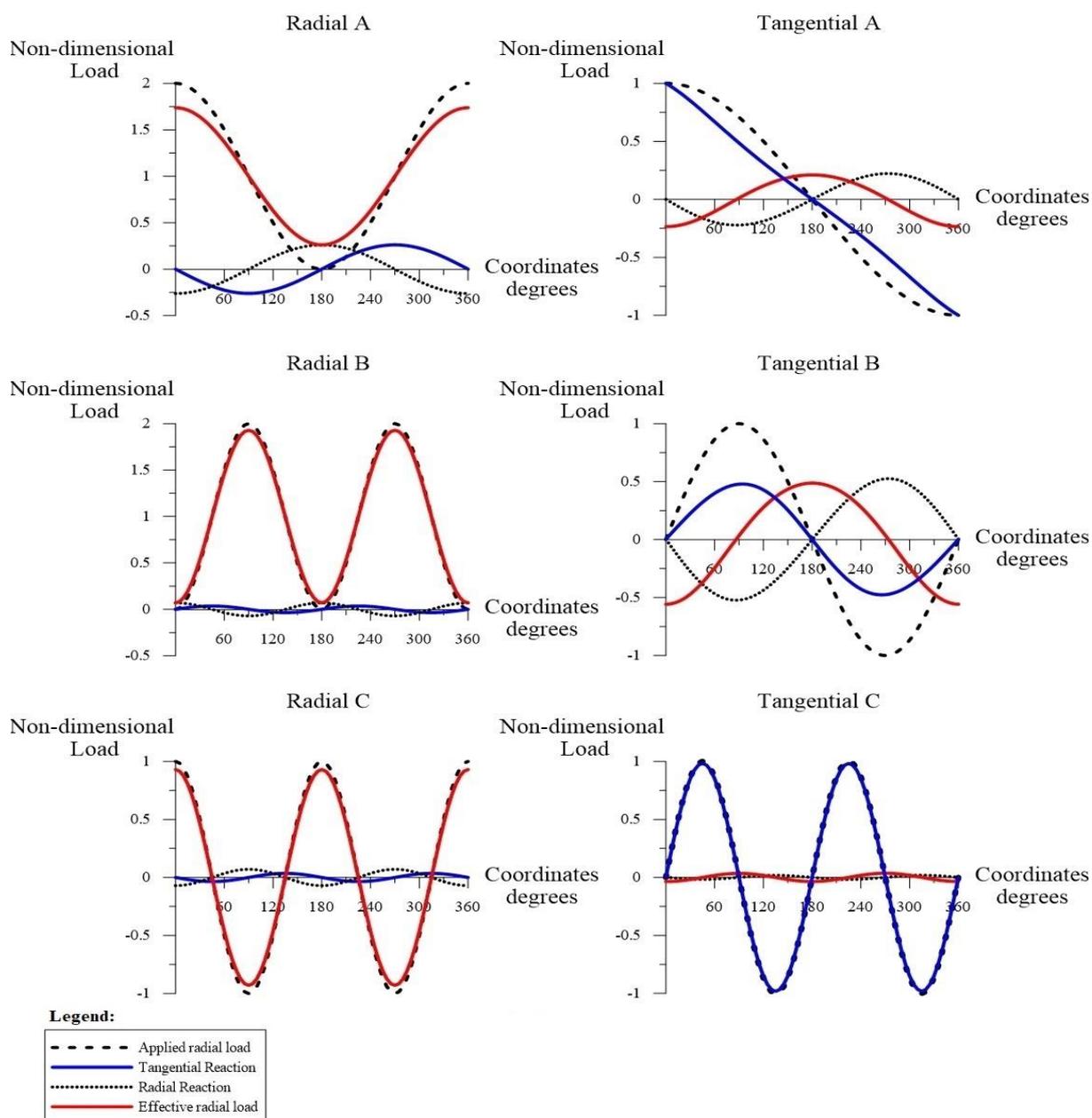


Figura 93 - Reazioni vincolari, carichi applicati e carichi effettivi a cui la struttura è soggetta. Valori ottenuti con rigidezza delle molle pari a 500 kN/m

