UNIVERSITÀ “G. d’ANNUNZIO” DI CHIETI-PESCARA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA E GEOLOGIA
Corso di Dottorato in “Engineering, Earth and Planetary Sciences”
Ciclo XXXVII – PON
Curriculum “Ingegneria Civile” – ICAR/09

COLLEGAMENTI INNOVATIVI PER EDIFICI IN LEGNO IN ZONA SISMICA

Dottorando
Ing. Antonio Tancredi

Tutor
Prof. Ing. Giuseppe Brando

Co- Tutor
Prof. Arch. Maria Giovanna Masciotta
Prof. Ing. Alberto Barontini

Coordinatore
Prof. Ing. Luigi Berardi

INDICE

1 SINOSSI 4
1.1 Contesto della ricerca 4
1.2 Scopi e obiettivi della ricerca 5
1.3 Struttura della tesi 7
2 STATO DELL'ARTE COLLEGAMENTI PER PANNELLI IN CLT 9
2.1 Introduzione 9
2.2 Connessioni tradizionali HD e AB 10
2.3 Connessioni innovative 18
3 CONNESSIONE INNOVATIVA PER PANNELLI IN CLT 30
3.1 Geometria prototipi studiati 30
3.2 Configurazioni parametriche 33
4 MODELLAZIONE FEM 38
4.1 Geometria componenti e materiali adottati 39
4.2 Modellazione contatti, vincoli e carichi applicati 41
4.3 Analisi cicliche 45
5 RISULTATI 47
5.1 Risultati prototipo a semplice curvatura 47
5.1.1 Risultati per BP0 47
5.1.2 Risultati per BP25 51
5.1.3 Risultati per BP50 55
5.1.4 Risultati per BP75 58
5.2 Risultati prototipo a doppia curvatura 61
5.2.1 Risultati per BP0 62
5.2.2 Risultati per BP25 65
5.2.3 Risultati per BP50 69
5.2.4 Risultati per BP75 72
6 CONCLUSIONI 76

7 BIBLIOGRAFIA 79

8 ALLEGATO A: Risultati prototipo a semplice curvatura 83

9 ALLEGATO B: Risultati prototipo a doppia curvatura 179

1 SINOSSI

1.1 Contesto della ricerca

Il presente lavoro di ricerca è stato cofinanziata con risorse del Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020, risorse FSE REACT-EU Azione IV.4 “Dottorati e contratti di ricerca su tematiche dell’innovazione” e Azione IV.5 “Dottorati su tematiche Green”. Durante lo sviluppo di questa tesi è stato possibile collaborare con l’azienda Smartech S.r.l., startup di un’azienda locale che lavora nel settore delle costruzioni in legno Area Legno di D.D.L. S.r.l. con sede a Città Sant’Angelo (Pescara).

Le costruzioni in legno con panelli a strati incrociati, CLT, rappresentano una delle tecnologie costruttive più utilizzate per la realizzazione di strutture lignee in Italia. In queste strutture lo studio della progettazione e poi del dettaglio della tipologia di collegamento, tra i pannelli, è fondamentale per capire il comportamento della struttura quando è soggetta a carichi laterali, come quelli sismici.

Attualmente le soluzioni più diffuse per le connessioni sono gli hold-down (HD) e gli angle-bracket (AB). Questi sistemi vengono utilizzati contemporaneamente, poiché gli HD, solitamente collocati agli estremi del pannello, sono deputati ad assorbire il momento ribaltante derivante dai carichi orizzontali, mentre gli AB sono progettati per resistere alle sollecitazioni di taglio. Inoltre, per prevenire spostamenti relativi, è necessario realizzare connessioni tra i pannelli adiacenti. Le strutture in CLT, realizzate con questa metodologia presentano un certo grado di duttilità e capacità di dissipazione dell’energia, qualità che risiedono principalmente nelle connessioni in acciaio. Queste ultime, infatti, comportandosi in modo inelastico, sono in grado di deformarsi e dissipare energia, mentre il pannello mantiene un comportamento prevalentemente elastico. In sostanza, le connessioni sono realizzate con elementi in acciaio estremamente rigidi e resistenti, che dissipano energia attraverso lo snervamento dei connettori (chiodi/viti) e superando la tensione di rifollamento del legno, causando così danni al pannello.

Negli ultimi anni, accanto alle soluzioni tradizionali, si è registrato un crescente interesse per lo sviluppo di nuove tecnologie di connessione alternative, in particolare in seguito all’ampliarsi dell’uso dei sistemi in CLT. Nella letteratura scientifica, infatti, sono presenti sempre più studi su nuove tipologie di collegamento in acciaio per strutture in CLT, soluzioni che vanno a sostituire completamente le connessioni tradizionali offrendo risultati in termini di risposta sismica superiori agli HD e AB. Gli studi eseguiti su queste innovative tecnologie, oltre che migliorare le capacità sismiche, si focalizzano anche nel trovare soluzioni che possano

semplificare tutta la filiera costruttiva, dalla realizzazione all'installazione dei dispositivi, così da rendere più veloci le operazioni da svolgere in cantiere.

1.2 Scopi e obiettivi della ricerca

Lo scopo di questa tesi è stato quello di andare a studiare e proporre una nuova tipologia di collegamenti in acciaio per le strutture in legno, volendo fornire una soluzione di connessione che rispettasse alcuni principi cardini come:

- innovativa, un'alternativa rispetto alle connessioni maggiormente utilizzate come gli hold-down (HD) e gli angle bracket (AB);
- facile da installare e montare, permettendo così di ottimizzare i tempi in cantiere;
- facile da realizzare, permettendo così di ricorrere alla manodopera specializzata locale.

Lo studio ha voluto analizzare il comportamento che avrebbe il collegamento, quando sottoposto ad azioni sismiche, attraverso analisi numeriche implementate con un software ad elementi finiti, ottenendo, in questo modo, le principali caratteristiche di resistenza, capacità di smorzamento del sistema ed andando ad osservare nel dettaglio come le tensioni e deformazione si distribuivano nei vari elementi.

La soluzione proposta, per cui esiste già un brevetto (Prodotto CONNESSIONI PER PANNELLO DEL TIPO CLT. Domanda di Brevetto per Invenzione Industriale in ITALIA n. 102020000012982 del 29/05/2020. Concesso il 07/07/2022 con il n. 102020000012982 dal Ministero dello Sviluppo Economico), similmente a quelle tradizionali, presenta due sistemi resistenti differenti, uno adatto ad assorbire le sollecitazioni di taglio e l'altro per contrastare il ribaltamento del pannello. Di questa soluzione vengono proposte due soluzioni che si differenziano per il sistema resistente a taglio, del quale sono state studiate due geometrie differenti.

Oltre alle caratteristiche elencate prima si è cercato di realizzare una connessione che rispecchiasse a pieno i principi di:

- semplificazione tecnico-costruttiva del manufatto;
- semplificazione di assemblaggio/montaggio del componente;
- riduzione del numero di connettori utilizzati.

Per analizzare il comportamento delle soluzioni proposte, sono state condotte delle analisi parametriche. In questo modo si è potuto osservare come, variando alcune caratteristiche, sia geometriche che non, il comportamento del sistema venisse influenzato.

La denominazione utilizzata per indicare i due prototipi prende spunto proprio dalla differente geometria del sistema resistente a taglio, ed è la seguente:

- semplice curvatura;
- doppia curvatura.

Per entrambi i prototipi sono stati analizzati tre parametri, due che riguardavano il sistema resistente a trazione (precarico e inclinazione delle barre) e uno la geometria del sistema resistente a taglio.

Per il primo prototipo sono stati analizzati:

- quattro livelli di precarico delle barre (BP);
- quattro livelli di inclinazione delle barre (BI);
- sei livelli del parametro della connessione a taglio (SC).

Questo ha portato ad avere uno numero totale di configurazioni studiate pari a novantasei. In Figura 1a viene riportato lo schema generale di tutti i parametri e i livelli studiati, mentre in Figura 1b è stato riportato il diagramma organizzativo di tutte le ventiquattro configurazioni studiate per ogni singolo livello di precarico.

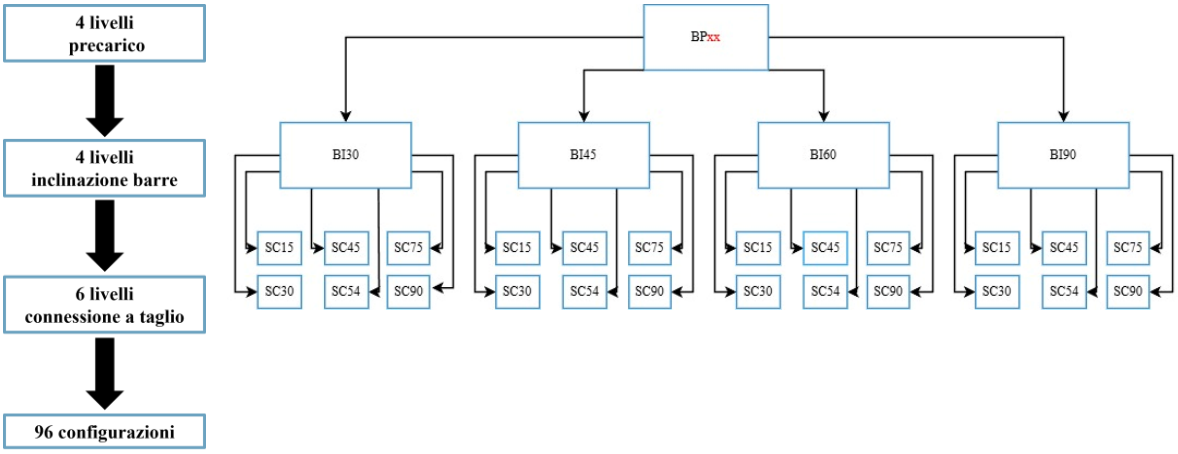


Figura 1 Rappresentazione delle configurazioni studiate per il prototipo a semplice curvatura: a) schema generale di tutte le configurazioni: b) schema delle configurazioni studiate per singolo livello di precarico

L'analisi del secondo prototipo è stata condotta prendendo in considerazione:

- quattro livelli di precarico delle barre (BP);
- quattro livelli di inclinazione delle barre (BI);
- tre livelli del parametro della connessione a taglio (SCr).

La Figura 2a rappresenta lo schema complessivo di tutti i parametri analizzati e del numero di livelli considerati, per ciascun parametro, determinando così un totale di quarantotto configurazioni studiate. In Figura 2b è stato riportato il diagramma organizzativo di tutte le dodici configurazioni ottenute per ogni singolo livello di precarico.

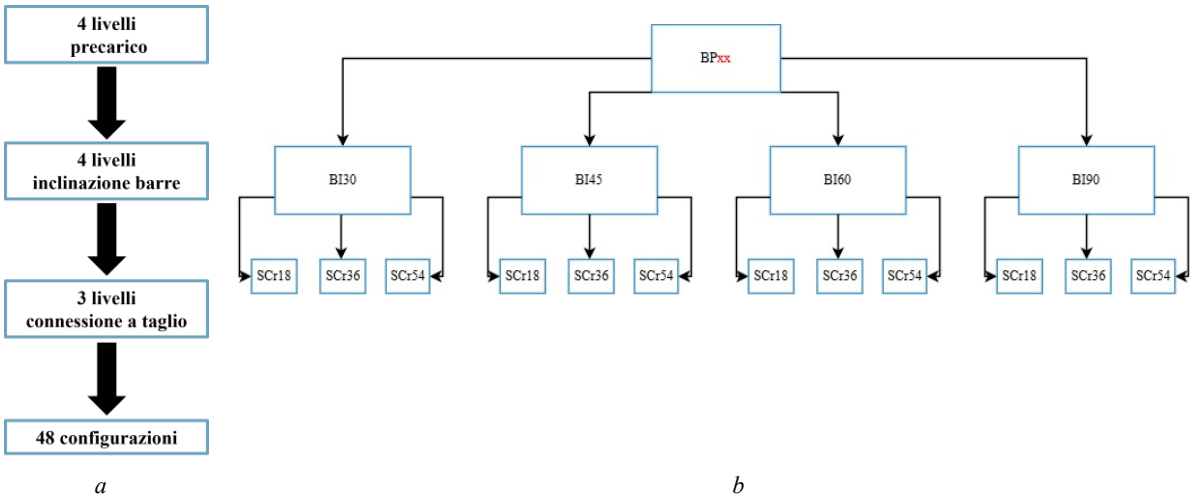


Figura 2 Rappresentazione delle configurazioni studiate per il prototipo a doppia curvatura: a) schema generale di tutte le configurazioni: b) schema delle configurazioni studiate per singolo livello di precarico

Per tutte le configurazioni studiate dei due prototipi (in totale centoquarantaquattro) sono state ricavati i valori di resistenza massima e coefficiente di smorzamento viscoso, permettendo quindi di analizzare come i parametri presi in considerazione influenzassero la risposta del sistema. Contemporaneamente a questi risultati è stato osservato come si distribuivano le tensioni/deformazioni sia negli elementi in acciaio che nella parete in legno. Questo approccio ha permesso di iniziare a delineare delle linee guida utili per la progettazione ottimale del prototipo, identificando le configurazioni che offrono un equilibrio tra resistenza e smorzamento. Inoltre, lo studio ha messo in luce come la combinazione dei parametri influisca sul comportamento globale del sistema.

Sebbene le analisi condotte abbiano fornito risultati significativi, ulteriori approfondimenti potrebbero essere utili per affinare le indicazioni progettuali emerse e valutarne l'applicabilità a condizioni operative. Tuttavia, i risultati ottenuti costituiscono un primo passo importante verso lo sviluppo di linee guide da utilizzare per la corretta progettazione dei prototipi studiati.

1.3 Struttura della tesi

La presente tesi è articolata in diversi capitoli e allegati, ciascuno finalizzato a delineare i vari aspetti affrontati nel lavoro di ricerca. Dopo un'introduzione generale che contestualizza il problema studiato e ne evidenza la rilevanza in campo ingegneristico, vengono presentati in dettaglio gli elementi più importanti dell'analisi condotta. I capitoli successivi sviluppano progressivamente la metodologia adottata, la modellazione numerica, i risultati ottenuti e la loro interpretazione. Gli allegati forniscono approfondimenti specifici sui risultati delle varie configurazioni studiate. Di seguito, viene illustrato sinteticamente il contenuto di ciascun capitolo:

- Capitolo *2 STATO DELL'ARTE COLLEGAMENTI PER PANNELLI IN CLT*.

In questo capitolo è stato riportato lo stato dell'arte dei collegamenti esistenti per i pannelli in CLT, andando ad analizzare gli studi sul comportamento sismico sia delle connessioni tradizionali che delle soluzioni innovative che negli ultimi decenni sono state proposte come alternativa a quelle esistenti.

- Capitolo *3 CONNESSIONE INNOVATIVA PER PANNELLI IN CLT.*

Nel terzo capitolo sono state descritte le caratteristiche principali e le geometrie dei due prototipi proposti. Sono stati quindi analizzati i differenti sistemi resistenti che compongono la connessione descrivendone la peculiare geometria e installazione. Successivamente sono stati descritti i parametri analizzati per ognuna delle due configurazioni.

- Capitolo *4 MODELLAZIONE FEM*.

Nel quarto capitolo sono state analizzate le principali caratteristiche del modello FEM realizzato, descrivendo come queste sono state modellate nel software Abaqus CAE. Andando ad analizzare le ipotesi di partenza fatte per realizzare il modello e l'iter seguito per modellare/implementare tutte le caratteristiche (i.d. caratteristiche materiali, descrizione dell'interazione tra le superfici a contatto, applicazione carichi e protocollo di carico) del sistema. Successivamente sono state descritte le analisi cicliche eseguite per tutte le configurazioni. Esponendo la procedura utilizzata per ricavare i valori di resistenza massima, del coefficiente di smorzamento viscoso e come sono stati osservati gli sviluppi di tensione e deformazioni che si registravano nelle barre di acciaio e nel pannello in legno.

- Capitolo 5 RISULTATI.

Vengono riportati i risultati delle analisi eseguite differenziando in base ai due prototipi e in base al livello di precarico. Analizzando i risultati in termini di andamento della resistenza massima del sistema, del coefficiente di smorzamento e di analisi tensionale e deformativa delle barre e del danneggiamento del pannello a fine analisi

- Capitolo 6 CONCLUSIONI.
- ALLEGATO A: Risultati prototipo a semplice curvatura.

Vengono riportati i risultati di tutte e novantasei le configurazioni studiate per il prototipo a semplice curvatura (grafici andamento ciclico forza-spostamento, stato tensionale e deformativo medio della barra e danneggiamento del pannello in CLT).

- ALLEGATO B: Risultati prototipo a doppia curvatura.

Vengono riportati i risultati di tutte e quarantotto le configurazioni studiate per il prototipo a doppia curvatura (grafici andamento ciclico forza-spostamento, stato tensionale e deformativo medio della barra e danneggiamento del pannello in CLT).

2 STATO DELL'ARTE COLLEGAMENTI PER PANNELLI IN CLT

2.1 Introduzione

Negli ultimi anni, le tecnologie di pannelli in legno a strati incrociati (Cross-Laminated Timber), o X-LAM, stanno ricevendo un crescente interesse come soluzione sostenibile e a basso impatto per la costruzione di edifici. L'X-LAM è un sistema costruttivo basato su pannelli bidimensionali in legno massiccio incrociato laminato, che offre numerosi vantaggi rispetto ai metodi di costruzione tradizionali. Sebbene sia una tecnologia relativamente recente, è già stata impiegata in molte parti del mondo per realizzare edifici residenziali e commerciali multipiano. Il pannello in CLT è composto dalla sovrapposizione di più strati di tavole, incollate fra loro, in modo tale che la fibratura di ogni singolo strato sia ortogonale rispetto agli strati adiacenti. Il numero degli strati varia da un minimo di tre fino ad arrivare a sette o oltre, mantenendo sempre la configurazione alternata della fibratura e facendo sì che il primo e l'ultimo strato presentino una disposizione delle fibre parallela. Un edificio in CLT è configurato come una struttura a scatola composta da pannelli verticali, che presentano un comportamento principalmente a lastra quindi sollecitati da sforzi nel piano, e pannelli orizzontali, dove il comportamento è assimilabile a quello di una piastra quindi sollecitato da sforzi sia nel piano che fuori piano. Nel processo di progettazione delle strutture in CLT, le connessioni tra i pannelli sono cruciali per la trasmissione dei carichi orizzontali, poiché devono garantire un adeguato trasferimento del carico tra i pannelli adiacenti. Sebbene siano disponibili molte soluzioni a questo scopo, la tipologia di connessione da utilizzare dipende in gran parte dal tipo di assemblaggi da collegare (e.g. pannello verticale-pannello orizzontale, parete-parete, pannello orizzontale-pannello orizzontale, ecc.). Mentre il flusso dei carichi gravitazionali viene trasmesso attraverso il contatto legno-legno, tra i pannelli ai vari piani, e a quello pannello-fondazione, al piano terra, per resistere ai carichi orizzontali è necessaria la presenza di elementi di connessione in grado di assorbire tali sollecitazioni. Le soluzioni principali, oggigiorno maggiormente utilizzate, sono gli Hold-Down (HD) e gli Angle-Bracket (AB). Entrambe le soluzioni vengono utilizzare contemporaneamente in quanto gli HD hanno il compito di assorbire il momento ribaltante generato dai carichi orizzontali, data la loro funzione vengono solitamente posizionati agli estremi del pannello, mentre gli AB devono resistere alle sollecitazioni taglianti. Sia gli hold-down che gli angle-bracket sono elementi in acciaio e presentano una forma ad "L" dove i primi sono caratterizzati da un ramo verticale di lunghezza molto superiore a quello del ramo che si collega al solaio, mentre gli AB hanno delle dimensioni del tratto verticale e del tratto orizzontale paragonabili tra loro (Figura 3).

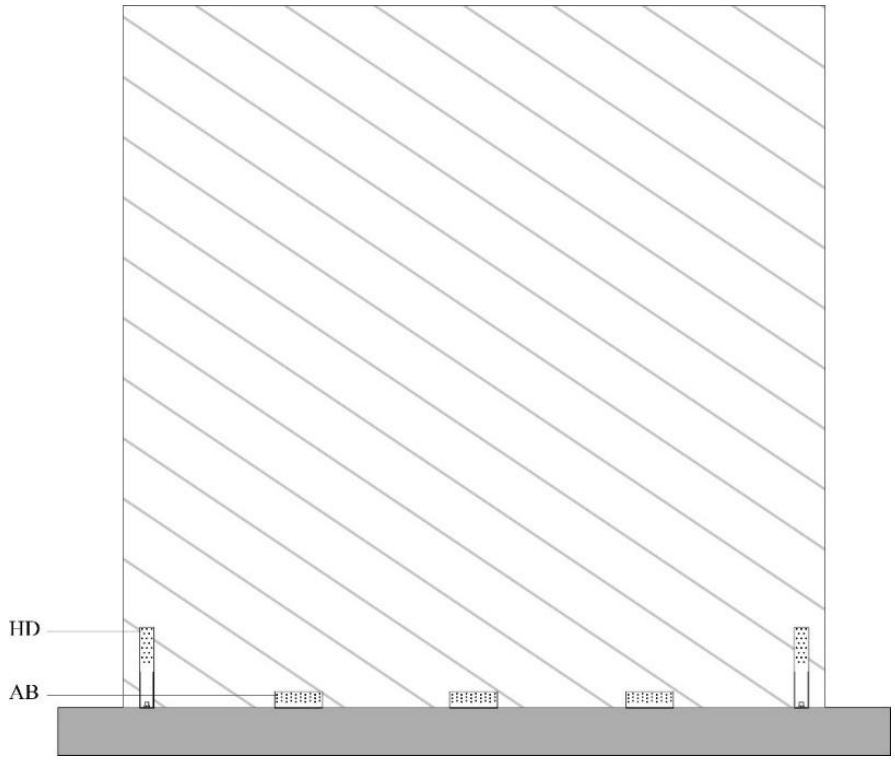


Figura 3 Rappresentazione posizionamento hold-down e angle-bracket

Ulteriormente a questi sistemi di connessione tradizionali è necessario andare a realizzare delle connessioni tra i pannelli adiacenti per impedire gli spostamenti relativi.

Le strutture in CLT realizzate in questo modo presentano una certa duttilità e capacità dissipativa che risiede prevalentemente nelle connessioni in acciaio che hanno un comportamento inelastico, in grado di deformarsi e di dissipare energia, mentre il pannello in legno mantiene un comportamento elastico. Le connessioni sono quindi realizzate con elementi in acciaio molto rigidi e resistenti portando a dissipare energia attraverso lo snervamento dei connettori (chiodi/viti) e al superamento della tensione di rifollamento del legno, andando a danneggiare il pannello in legno.

Oltre alle connessioni tradizionali descritte prima, negli ultimi anni, grazie anche al sempre maggiore interesse scaturito dall'utilizzo dei sistemi in CLT, lo studio di nuove tipologie di connessioni, alternative a quelle tradizionali, ha preso sempre più piede.

2.2 Connessioni tradizionali HD e AB

Le connessioni tradizionali, come gli hold-down e gli angle-bracket, rappresentano da tempo gli elementi chiave per garantire la sicurezza e la stabilità degli edifici in Cross-Laminated Timber (CLT). Questi dispositivi, realizzati fissati tramite chiodi, viti o bulloni, sono progettati per trasferire le sollecitazioni tra i vari pannelli strutturali e le fondazioni, contribuendo al comportamento scatolare dell'edificio. In particolare, gli hold-down resistono alle sollecitazioni

di trazione generate dai carichi orizzontali, mentre gli angle-bracket assorbono le forze di taglio, limitando gli spostamenti relativi tra i pannelli.

Numerosi studi sperimentali e numerici hanno approfondito il comportamento di queste connessioni sotto carichi statici e ciclici, evidenziando il loro ruolo cruciale nella dissipazione dell'energia durante eventi sismici. Questi studi si concentrano non solo sulle prestazioni strutturali e sulla capacità di plasticizzazione, ma anche sull'influenza dei dettagli costruttivi, come la disposizione e la quantità dei connettori, sulla risposta globale della struttura.

Per quanto riguarda lo studio delle connessioni meccaniche per strutture in legno CLT significativo è lo studio condotto da Calderoli et al. [1] dove viene indagato il comportamento di una parete in CLT (Figura 4, composta da 3 strati, avente uno spessore di 135 mm, un legno GL24h) e connessioni metalliche poste ad ogni livello realizzate con hold-down e angle-bracket chiodate ai pannelli in legno.