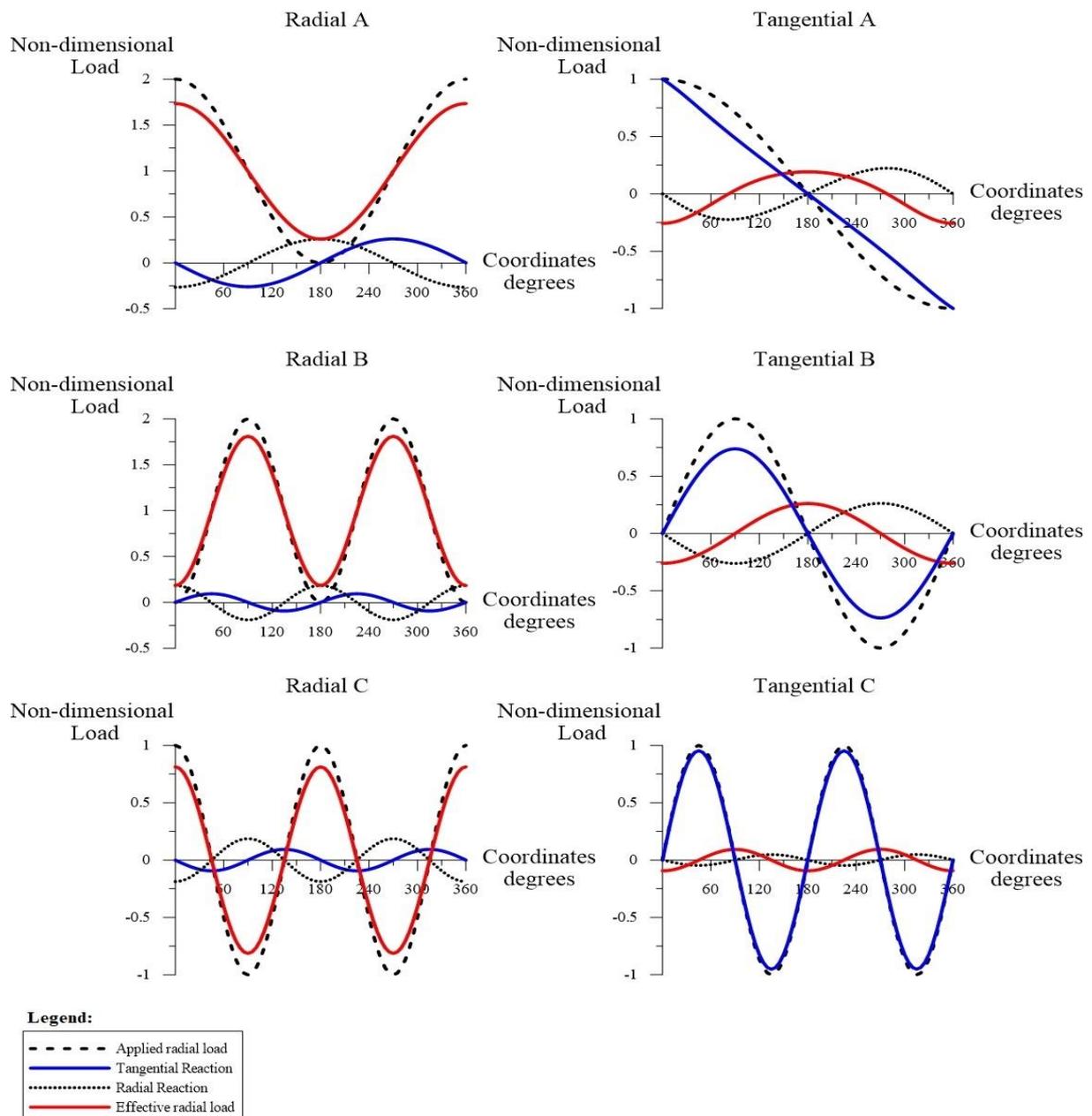


Figura 94- Reazioni vincolari, carichi applicati e carichi effettivi a cui la struttura è soggetta. Valori ottenuti con rigidezza delle molle pari a 2000 kN/m

La conseguenza di questa diversa risposta strutturale, al variare della rigidezza, comporta dunque la convergenza dell’algoritmo alla stessa soluzione nei casi di rigidezza pari a 500, 1000 e 2000, ma ottenuta attraverso un adattamento dei coefficienti amplificativi a seconda dei casi. Nelle tabelle successive si possono osservare infatti i valori dei coefficienti di tutte le esecuzioni al variare della rigidezza delle molle; la soluzione ottenuta è accettabile in termini di errori e punteggi, ma gli individui che la producono risultano essere profondamente differenti.