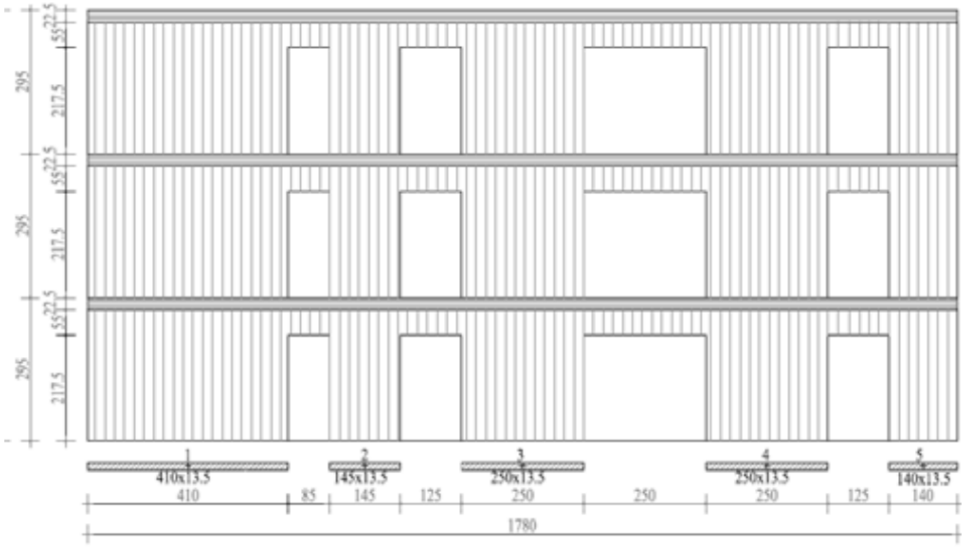


Figura 4 Parete di riferimento, fonte [1])

In quest'articolo, gli autori hanno studiato, attraverso analisi di push-over, l'influenza che quattro parametri avevano nel comportamento della parete. Il primo parametro studiato è la deformazione ultima del legno in compressione ortogonale, variando questo parametro in un range compreso tra 1% e 5%, è stato osservato che in tutti i casi la crisi è sempre ottenuta per il raggiungimento di deformazione ultima degli elementi tesi. Dimostrando che questo parametro non risulta determinante nella risposta globale della parete (Figura 5a).

Il secondo parametro indagato è la deformazione ultima degli elementi tesi, variando il parametro tra 1% e il 3%. In questo caso, l'analisi ha evidenziato che il variare di questo parametro porta ad un incremento di duttilità e resistenza del sistema. Le curve di push-over mostrano un forte degrado di rigidezza dopo aver raggiunto la resistenza massima a causa del raggiungimento del valore ultimo di resistenza e deformazione ultima nella sezione di

connessione del maschio più sollecitato. La crisi di un singolo maschio non genera il collasso dell'intera parete, infatti le sollecitazioni agenti vanno a ridistribuirsi sugli elementi che sono ancora in grado di resistere (Figura 5b).

Il terzo parametro analizzato è il contributo che gli hold-down possono avere se viene considerata oltre che la resistenza a trazione anche quella a compressione. Le analisi sono state condotte nelle ipotesi di hold-down con resistenza nulla o con resistenza pari a quella massima, calcolata considerando la sezione trasversale dell'hold-down. Le curve hanno mostrato un incremento trascurabile in termini di resistenza nel caso in cui si considerano gli hold-down resistenti anche a compressione (Figura 5c).

Il quarto parametro preso in considerazione riguarda la resistenza a compressione del legno nella zona di contatto (legno-legno) facendola variare tra il valore della resistenza ortogonale ($f_{c,90,d}$) o parallela ($f_{c,0,d}$) alla fibratura. Anche in questo caso è stato osservato un incremento non significativo della resistenza massima, dimostrando che la crisi è governata dal raggiungimento della deformazione ultima degli elementi tesi nella zona di connessione (Figura 5d).

È quindi possibile confermare che il comportamento strutturale delle strutture in CLT in campo plastico è influenzato esclusivamente dalle capacità dissipative dei sistemi di connessione.

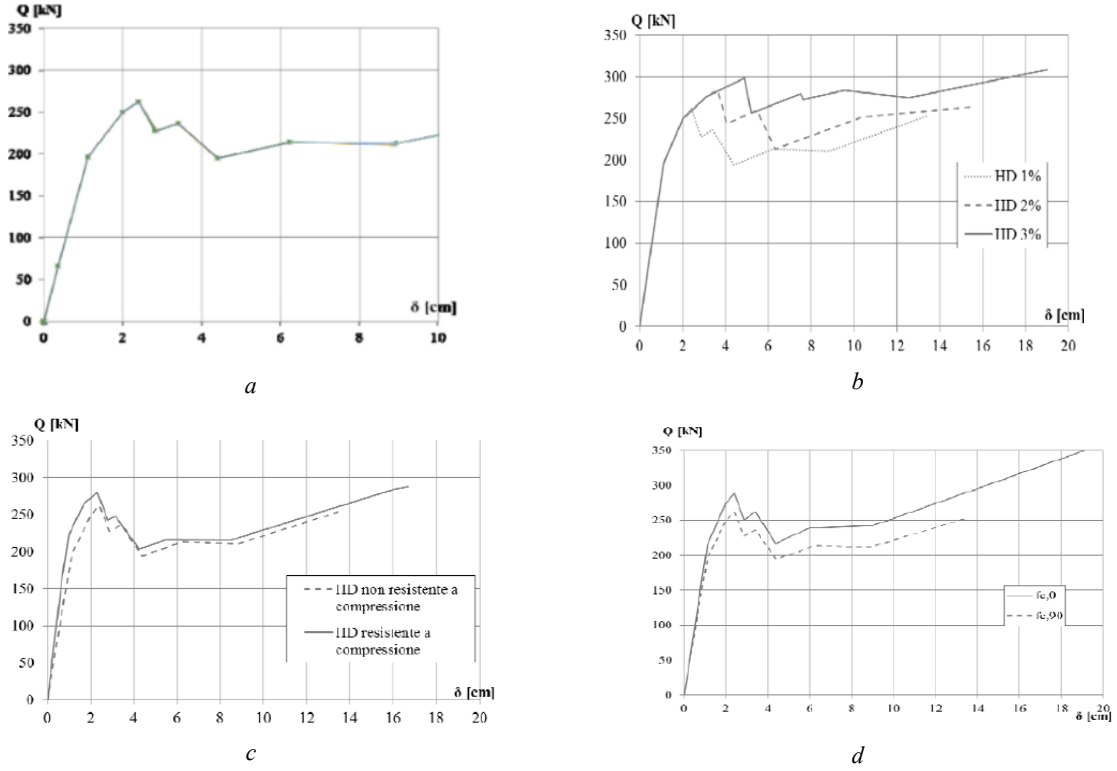


Figura 5 Curve di push-over: a) al variare della deformazione ultima del legno; b) al variare della deformazione ultima dell'acciaio; c) considerando la resistenza a compressione degli HD; d) al variare della resistenza del legno compresso. Fonte [1].

Considerando che il comportamento di queste connessioni risulta influenzare fortemente la risposta globale della struttura, in letteratura sono frequenti studi sia numerici che di prove sperimentali su hold-down e angle-bracket sottoposti a carichi ciclici per osservare come varia il comportamento delle connessioni quando soggette a vari cicli di carico-scarico.

Gavric et al. 2011 [2] hanno condotto prove cicliche di trazione e di taglio sia su hold-down che angle-bracket (Figura 6).

Lo studio ha mostrato come sia gli hold-down che gli angle-bracket mostrano una bassa capacità di dissipazione energetica con un significativo degrado di resistenza e rigidezza, ma una buona capacità di deformazione e quindi una discreta duttilità. La capacità dissipativa dell'hold-down è dovuta al comportamento plastico dei chiodi lasciando la parte metallica del piatto in campo elastico. Questo porta ad avere un fenomeno di pinching, visibile nei grafici, dovuto principalmente all'ovalizzazione dei fori dei chiodi, che nei momenti di inversione di carico devono scorrere nei fori. Analogamente per i test eseguiti sugli angle-bracket, è stato possibile osservare un buon comportamento sia quando soggetti a trazione che a taglio. Quando soggetti a trazione la rottura è stata osservata nel piatto di base nella zona del bullone che porta ad un repentino calo della resistenza. Comportamento differente è stato osservato quando l'angle-bracket viene sottoposto a carichi ciclici di taglio, infatti in questo caso una leggera ovalizzazione del piatto d'acciaio intorno al bullone poco significativa per il comportamento complessivo della connessione mentre la rottura è avvenuta con lo svilupparsi di due cerniere plastiche nei chiodi.

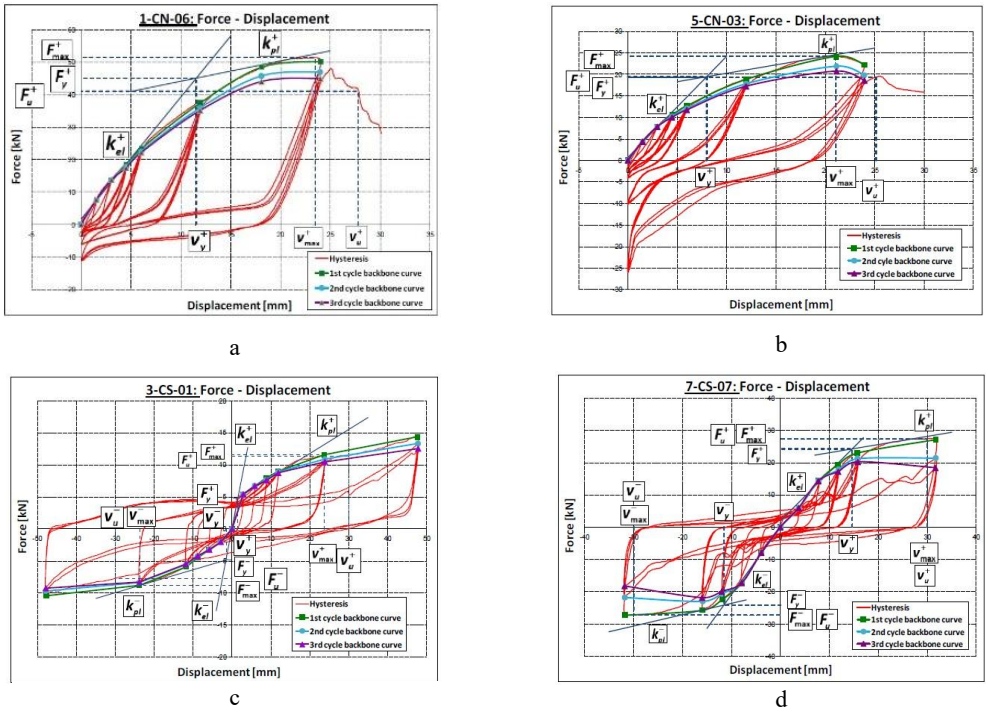


Figura 6 Cicli di isteresi: a) hold-down soggetto a trazione; b) angle-bracket soggetto a trazione; c) hold-down soggetto a taglio; d) angle-bracket soggetto a taglio, fonte [2].

Successivamente alla campagna sperimentale, Gavric et al. 2012 [3] hanno eseguito un'analisi approfondita del comportamento sismico dei sistemi di pareti in CLT andando a combinare i risultati ottenuti dalle analisi sperimentali, condotte in lavori precedenti ([2]), con i dati ottenuti dal modello numerico studiato. Il lavoro si è concentrato sull'osservazione dettagliata delle connessioni tradizionali e dei pannelli in CLT quando sottoposti ad azioni sismiche. Il programma di prove sperimentali, svolto presso l'istituto CNR-IVALSA, ha incluso una serie di test ciclici su connessioni e pannelli, andando ad esaminare vari setup e tipologie di connettori. Questi test hanno fornito dati cruciali per la calibrazione di un modello numerico avanzato, dove con l'implementazione di molle isteretiche non lineari è stato possibile replicare il comportamento ciclico delle connessioni. Questo modello, implementato nel software di analisi agli elementi finiti Abaqus, ha permesso di simulare in modo affidabile le prestazioni sismiche delle strutture in CLT e di confrontarle con i risultati sperimentali. Le molle, utilizzate per rappresentare le connessioni metalliche, sono state calibrate basandosi su curve forza-spostamento mirando a riflettere il comportamento reale delle connessioni in termini di rigidezza, resistenza e capacità di dissipare energia. Queste molle hanno permesso di modellare con precisione la risposta dei pannelli alle sollecitazioni sismiche, dimostrando una buona corrispondenza tra i risultati delle analisi numeriche e quelli sperimentali. La validazione del modello confermato che è in grado di prevedere con accuratezza la risposta sismica, fornendo quindi un utile strumento per la progettazione di edifici in CLT.

Numerosi sono anche gli studi con prove sperimentali su pareti in CLT con diverse configurazioni di carico o connessione per analizzarne la diversa risposta, come ad esempio fatto da Hummel et al. 2013 [4]. In questo studio gli autori hanno presentato i risultati di prove sperimentali sul comportamento delle pareti in CLT sottoposte a carico laterale. Lo studio esplora come le condizioni di carico verticale, quelle di ancoraggio e i protocolli di carico influenzano la risposta sismica del sistema. Vengono presentati i risultati di test di pareti sottoposte sia a carico monotono che ciclico andando ad analizzare parametri come la resistenza massima a taglio, la duttilità e il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente. Lo studio offre importanti approfondimenti su come la risposta delle pareti in CLT, sottoposte a carichi ciclici, è influenzata dai dettagli costruttivi e dalle configurazioni di connessioni utilizzate.

Fragiacomo et al. 2011 [5] si concentrano sulla progettazione elastica e duttile degli edifici multipiano in legno massico (CLT) in zone sismiche. L'attenzione si focalizza sull'applicazione di metodologie di analisi sismica avanzate, quali l'analisi modale e l'analisi statica non lineare (pushover). Queste analisi sono impiegate per affrontare tematiche chiave come la modellazione delle pareti e delle connessioni in CLT, la valutazione della rigidezza delle

connessioni, e la rappresentazione schematica dei pannelli di pavimento. Gli autori mettono in evidenza come la flessibilità delle connessioni, inclusi dispositivi di fissaggio come gli hold-down e gli angle-bracket, sia cruciale per una corretta stima dei periodi di vibrazione degli edifici. Inoltre, vengono presentati principi fondamentali di progettazione in capacità, mirati a garantire meccanismi di rottura duttili nelle strutture in CLT sotto azioni sismiche. I meccanismi di rottura duttile sono descritti come caratterizzati dalla plasticizzazione dei connettori dei pannelli adiacenti e tra pannelli e fondazione, enfatizzando l'importanza di progettare questi elementi per sopportare sovraccarichi significativi durante eventi sismici.

Matos et al. [6] hanno effettuato una serie di test quasi-statici su un edificio in legno lamellare incrociato di due piani. Gli obiettivi principali della ricerca erano di valutare la risposta globale della struttura, analizzare il comportamento delle pareti di taglio e dei connettori (HD, AB), e studiare la risposta in frequenza della struttura durante i test.

Durante questi test, i carichi laterali sono stati applicati ai piani dell'edificio, inducendo torsione nella struttura. È stato fatto variare il numero e la disposizione dei connettori tra i test, ma si è prestata attenzione a non sovrapporre gli effetti dei diversi connettori metallici, che sono stati collocati solo nelle pareti di taglio in CLT per ogni direzione di carico. Dai risultati dei test, la direzione longitudinale ha mostrato un comportamento più rigido rispetto alla direzione trasversale, dove è stato osservato un maggiore slittamento (sliding) nella direzione longitudinale e un ribaltamento (rocking) maggiore nella direzione trasversale. Questa ricerca indaga il comportamento strutturale di edifici in CLT sotto carichi laterali, con particolare attenzione al ruolo critico dei connettori metallici e alle differenze di comportamento tra le direzioni di carico, essenziali per la progettazione sismica di edifici in legno.

Sono presenti in letteratura anche studi sull'influenza che sia i collegamenti che la presenza di aperture hanno sul comportamento del pannello. Ad esempio Awad et al. del 2016 [7] studiano in dettaglio il comportamento delle pareti in legno lamellare incrociato sottoposte a carichi ciclici confrontando i risultati ottenuti da test sperimentali, eseguiti in laboratorio presso l'Università di Tokyo, con analisi sia analitica che con i risultati ottenuti da un modello ad elementi finiti. I test sperimentali hanno messo in evidenza come i pannelli in CLT diventino più rigidi e fragili man mano che la differenza tra l'area totale del pannello e quella delle aperture aumenta, con grandi aperture che causano concentrazioni di stress negli spigoli del pannello, dove avviene la rottura quando si raggiunge la massima tensione nello strato interno. Parallelamente, è stato sviluppato un modello agli elementi finiti per fornire indicazioni su come calcolare la rigidezza e il comportamento elastico dei pannelli di CLT sotto carico laterale Questo modello ha confermato che la presenza di aperture influisce significativamente sulla

resistenza e sulla rigidezza dei pannelli. L'analisi ha mostrato che i pannelli in CLT possono avere prestazioni adeguate in condizioni sismiche, a condizione che le connessioni e le configurazioni delle aperture siano progettate e integrate correttamente nel sistema di pareti portanti.

Un importante progetto di ricerca per quanto riguarda lo studio delle strutture in CLT è rappresentato dal Progetto SOFIE (Sistema Costruttivo Fiemme), condotto da CNR-IVALSA e dalla Provincia Autonoma di Trento, durante il quale sono state condotte delle intensive prove sperimentali per studiare i pannelli in CLT e le varie connessioni utilizzate ([8], [9], [10], [11]). In particolare, il progetto è cominciato con la realizzazioni di prove monotone e cicliche su semplici pareti, di dimensioni 2.95x2.95 m, con diverse configurazioni, andando a variare le tipologie di connessioni adottate (hold-down e angle-bracket), il carico verticale applicato alla parete e la presenza o meno di aperture nella parete. Andando ad osservare, dai risultati ottenuti, come la progettazione e la disposizione delle connessioni influenza significativamente il comportamento della parete. Il danno risulta essere concentrato in porzioni della parete portando quindi ad avere rotture locali, dove il pannello si comporta come elemento rigido, mentre i connettori come elementi duttili, andando a dissipare l'energia.

Dopo l'analisi su singoli pannelli in CLT, lo studio è proseguito con la realizzazione di un modello, a scala reale, di un edificio di tre piani andando ad osservare il comportamento della struttura attraverso una tavola vibrante con un solo grado di libertà, applicando gli accelerogrammi di tre diversi terremoti. Sono stati realizzati tre diversi modelli dell'edificio variando le dimensioni delle aperture del piano terra, per la progettazione delle varie connessioni, data la regolarità dell'edificio in pianta e in elevazione, le sollecitazioni di progetto sono state calcolate attraverso il metodo delle forze statiche equivalenti adottando però un fattore di comportamento pari ad uno. Definendo il livello di collasso come la rottura di uno o più hold-down (rottura dei chiodi, viti o piatto in acciaio), dai risultati dei test, gli autori hanno potuto osservare che solo nei casi con fattori di scala, applicati agli accelerogrammi, più elevati sono stati registrati danni significativi. Dai risultati ottenuti e prendendo come riferimento un valore di PGA pari a 0.35g, valore di riferimento per zone ad elevata sismicità in Italia, è stato ricavato un fattore di comportamento pari a 3.4. Successivamente, il progetto SOFIE è proseguito con lo studio su una tavola vibrante con tre gradi di libertà di un edificio, sempre a scala reale, di sette piani. In questo caso, per il calcolo delle forze statiche equivalenti è stato adottato un fattore di comportamento pare a tre. Dai test è stato possibile osservare come in nessun caso è stato registrato un danno pari alla definizione di collasso della struttura che era stato stabilito. Permettendo così di definire il comportamento delle strutture in CLT sotto azioni

sismiche e ritenendo adeguato un fattore di comportamento, per questo genere di strutture, pari a tre.

2.3 Connessioni innovative

Nella panoramica delle costruzioni in legno, l'innovazione nei sistemi di collegamento rappresenta una delle aree più dinamiche e cruciali per l'evoluzione del settore. Con l'incremento dell'uso del legno in applicazioni strutturali complesse e ad alte prestazioni, come quelle richieste in zone sismiche, la tradizionale carpenteria del collegamento legno-legno spesso non basta più a soddisfare le esigenze di sicurezza, durabilità e flessibilità progettuale. Di conseguenza, la ricerca si è orientata verso lo sviluppo di soluzioni innovative che possano superare i limiti dei collegamenti tradizionali e rispondere meglio alle sfide moderne.

Questi nuovi sistemi di collegamento mirano a ottimizzare l'efficienza meccanica, migliorare la capacità di dissipazione energetica durante gli eventi sismici, ridurre il tempo di montaggio e minimizzare l'impatto visivo delle connessioni. L'innovazione in questo campo include l'introduzione di connettori metallici avanzati, tecniche di assemblaggio o fissaggio che, in alcuni casi, posso essere sofisticate.

Tra gli aspetti più rivoluzionari dei collegamenti innovativi è la loro capacità di integrare funzionalità aggiuntive. Ad esempio, alcuni sistemi sono progettati per facilitare l'assemblaggio modulare o supportare durante le fasi di realizzazione. Questi progressi non solo migliorano la sostenibilità delle costruzioni in legno, ma offrono anche nuova possibilità per la progettazione architettonica e strutturale.

Inoltre, i collegamenti innovativi giocano un ruolo fondamentale nel migliorare le prestazioni sismiche delle strutture in legno. Sistemi come i connettori a taglio o di ancoraggio, per il ribaltamento delle pareti, migliorati possono aumentare in modo significativo la resistenza e la duttilità delle connessioni, che rappresentano elementi fondamentali per resistere alle sollecitazioni sismiche. La ricerca in questo ambito è spesso accompagnata da test sperimentali e simulazioni numeriche avanzate, che aiutano a comprendere il comportamento complesso di questi nuovi sistemi sotto vari tipi di carico.

Una delle soluzioni innovative per le connessioni per i pannelli in CLT è rappresentato dagli XL-stub ([12], [13]) Figura 7, che è una tipologia di collegamento dissipativo che può sostituire le connessioni tradizionali (HD e AB). La connessione è stata ideata per poter sfruttare le caratteristiche dissipative dell'acciaio, per fare questo, il piatto metallico viene sagomato in modo da poter concentrare le deformazioni plastiche in una determinata sezione. Gli XL-stub presentano il piatto orizzontale a forma di clessidra permettendo il completo impiego plastico del profilo, evitando la concentrazione delle deformazioni nella sezione di attacco tra piatto orizzontale-verticale e nella sezione del piatto in corrispondenza dei bulloni.

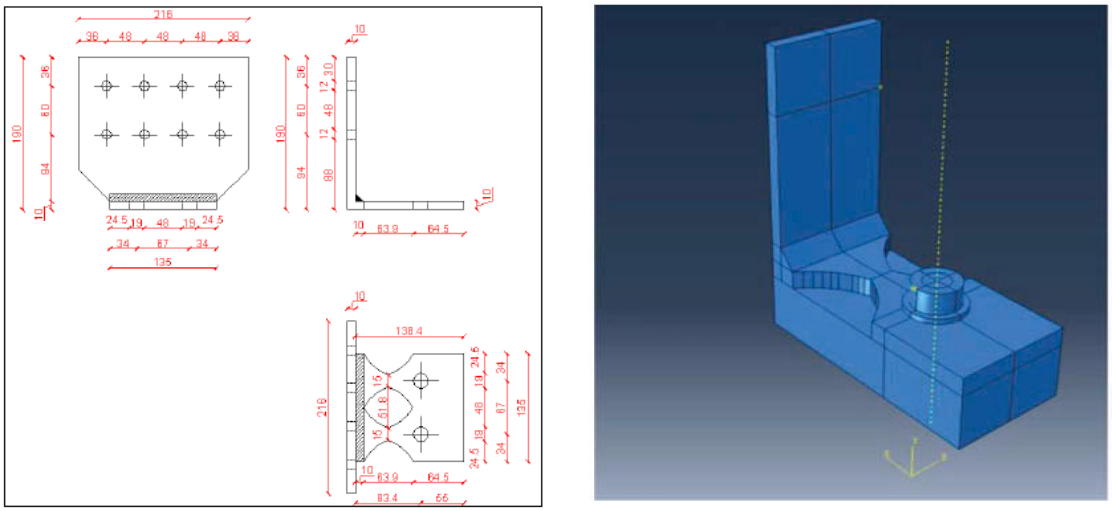


Figura 7 Geometria e modello FEM XL-stub, fonte ([12], [13])

Per studiare il comportamento della connessione sono state condotte delle prove sperimentali sottoponendola a prove di carico monotone e cicliche con ampiezza costante (15, 25 e 30 mm) e con ampiezza variabile. In particolare, cinque coppie di XL-stub sono stati testati, queste sono state sottoposte ad una prova di trazione monotona, tre prove di trazione cicliche con ampiezza costante e una prova ciclica ad ampiezza variabile. Le prove sono state condotte in controllo di spostamento, con frequenza pari a 0.01 Hz, per le prove cicliche ad ampiezza costante, cui corrisponde una velocità variabile 0.3 mm/s - 0.6 mm/s in funzione dell'ampiezza ciclica, mentre per le prove cicliche ad ampiezza variabile è stata impiegata una velocità variabile di 0.5 mm/s – 0.9 mm/s mentre per le prove monotone è stata adottata una velocità costante pari a 0.025 mm/s.