Tabella 4 - Valori dei coefficienti di amplificazione, e delle rispettive fasi, relativi ai carichi adimensionali, riferiti al caso di rigidità delle molle del modello strutturale pari a 500 kN/m

Valori dei coefficienti	esecuzione 1	esecuzione 2	esecuzione 3	Media dei valori dei coefficienti
α_1	103.91	111.25	111.25	108.80
θ_1	175	175	175	175.00
α_2	5.98	11.25	11.25	9.49
θ_2	65	65	65	65.00
α_3	143.81	142.5	142.5	142.94
θ_3	175	175	175	175.00
β_1	43.81	32.5	32.5	36.27
θ_4	210	210	210	210.00
β_2	39.89	46.25	46.25	44.13
θ_5	205	205	205	205.00
β_3	40.98	38.75	38.75	39.49
θ_6	25	25	25	25.00
γ_1	102.28	101.25	101.25	101.59
θ_7	165	165	165	165.00
γ_2	107.82	98.75	98.75	101.77
θ_8	355	355	355	355.00
δ_1	18.05	16.25	16.25	16.85
θ_9	120	120	120	120.00
δ_2	30.76	21.25	21.25	24.42
θ_{10}	60	60	60	60.00
Punteggio	6.81779	7.19615	7.19615	

Tabella 5 - Valori dei coefficienti di amplificazione, e delle rispettive fasi, relativi ai carichi adimensionali, riferiti al caso di rigidità delle molle del modello strutturale pari a 1000 kN/m

Valori dei coefficienti	esecuzione 1	esecuzione 2	esecuzione 3	Media dei valori dei coefficienti
α_1	83.45	72.53	92.73	82.90
θ_1	180	180	15	125.00
α_2	68.05	71.1	63.78	67.64
θ_2	110	110	275	165.00
α_3	122.04	113	112.95	116.00
θ_3	5	5	175	61.67
β_1	39.72	41.19	37.6	39.50
θ_4	345	345	20	236.67
β_2	29.61	26.16	30.98	28.92
θ_5	175	175	5	118.33
β_3	55.31	70.6	74.12	66.68
θ_6	190	190	205	195.00
γ_1	82.04	59.03	74.68	71.92
θ_7	165	165	15	115.00
γ_2	62.15	62.45	75.65	66.75
θ_8	345	345	175	288.33
δ_1	12.81	-9.36	22.37	8.61
θ_9	90	90	75	85.00
δ_2	18.98	28.44	19.35	22.26
θ_{10}	105	105	85	98.33
Punteggio	9.29629	11.4759	5.567458972	

Tabella 6 - Valori dei coefficienti di amplificazione, e delle rispettive fasi, relativi ai carichi adimensionali, riferiti al caso di rigidità delle molle del modello strutturale pari a 2000 kN/m

Valori dei coefficienti	esecuzione 1	esecuzione 2	esecuzione 3	Media dei valori dei coefficienti
α_1	41.41	37.5	72.48	50.46
θ_1	155	180	355	230.00
α_2	132.97	87.5	105.97	108.81
θ_2	280	110	80	156.67
α_3	126.09	147.5	138.68	137.42
θ_3	10	5	170	61.67
β_1	62.34	95	13.91	57.08
θ_4	20	345	155	173.33
β_2	7.81	0	12.01	6.61
θ_5	185	175	350	236.67
β_3	48.91	65	80.83	64.91
θ_6	25	190	180	131.67
γ_1	87.97	87.5	30.34	68.60
θ_7	200	165	355	240.00
γ_2	43.91	12.5	38.47	31.63
θ_8	195	345	335	291.67
δ_1	-9.22	-42.5	27.1	-8.21
θ_9	240	90	75	135.00
δ_2	23.44	47.5	25.27	32.07
θ_{10}	220	105	120	148.33
	5.98812	6.12324	5.76756	

5 Considerazioni finali

In base alle analisi svolte nel presente elaborato, è possibile trarre delle conclusioni di carattere specifico ai casi studiati, ma facilmente generalizzabili a tutte le possibili applicazioni dell'algoritmo genetico sviluppato.