Il collasso del collegamento, per tutte le prove cicliche, è stato raggiunto in corrispondenza dell'attacco piatto orizzontale-piatto verticale. La rottura ha interessato progressivamente la larghezza e lo spessore del piatto orizzontale in corrispondenza della saldatura, con perdita di resistenza, rigidità e capacità di dissipazione prima del collasso. Le curve dei cicli di isteresi dei test di carico ad ampiezza costante indicano un andamento di tipo plastico-incrudente, senza evidenziare fenomeni di pinching permettendo in questo modo di avere un elevato valore di energia dissipata dal sistema per tutti i cicli, Figura 8.

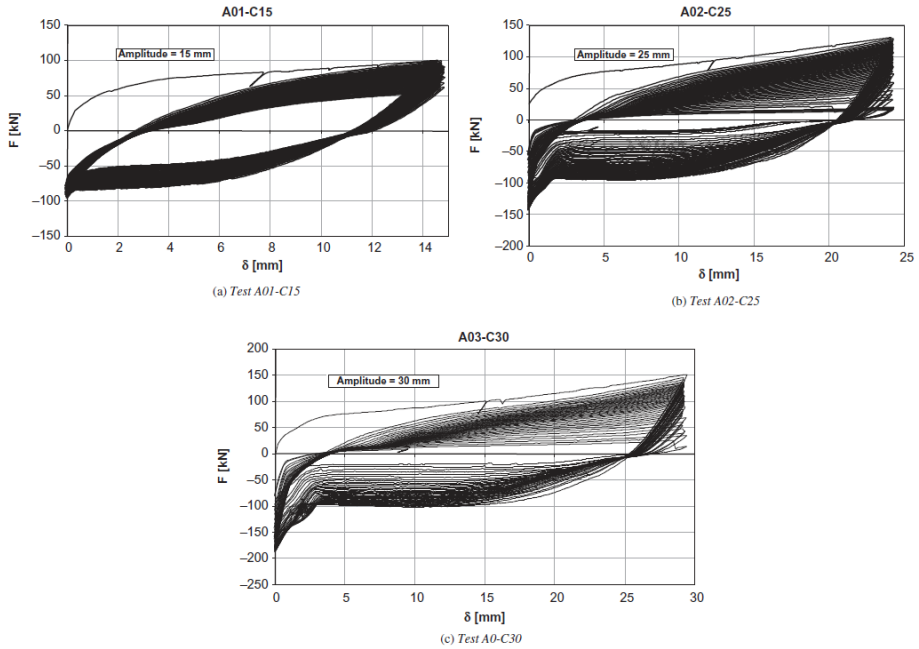


Figura 8 Cicli di isteresi ad ampiezza costante, fonte [13]

Successivamente gli autori hanno confrontato la curva d'inviluppo dei cicli ricavata attraverso un modello ad elementi finiti del XL-stub con l'inviluppo ricavato dallo studio di una connessione tradizionale (hold-down). In questo modo è stato possibile evidenziare come queste connessioni mantengono un comportamento molto simile fino al raggiungimento della resistenza massima degli hold-down, successivamente gli hold-down sono caratterizzati da una diminuzione di resistenza (softening) mentre gli XL-stub presentano un ramo incrudente positivamente Figura 9.

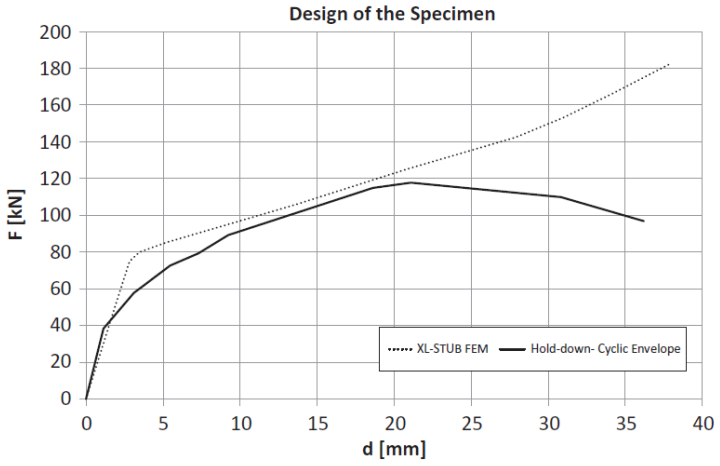


Figura 9 Confronto curva d'inviluppo XL-stub e hold-down, fonte [13]

Un'altra connessione innovativa è il sistema X-RAD ([14], [15], [16], [17], [18], [19]), collegamento di tipo dissipativo che va a sostituire sia gli hold-down che gli angle-bracket. La connessione è stata concepita per essere posizionata agli estremi del pannello o nel caso di panelli di grandi dimensioni può essere posizionata anche in una posizione intermedia. Il

sistema è composto da tre componenti principale: 1) un involucro metallico esterno combinato con una piastra interna in acciaio; 2) un nucleo in legno in LVL; 3) sei viti completamente filettate inserite secondo due diversi angoli di inclinazione per ottimizzare la capacità del connettore. I connettori fissati alle piastre dei pannelli adiacenti sono uniti tra loro mediante bulloni e piaste di collegamento in acciaio Figura 10.

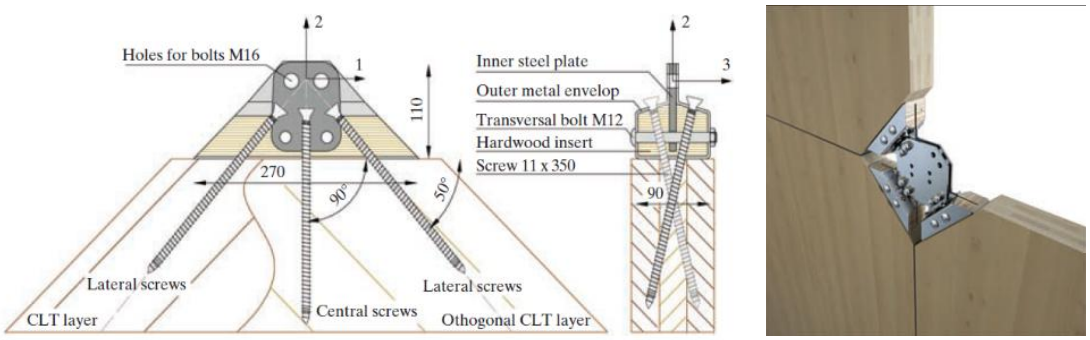


Figura 10 Geometria e posizionamento X-RAD, fonte [18]

Per analizzare il comportamento della connessione sono state realizzate delle campagne sperimentali andando a sottoporre la connessione a prove di carico monotone e cicliche per testare il comportamento a trazione ed a taglio. Successivamente sono state condotte altre prove per investigare il comportamento a taglio-trazione e taglio-compressione. In conclusione, è stata eseguita una campagna di test degli X-RAD su due pannelli in CLT. Dai test è risultato evidente che la capacità dissipativa degli X-RAD è fortemente influenzata dal comportamento plastico delle viti, che vengono inserite secondo tre diverse inclinazioni, per assicurare una maggiore efficacia nella trasmissione delle azioni, mentre il collegamento di queste ultime con le piastre interne è assicurato con l'ammorsamento delle teste delle viti con un corpo ligneo stagionato. Risultando adatti per la realizzazione dei collegamenti dei pannelli parete-parete, solaio-parete e solaio-solaio per edifici in cui è essenziale avere una buona capacità di dissipazione di energia. X-BRACKET[20], è una nuova tipologia di collegamento dissipativo, anch'essa come la precedente, progettata per essere posizionata negli angoli del pannello, o in posizione intermedia nel caso di pannelli di grandi dimensioni. La connessione presenta una particolare geometria con lo scopo di andare a concentrare la plasticizzazione nelle parti metalliche della connessione più tosto che all'interfaccia legno-connettori. Gli X-BRACKET presentano una forma ad "x" Figura 11 che permette il completo utilizzo delle capacità plastiche, ponendo particolare cura nella progettazione dell'ancoraggio limitando le tensioni di rifollamento nella zona di contatto.

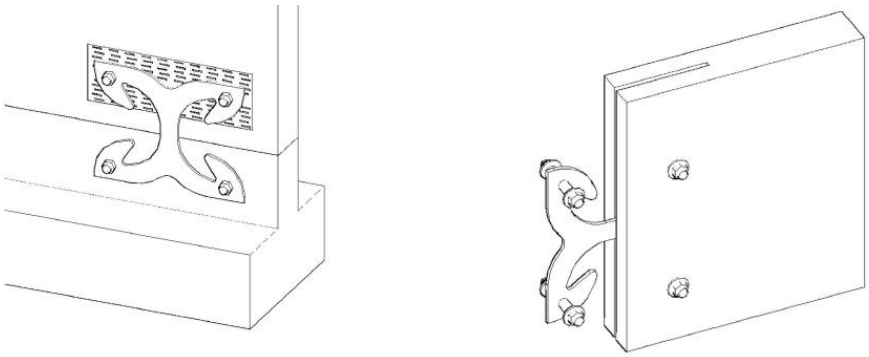


Figura 11 Dettaglio ancoraggio pannello-fondazione e pannello-pannello, fonte [20]

Lo studio di questa nuova tipologia di connessione è proseguito con una campagna di prove sperimentali di carico ciclico a trazione pura ed a taglio puro Figura 12.

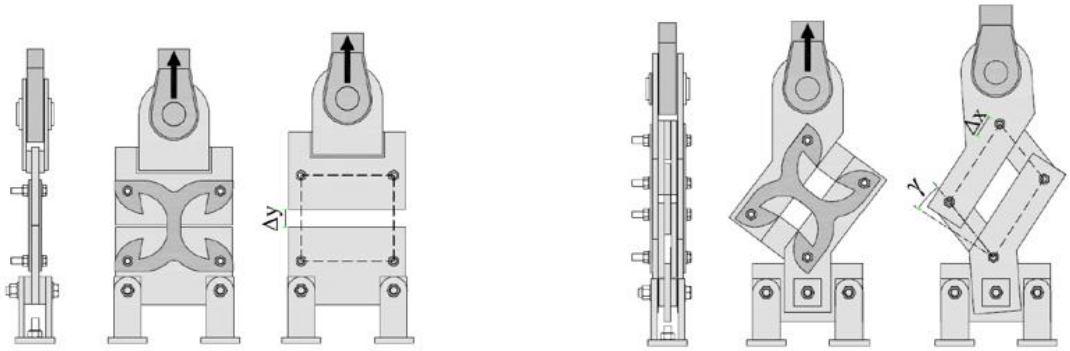
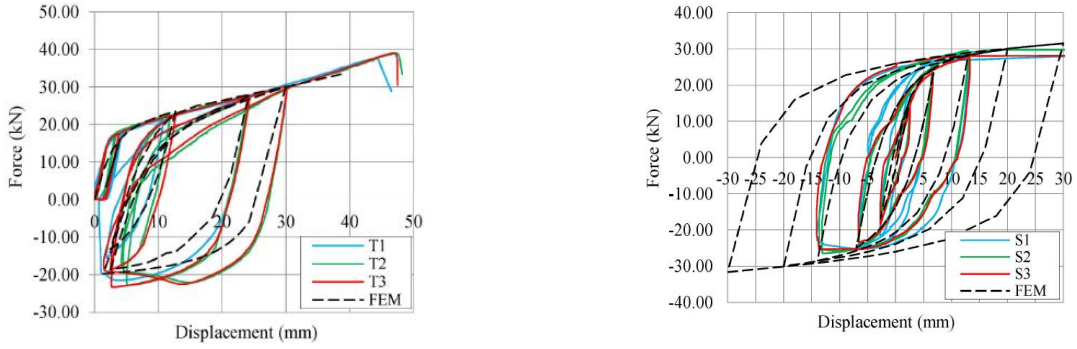


Figura 12 Setup di prova: a) test trazione pura; b) test a taglio, fonte [20]

Sono stati eseguiti tre test a trazione pura e tre test a taglio puro, sperimentando un paio di X-BRACKET per ogni prova, per un totale di dodici test. I test ciclici sono stati eseguiti in base al protocollo di carico quasi statico conforme alla EN12512, la prova ciclica è stat interrotta al raggiungimento dello spostamento relativo di 30 mm, successivamente i campioni sono stati portati a rottura attraverso una prova monotonica.

Sovrapponendo le curve ottenute dalle prove sperimentali con quelle ottenute dalle analisi numeriche Figura 13 è stato possibile notare un andamento plstico-incrudente senza fenomeni di pinching portanto così ad avere un elevato valore di energia dissipata.



a *b*

Figura 13 Confronto andamento cicli prove sperimentali e analisi numeriche§: a) test trazione; b) test taglio, [20]

Parallelamente sono state modellate tre pareti Figura 14, con differente geometria e numero di connessioni, andando ad analizzare il comportamento di queste quando sottoposte al carico ciclico secondo EN12512.

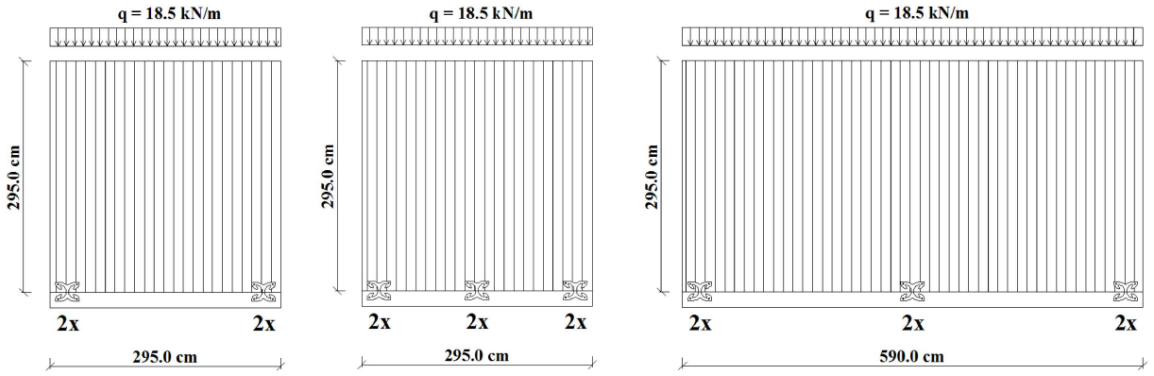


Figura 14 Modelli di parete analizzati, fonte [20]

Questa geometria dei pannelli è stata scelta in quanto già utilizzata nei test del progetto SOFIE, così da poter confrontare i risultati ottenuti dalle analisi degli X-BRACKET con le connessioni tradizionali. I risultati delle analisi delle pareti con gli X-BRACKET hanno confermato quello che era già stato osservato per le singole connessioni, riportando quindi un incremento significativo in termini sia di resistenza che di duttilità e di energia dissipata. Il confronto con i risultati del progetto SOFIE ha portato ad un confronto con le connessioni tradizionali, permettendo di osservare una risposta simile in termini di resistenza massima e allo snervamento, ma una capacità in duttilità e energia dissipata migliorata rispetto alle connessioni tradizionali.

D'Arenzo et al. [21] introduce un nuovo dispositivo di connessione innovativo progettato per migliorare la resistenza meccanica delle strutture in legno lamellare incrociato (CLT). Il dispositivo è un angolare metallico che utilizza viti completamente filettate per ottimizzare le connessioni tra i pannelli di parete e di solai, con lo scopo di poter resistere sia agli sforzi di taglio che di trazione. Questo angolare è concepito per incrementare la capacità di resistenza e

la duttilità delle connessioni, fondamentali per migliorare la risposta sismica delle strutture. L'angolare, oltre a presentare i consueti fori nei piatti verticale e orizzontale, presenta cinque fori per l'inserimento di viti con diametro maggiore Figura 15.



Figura 15 Geometria del nuovo angolare proposto da D'Arenzo et al, fonte [21]

Lo studio di questa connessione ha previsto una serie di test sperimentali ed analisi numeriche che hanno dimostrato le capacità superiori di questo angolare rispetto a quelli tradizionali. I test hanno incluso l'applicazione di carichi monotoni di taglio e di trazione per trovare le capacità meccaniche della connessione. Il modello agli elementi finiti realizzato con Abaqus ha permesso di riprodurre il comportamento non lineare dei dispositivi di fissaggio e ha fornito una dettagliata analisi dell'effetto gruppo e del dominio di resistenza dei dispositivi.

Meta Krzan e Boris Azinovic del 2021 [22] hanno analizzato la risposta ciclica di angle-bracket innovativi progettati per resistere sia a taglio che a trazione, che presentano nel piatto di base viti autofilettante inclinate e un piatto orizzontale di rinforzo, valutando l'effetto cha la presenza di un isolamento acustico ha sulle capacità di resistere ai carichi sismici. Andando ad eseguire test sperimentali su pannelli in CLT sia con spinte monotone che cicliche analizzando il comportamento sia a taglio che a trazione/compressione. I test hanno mostrato che la presenza dell'isolamento acustico non influenza in maniera significativa la capacità portante delle connessioni ma influisce sulla sua rigidezza.

Wrzesniak et al. [23] studiano l'efficacia dei dispositivi di smorzamento High-Force-to-Volume (HF2V) nel migliorare le capacità di resistere alle sollecitazioni sismiche delle pareti in legno lamellare incollato. Lo studio si concentra su come gli smorzatori aumentano notevolmente la resistenza ai danni durante glie venti sismici. Gli smorzatori sono integrati nei pannelli attraverso un sistema di collegamento che permette un certo grado di movimento, attraverso un angolare in acciaio lo smorzatore si collega al solaio, mentre la parte superiore si collega alla parete in legno attraverso un piatto a "U" che viene collegato al pannello attraverso delle viti autofilettate Figura 16. Le prove cicliche condotte sulle pareti hanno dimostrato che tali smorzatori non solo resistono meglio agli impatti sismici, mantenendo la loro integrità

strutturale, ma sono anche capaci di dissipare efficacemente l'energia generata dalle azioni orizzontali. Una caratteristica importante di questi smorzatori è la capacità di autoricentarsi riducendo così le deformazioni a seguito del sisma e facilitando la rapida ripresa dell'uso dell'edificio. Durante i test è stato valutato l'effetto del carico verticale sulle prestazioni degli smorzatori, evidenziando come questo influenzi la capacità di autoricentramento e la performace generale del dispositivo.

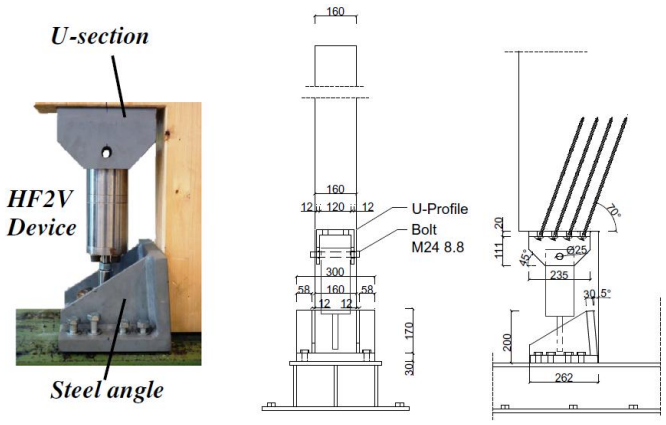


Figura 16 Collegamento dello smorzatore al pannello in legno, fonte [23]

Smiroldo et al. ([24], [25]) analizzano un nuovo sistema di connessione ad alte prestazioni per edifici in CLT, denominato H-LAM, sviluppato per migliorare la resistenza sismica dele strutture in legno. Avendo come obiettivo quello di realizzare una soluzione unica che vada a sostituire sia gli hold-down che gli angle-bracket, in grado di garantire maggiore rigidezza e resistenza, limitando contemporaneamente i danni strutturali e no. Questa nuova tipologia di connessione è costituita da piastre metalliche saldata e collegate ai pannelli in CLT mediante viti inclinate completamente filettate, permettendo di sfruttare al massimo la resistenza a estrazione delle viti Figura 17.

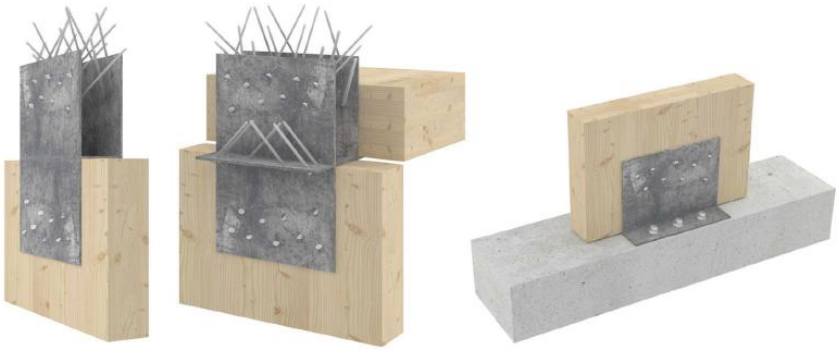


Figura 17 Modello connessione H-LAM, soluzione per connessione pannello verticale-pannello verticale, pannello verticale-pannello orizzontale, pannello verticale-fondazione, fonte [25]

La connessione è stata studiata attraverso la realizzazione di prove sperimentali e modellazione numerica. I test sperimentali hanno incluso prove monotone e cicliche su configurazioni in trazione pura, taglio e trazione inclinata a 45°. Contemporaneamente sono stati sviluppati

modelli numerici con diversi livelli di dettaglio: un modello semplificato utilizzando il software SAP2000, analizzando il comportamento globale, e un modello di dettaglio con Abaqus, in grado di rappresentare il comportamento plastico delle viti e della connessione. I risultati sperimentali e numerici hanno mostrato come l'H-LAM sia caratterizzato da un'elevata resistenza e rigidezza, mostrando anche un comportamento pseudo-duttile grazie alla progressiva estrazione delle viti. Per l'analisi globale, eseguita con SAP2000, sono stati realizzati i modelli di tre strutture con stessa pianta ma diverso numero di piani (quattro, sei e otto piani) analizzando il comportamento attraverso analisi statiche non lineari. Le analisi hanno dimostrato che la connessione consente alle strutture di mantenere un comportamento elastico, permettendo di ridurre i danni sia agli elementi strutturali che non strutturali.

Una nuova tecnologia studiata per le strutture in legno lamellare è il sistema PRES-LAM che offre interessanti capacità sia per quanto riguarda il ricentraggio che per le capacità dissipative. Il sistema ha l'obiettivo di andare a sostituire completamente le connessioni tradizionali, questa tecnologia prevede l'inserimento di un cavo post-teso non aderente che va a migliorare le capacità dissipative della struttura e assicura il ricentraggio del sistema dopo l'evento sismico. Questa soluzione trae origine dal sistema PRESSS (PREcast Structural Seismic Systems), inizialmente sviluppato per strutture in calcestruzzo prefabbricato, e si è poi evoluta per applicazioni in legno lamellare grazie agli studi condotti da Palermo et al. [26]. Il comportamento è basato su un meccanismo di rocking controllato, che consente rotazioni relative tra gli elementi strutturali senza accumulo di danni permanenti.

Il lavoro condotto da Palermo et al. [26] rappresenta una fase iniziale dello sviluppo del sistema PRES-LAM, fornendo una base sperimentale e teorica per i successivi sviluppi. Lo studio, condotto presso l'Università di Cantebury, ha esplorato l'impego delle connessioni post-tese in strutture in LVL (Laminated Veneer Lumber), verificandone l'efficacia attraverso prove sperimentali su giunti trave-colonna e su semplici colonne (struttura a mensola). I risultati hanno dimostrato che il sistema offre ottime capacità di ricentraggio e elevate capacità dissipative.