Come è stato possibile osservare, ricopre un aspetto molto importante le caratteristiche della popolazione iniziale, poiché essa rappresenta la base su cui l'algoritmo tenterà di applicare il meccanismo evolutivo.

Pertanto, è necessario che gli individui di partenza debbano avere una sufficiente eterogeneità, ma sempre congruente con il problema da analizzare; alla luce di ciò è stato possibile osservare che non sempre un individuo iniziale con punteggio elevato (e quindi più simile alla soluzione finale) porti ad un individuo evoluto più vicino alla soluzione corretta. Questo aspetto è dovuto al fatto che tale individuo, fortemente predominante, sopprime l'eterogeneità della popolazione, conducendo ad un basso livello di evoluzione; tale evoluzione è stata indicata infatti come evoluzione "a gradino".

Dalle varie esecuzioni è stato possibile tuttavia osservare che l'evoluzione che porta ad una soluzione più vicina a quella corretta, è quella soluzione associata ad un aumento graduale del punteggio, appunto chiamata evoluzione "cumulativa".

Oltre all'eterogeneità è risultato determinante anche il numero di individui che caratterizzano la popolazione stessa; tale parametro è dovuto alla forte aleatorietà che governa le

combinazioni fra gli individui. L'aumento indiscriminato del numero degli individui non è sempre giustificato, infatti è stato possibile osservare che in alcuni casi, l'aumento degli individui non ha portato miglioramenti nella soluzione, ma ha comportato soltanto un aumento dei tempi di elaborazione.

Il numero ottimale degli individui non è definito, in quanto esso dipende soprattutto dalla complessità del caso da analizzare, e risulta essere collegato anche alla variabilità della popolazione iniziale in quanto, la bontà di quest'ultima, condiziona il numero ottimale di individui da scegliere e quindi della soluzione che si otterrà.

Dalle analisi svolte con differenti valori di rigidità delle molle del modello strutturale, è stato possibile osservare invece come questo valore non incide in maniera rilevante nel risultato finale, in quanto l'algoritmo svilupperà una soluzione che porta al medesimo risultato, ma attraverso una combinazione differente dei coefficienti amplificativi.

Questo ultimo aspetto è molto importante in quanto definisce l'invarianza del risultato rispetto alla rigidità delle molle, che rappresenta un parametro di difficile definizione e pertanto prettamente arbitrario.

5.1 Criticità e miglioramenti

Le principali criticità dell'algoritmo sono legate ad alcuni aspetti che, inevitabilmente, derivano da scelte dipendenti dal caso in esame. In particolare le principali criticità sono legati alle seguenti variabili:

- 1) Coefficienti amplificativi: sono quei parametri che conferiscono la corretta ampiezza delle spinte del terreno, e quindi il corretto adattamento delle curve rispetto alle grandezze target (Sforzo assiale, Momento flettente etc..).
- 2) Carico medio: questo parametro ovviamente dipende dalla profondità del caso in esame; la sua incidenza non è elevata se associata ad una buona valutazione dei coefficienti amplificativi delle onde adimensionali.
- 3) Parametro di direzione: mediante esso, l'algoritmo tende ad escludere una buona fetta delle numerose soluzioni che caratterizzano il problema, tuttavia anche questo è un parametro da tarare caso per caso.

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:

- 1) Meccanismi di riproduzione: andando ad inserire ad esempio meccanismi come quelli di mutazione localizzata ai singoli individui.
- 2) 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.

- 3) 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.