Ponzo et al. [27] hanno successivamente studiato l'applicazione di questo soluzione su sistemi a telaio eseguendo prove sia sui giunti trave-colonna, sia con la realizzazione di un modello tridimensionale di una struttura intelaiata multipiano sottoposta a prove su tavola vibrante.

Iqbal et al. [28] hanno studiato una variante del sistema PRES-LAM applicandolo a pareti accoppiate invece che a strutture intelaiate. In questo studio, le pareti sono collegate mediante dissipatori a piastre a forma di "U" (UFP- U-shaped Flexural Plates) Figura 18, che fungono da

elementi dissipativi andando ad assorbire l'energia senza compromettere la capacità portante degli elementi strutturali.

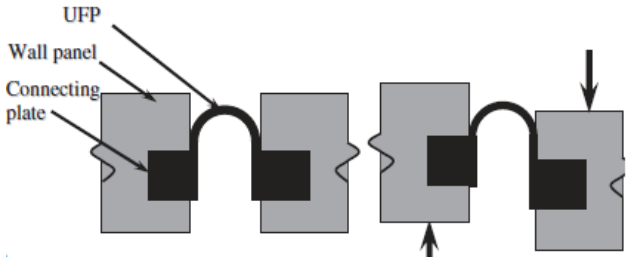
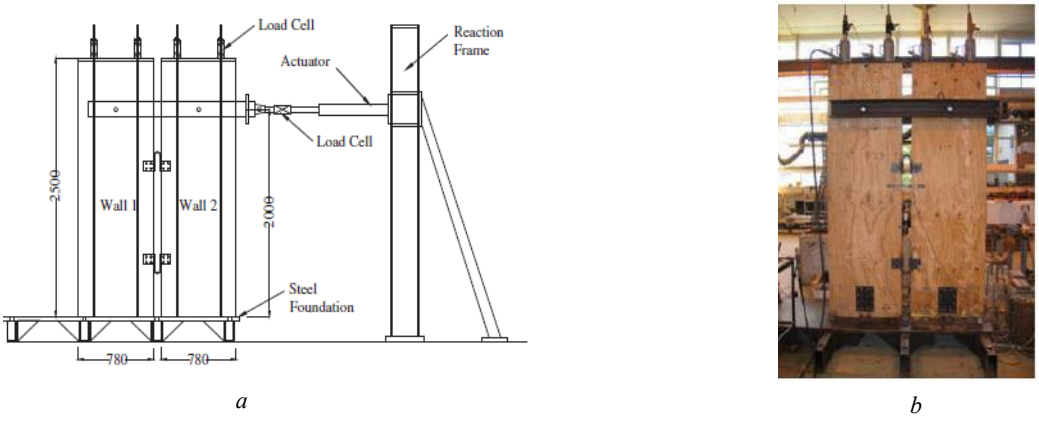


Figura 18 Rappresentazione degli UFP e collegamento alle pareti, fonte [28]

Le prove sperimentali Figura 19 hanno evidenziato una maggiore capacità dissipativa grazie agli UFP, una semplicità costruttiva che permette una facile sostituzione dei piatti danneggiati e un migliore comportamento globale dell'edificio grazie al contributo delle pareti accoppiate.



a *b*

Figura 19 Setup prove su pareti accoppiate, fonte [28]

Kramer et al. [29] presentano un'innovativa soluzione per la dissipazione di energia nei sistemi a pareti in legno lamellare incrociato, con l'obiettivo di sviluppare un sistema di connessione parete-solaio efficace, facilmente installabile e sostituibile dove eventi sismici. Il collegamento prevede l'uso di dissipatori in acciaio progettati per plasticizzarsi e dissipare energia. Questi dissipatori vengono utilizzati contemporaneamente ad un sistema autoricentrante che utilizza cavi post-tesi non aderenti, andando così a ridurre in modo significativo gli spostamenti residui che si potrebbero generare Figura 20. L'indagine sperimentale è stata sviluppata in tre diverse parti. Nella prima, sono state condotte prove di trazione su singoli dissipatori per valutarne le caratteristiche meccaniche, seguiti da test di trazione su pannelli in CLT con i dissipatori per osservare il comportamento del sistema di connessione ed infine sono state condotte prove cicliche per simulare il comportamento sotto carichi orizzontali. Durante i test ciclici, gli autori hanno osservato che il principale meccanismo di collasso era dovuto al fenomeno di buckling, gli autori hanno quindi deciso di apportare delle modifiche al dissipatore con l'obiettivo di migliorarne le capacità di dissipazione e ridurre il rischio di buckling, portando ad avere un

incremento della capacità di dissipazione pari al 70%. I risultati della ricerca hanno dimostrato che l'uso di dissipatori in acciaio per i sistemi in CLT è una soluzione efficace ed affidabile per la progettazione sismica.

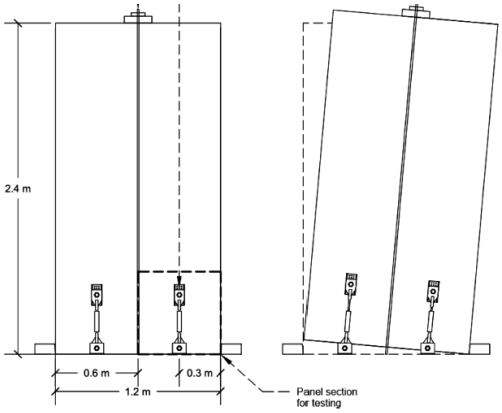


Figura 20 Posizionamento dissipatori e cavi di post-tensione, fonte [29]

Negli ultimi anni, Hashemi et al ([30]-[31]-[32]) hanno proposto e sviluppato una nuova tipologia di connessioni per strutture in a pannelli, in particolare per sistemi in Cross Laminated Timber (CLT) e in configurazioni ibride acciaio-legno.

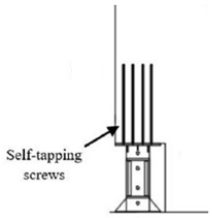
Il sistema innovativo proposto si basa sull'approccio del Resilient Slip Friction Joint (RSFJ), è quindi in grado di garantire contemporaneamente la dissipazione di energia e il ricentramento automatico dopo eventi sismici. Il funzionamento dei dispositivi RSFJ proposti si basa sulla combinazione di elementi che lavorano ad attrito e da molle. Durante un evento sismico, il dispositivo consente scorrimenti controllati accompagnati da dissipazione isteretica, mentre le molle assicurano il ripristino della configurazione iniziale al termine delle sollecitazioni orizzontali. Questa configurazione produce un tipico comportamento ciclico di tipo flag-shaped, caratterizzato da spostamenti residui trascurabili e da un'efficienza dissipativa elevata (Figura 21).



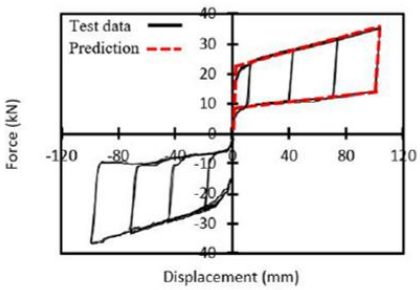
a



b



c



d

Figura 21 Test sperimentali svolti: a) test su prototipo RSFJ; b)test su parete in CLT; c) connessione tra parete in CLT e RSFJ; d) confronto test sperimentali con analisi numeriche, fonte ([32])

Hashemi et al. ([30]) hanno inizialmente applicato il concetto RSFJ a pareti ibride acciaio-legno, dimostrando che l'integrazione di slip joints nei punti di collegamento delle pareti consente di ottenere prestazioni sismiche elevate, andando a ridurre significativamente i danni permanenti ai pannelli lignei.

Successivamente, Hashemi et al. ([31]) hanno esteso l'applicazione ai sistemi di pareti accoppiate, collegando due o più pannelli mediante RSFJ per combinare dissipazione energetica e controllo delle deformazioni laterali.

Infine Hashemi et al. ([32]), hanno dimostrato come il concetto di RSFJ sia pienamente compatibile con strutture a pannelli prefabbricati e modulari in legno, ampliando la potenzialità di utilizzo su edifici multipiano e sistemi complessi. I benefici associati all'impiego delle connessioni Resilient Slip Friction Joint (RSFJ) possono essere così sintetizzati: 1) elevata capacità dissipativa; 2) una marcata capacità di ricentramento; 3) concentrazione del danno esclusivamente negli elementi meccanici più facilmente sostituibili preservando l'integrità del pannello in legno.

3 CONNESSIONE INNOVATIVA PER PANNELLI IN CLT

L'obiettivo di questa ricerca è stato quello di andare a studiare una nuova tecnologia di connessione da utilizzare per le strutture realizzate con pannelli in CLT. In particolare, partendo da due prototipi di questa soluzione si è deciso di andare a studiare in dettaglio come il variare di alcuni parametri geometrici e non potesse influenzare la risposta del sistema.

Considerato che le costruzioni in legno basate sull'impiego di pannelli multistrato incrociati rappresentano una delle tecnologie più diffuse per la realizzazione di strutture lignee in Italia risulta fondamentale analizzare la progettazione e i dettagli dei collegamenti tra i pannelli, al fine di comprendere al meglio il comportamento strutturale sotto l'azione di carichi laterali, come quelli generati da eventi sismici.

Scopo del progetto di ricerca è quello di proporre un tipo di collegamento innovativo che abbia come caratteristiche principali:

- Tecnologia alternativa rispetto ai collegamenti tradizionali (hold-down e angle-braket);
- Ottimizzazione dei tempi di installazione e montaggio;
- Semplificazione della filiera costruttiva;
- Riduzione del numero di connettori utilizzati;
- Gerarchia delle resistenze con pannello forte e connessione debole.

Lo studio di questi prototipi si è concentrato sullo svolgimento di analisi parametriche per andare ad osservare come i vari parametri presi in considerazione (precarico delle barre, inclinazione delle barre, lunghezza piatto resiste a taglio) andassero ad influenzare le caratteristiche di resistenza massima e smorzamento viscoso del prototipo studiato, e quindi la risposta delle varie componenti del sistema di collegamento. Obiettivo dello studio parametrico è quello di andare a realizzare delle linee guida che potranno essere seguite nella progettazione dei due prototipi di connessione studiati, per i quali è già presente un brevetto (Prodotto CONNESSIONI PER PANNELLO DEL TIPO CLT. Domanda di Brevetto per Invenzione Industriale in ITALIA n. 102020000012982 del 29/05/2020. Concesso il 07/07/2022 con il n. 102020000012982 dal Ministero dello Sviluppo Economico).

3.1 Geometria prototipi studiati

Il modello strutturale analizzato è costituito da una parete con dimensioni 2.95m x 2.95m (dimensioni della parete utilizzate nel progetto SOFIE) e uno spessore di 14 cm (lo spessore del pannello è stato scelto tra quelli dei pannelli che vengono prodotti dalla ditta Area Legno di D.D.L. S.r.l.). Il modello vuole schematizzare una parete di dimensioni reali composta da tre

strati, di spessore uguale, con quelli esterni con fibratura disposta verticalmente e lo strato intermedio con le fibratura disposta orizzontalmente.

Entrambi i modelli di collegamento proposti si compongono di due dispositivi distinti: uno progettato per resistere alle sollecitazioni di trazione e l'altro alle sollecitazioni di taglio (Figura 22). Le due tecnologie di collegamento condividono lo stesso dispositivo di connessione per resistere agli sforzi di trazione, mentre per gli sforzi di taglio sono state ideate due geometrie differenti:

- Geometria a semplice curvatura (Figura 23);
- Geometria a doppia curvatura (Figura 24).