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 delle sollecitazioni e negli spostamenti, ma in genere si avrà sempre una forte differenza nell'approssimazione associata ai carichi (nella realtà sempre incogniti).

In conclusione è possibile affermare che, per le applicazioni esaminate in questo elaborato, l'algoritmo è riuscito a prevedere con buona approssimazione i risultati prefissati dal target, anche alla luce dei molti parametri variabili presi in considerazione per la sua elaborazione. In particolare si sottolineano le potenzialità di un algoritmo così formulato, che attraverso un modello strutturale molto semplice, con un algoritmo di facile gestione e comprensione e con lo svantaggio della conoscenza dei soli dati geometrici e di monitoraggio, oltre a qualche essenziale parametro che caratterizza l'opera, è stato possibile arrivare ad una soluzione accettabile, ed ancora migliorabile.

6 Allegati

Viene di seguito riportato il codice che permette di effettuare un'esecuzione per risalire ad una previsione dello sforzo normale, momento flettente e rotazione di una galleria a geometria circolare.

```

direzione=input('direzione')
legge_1A=[i for i in range(int(direzione)-30,int(direzione)+35,5)]
legge_1B=[i for i in range(180+int(direzione)-30,180+int(direzione)+35,5)]
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_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_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_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

```

Figura 95 - Subroutine per la definizione della variazione della fase del carico


```

        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])
Concentrato_tangenziale1=[0 for x in range(1,73)]
if math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2089']/5)>=68:
    r=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2089']/5)-72
else:
    r=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2089']/5)
Concentrato_tangenziale1[r]=1
Concentrato_tangenziale1[r-1]=1
Concentrato_tangenziale1[r-2]=1
Concentrato_tangenziale1[r+1]=1
Concentrato_tangenziale1[r+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:
    w=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2081\u2080']/5)-72
else:
    w=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2081\u2080']/5)
Concentrato_tangenziale2[w]=1
Concentrato_tangenziale2[w-1]=1
Concentrato_tangenziale2[w-2]=1
Concentrato_tangenziale2[w+1]=1
Concentrato_tangenziale2[w+2]=1
Concentrato_tangenziale2.append(Concentrato_tangenziale2[0])
Radiale=pd.DataFrame(np.zeros(73).reshape(73,1))
Tangenziale=pd.DataFrame(np.zeros(73).reshape(73,1))
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(1+math.cos(somma_A),3)
    somma_B=round(2*(math.radians(v*5)+math.radians(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2082']*-1)),4)
    numero_B=round(1-math.cos(somma_B),3)
    somma_C=round(2*(math.radians(v*5)+math.radians(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2083'])),4)
    numero_C=round(math.cos(somma_C),3)
    numero1=Concentrato_radiale1[v]
    numero2=Concentrato_radiale2[v]
    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
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=round(-1*math.cos(somma_A),3)
    else:
        somma_A=round(0.5*(math.radians(q*5)+math.radians(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2084']*-1)),4)
        numero_A=round(math.cos(somma_A),3)
    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=Concentrato_tangenziale1[q]
    numero4=Concentrato_tangenziale2[q]
    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,'\u03B4\u2081']+
        numero4*Generazione_1.loc[e,'\u03B4\u2082']

```

Figura 97- Subroutine per la creazione dei carichi a partire dagli individui della popolazione

```

#Avvio di Sap2000:
mySapObject.ApplicationStart(6,True)
#Importazione del modello:
FileName = 'C:/Users/marin/Desktop/TESI/Geometria Definitiva.s2k'
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,
            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

```

Figura 98 - Subroutine per il calcolo delle sollecitazioni e spostamenti attraverso il p software SAP2000

```

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):
        d.append(b[k])
a.append(a[0])
c.append(c[0])
d.append(d[0])
errore_parziale_momento =[]
peso_momento=1
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*peso_momento)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_M=1/ errore_medio_momento
peso_sforzo_normale=1
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*peso_sforzo_normale)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_N=1/ errore_medio_sforzo_normale
numero_nodi_strumentati_spostamenti=12
peso_rotazione=1
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*peso_rotazione)/numero_nodi_strumentati_spostamenti
Punteggio_R=1/ errore_medio_rotazione
Punteggio=1/(errore_medio_rotazione+errore_medio_sforzo_normale+errore_medio_momento)
Generazione_1.loc[e,'Punteggio']=Punteggio
print(Generazione_1.to_string())

```

Figura 99 - Subroutine per il calcolo del punteggio associato al singolo figlio della famiglia

Ringraziamenti

Questi anni passati al Politecnico di Torino sono stati per me anni di crescita umana, culturale e professionale, che indubbiamente caratterizzeranno la mia vita negli anni a venire. Grazie a questi studi specialistici e al confronto con colleghi e professori ho avuto la possibilità di approfondire molti temi interessanti legati al mondo all'ingegneria civile, e non solo.

Questa esperienza ha avuto il suo culmine con la realizzazione di questo elaborato, grazie al fondamentale sostegno del prof. Gabriele Bertagnoli, che mi ha concretamente supportato e fornito nuovi spunti per la mia tesi, che stimo come esempio di professionalità e capacità di insegnamento, raramente riscontrata durante il mio percorso di studi.

Desidero ringraziare i miei genitori, mia zia Letizia, mia sorella Valeria e mio cognato Nicola, che hanno sempre creduto in me, e hanno fatto il massimo delle loro possibilità per sostenermi e darmi la migliore istruzione didattica e di vita, incoraggiando la mia scelta di andare lontano da casa, con le conseguenze che da essa ne derivano.

Sarò sempre loro debitore.

Ringrazio la mia ragazza e compagna della mia vita, Maria Antonietta, che come sempre è rimasta al mio fianco nonostante le avversità, aiutandomi e sopportandomi, fornendomi sempre un sostegno morale che ha rappresentato il pilastro su cui costruire la mia vita nel passato, nel presente e nel futuro.

Questa esperienza mi ha portato alla conoscenza di molte persone, ma fra tutte spiccano Lella, Giorgio e Maurizio, che mi hanno dimostrato un affetto incomparabile e che per questo stimo. Grazie a loro ho avuto la possibilità di crescere culturalmente e hanno costituito per me una seconda famiglia che mai dimenticherò.

Desidero inoltre ringraziare una mia terza famiglia, molto meno convenzionale delle precedenti, costituita dai miei due fantastici coinquilini Vito e Valerio che considero ormai come fratelli, che mi hanno sempre consigliato e aiutato nei momenti difficili, e soprattutto mi hanno dato la possibilità di affrontare con serenità e spensieratezza, anche nei momenti di semplice quotidianità, questo mio importante percorso universitario.

Non meno importante è stato il supporto di moltissime altre persone, fra cui posso citare Giuseppe, Gerlando, Pietro ed Angelo, che ho imparato a conoscere e stimarli sia dal lato umano che dal lato professionale, con cui ho passato momenti di svago e di relax nelle serate torinesi, e condiviso inoltre moltissime risate, tante ore di studio diurno e notturno impazzendo dietro a progetti, esercizi e dimostrazioni, ma che hanno completato ed arricchito questa piccola esperienza della mia vita.

Bibliografia

- J. Sulem, M. Panet, A. Guenot, “*An analytical solution for Time-dependent displacements in a circular tunnel*”, J. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Vol. 24, No. 3, pp. 155-164. (1987)
- M. Chiarelli, “*L’arte del costruire gallerie*”, UNI Service, 2009
- P.P Rossi, “*Il ruolo del monitoraggio negli interventi di miglioramento e rinforzo dei terreni e delle rocce*”, XIX Convegno Nazionale AGI – Pavia, Sept. 1995
- AJ Powderham, “*An overview of the observational method: development in cut and cover and bored tunneling projects*”, Gèotechnique Vol.44 Issue 4, pp. 619-636, Dec. 1994
- P. Lunardi, “*Progetto e costruzioni di gallerie*”, Hoepli 2010
- M.Mitchell, “*introduzione agli algoritmi genetici*”, Apogeo scientifica 1998
- D.E. Goldberg, “*Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989
- J.H. Holland, “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*”, University of Michigan Press, MIT Press, 1992