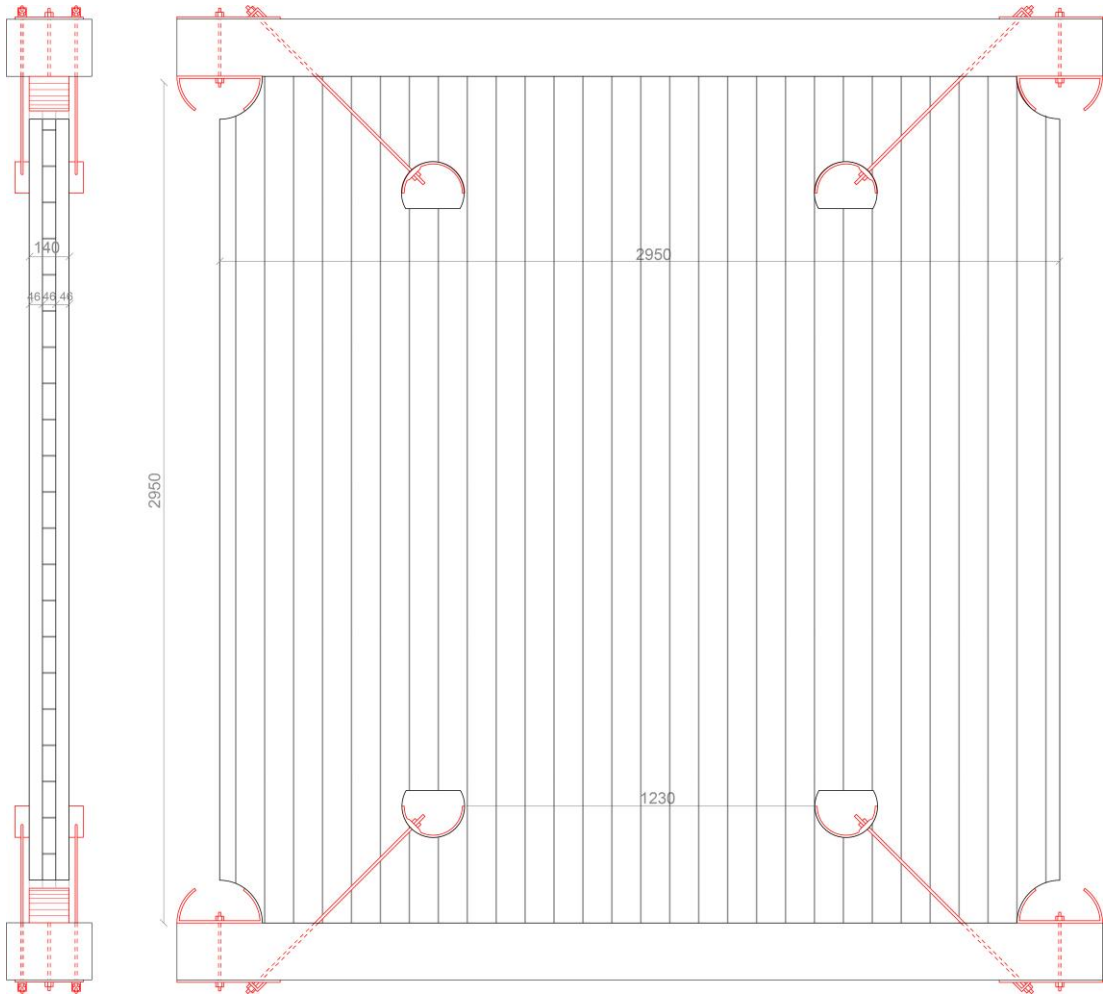


Figura 22 Esempio di parete in CLT con dispositivi resistenti a taglio, nei vertici dx e sx, e a trazione

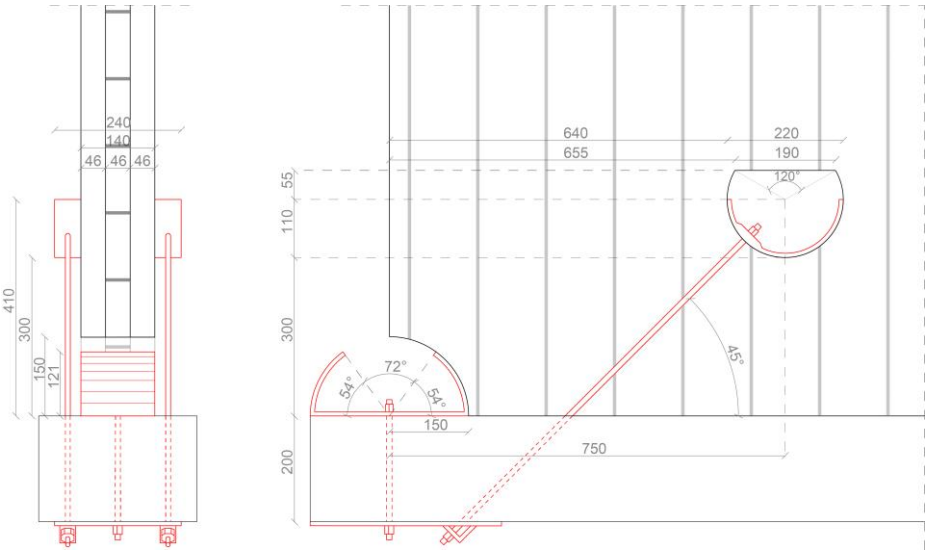


Figura 23 Dettaglio connessione a taglio e a trazione prototipo a semplice curvatura

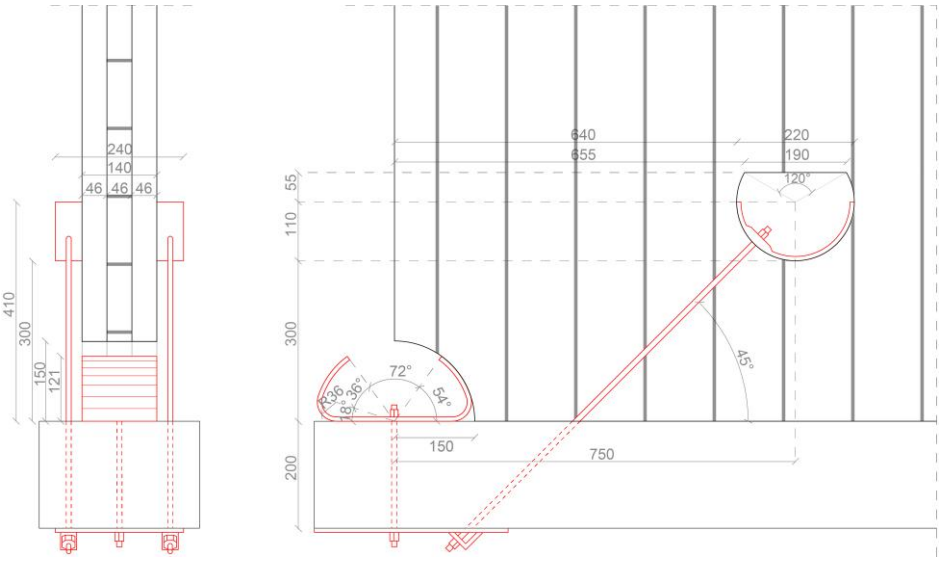


Figura 24 Dettaglio connessione a taglio e a trazione prototipo a doppia curvatura

La connessione a trazione è posizionata sui lati destro e sinistro del pannello ed è stata concepita per resistere esclusivamente attraverso il contatto con il pannello. Questa connessione è costituita da una piastra in acciaio sagomato a forma semicircolare, alloggiata in un'intercapedine ricavata all'interno del pannello, e da due barre in acciaio inclinate di diametro pari a 10 mm, poste all'esterno del pannello, che collegano la piastra all'intradosso del solaio. L'intercapedine realizzata per l'alloggiamento dei piatti può essere utilizzata anche per il sollevamento e il posizionamento della parete nelle fasi di cantiere.

Anche la connessione resistente alle sollecitazioni di taglio è prevista agli spigoli destro e sinistro del pannello, opportunamente sagomato per permettere l'alloggiamento dei piatti. Progettata anch'essa per resistere esclusivamente attraverso il contatto, senza l'ausilio di connettori di collegamento diretti al pannello in CLT, questa connessione è composta da una piastra con un tratto rettilineo di base e un tratto semicircolare con un'interruzione del suo

sviluppo. Il tratto rettilineo della piastra consente, attraverso una barra in acciaio, il collegamento della connessione con il solaio. Considerando l'obiettivo di voler ridurre il numero di chiodi utilizzati si è deciso di riproporre il collegamento non solo alla base del pannello, come era stato progettato nella prima fase dello studio, ma anche in sommità.

3.2 Configurazioni parametriche

Lo studio parametrico condotto ha riguardato anche alcune caratteristiche geometriche del collegamento portando quindi ad avere diverse configurazioni geometriche rispetto al modello di base dal quale si era partiti.

Lo studio parametrico si è quindi focalizzato sull'analisi dell'influenza che i tre parametri (precarico barre, inclinazioni delle barre del sistema resistente a trazione e lunghezza piatto connessione resistente a taglio), hanno sul comportamento della connessione.

Ognuno di questi parametri è stato fatto variare in modo così da coprire un ampio range di configurazioni possibili, con lo scopo di andare ad osservare come questi modificassero le caratteristiche di resistenza massima e smorzamento della connessione. In totale, sono state realizzate novantasei configurazioni per il prototipo a semplice curvatura (Figura 25), ottenute combinando i diversi livelli di ciascun parametro.

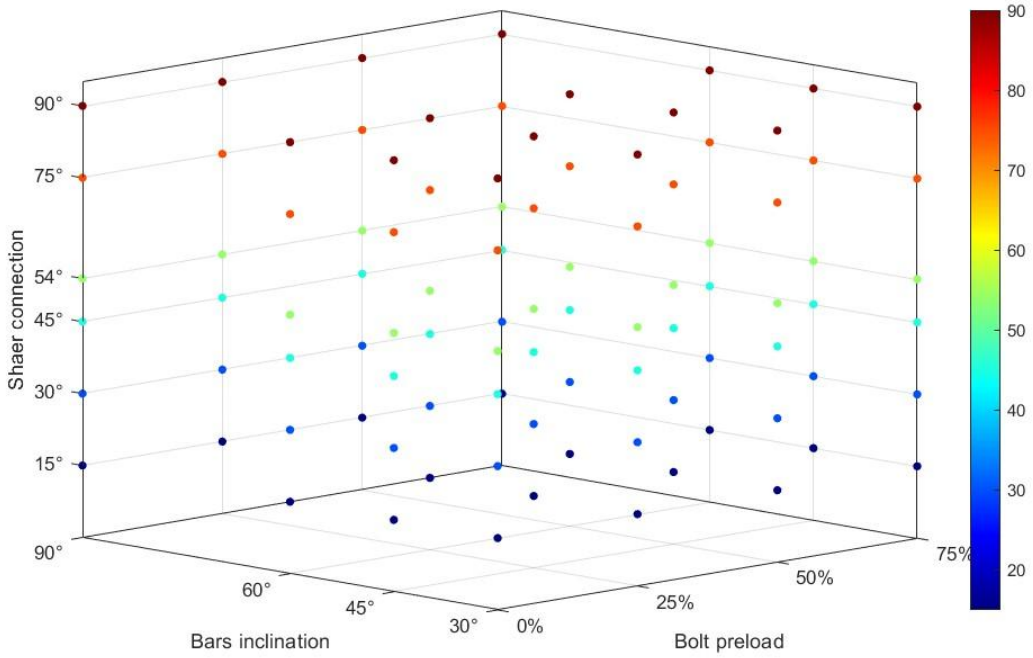


Figura 25 Rappresentazione delle novantasei combinazioni studiate per il prototipo a semplice curvatura

I diversi valori analizzati per i parametri sono:

- **Precarico barre (Bolt Preload BP)**: sono stati analizzati quattro diversi livelli di precarico, pari a 0%, 25%, 50% e 75%, riferiti al valore massimo applicabile calcolato secondo NTC18;
- **Inclinazione barre (Bars Inclination BI)**: Per questo parametro sono stati osservati quattro diversi valori pari a 30°, 45°, 60° e 90°. L'angolo preso come riferimento è quello tra il solaio e le barre (Figura 26);
- **Lunghezza connessione a taglio (Shear Connection SC)**: In questo caso sono stati analizzati sei differenti casi, pari a 15°, 30°, 45° 54° (angolo che corrispondeva alla configurazione iniziale di questo studio), 75° e 90°. Questo angolo rappresenta l'estensione che il piatto resistente a taglio ha nella zona di contatto con la parete (Figura 27).

Per una corretta nomenclatura dei modelli si è deciso di denominarli in base al valore che i parametri presentano nel modello analizzato, adottando la dicitura BPxx_BIxx_SCxx, dove le lettere in maiuscolo indicano la sigla del parametro e "xx" rappresenta il valore numerico che viene assegnato al parametro in quel modello.

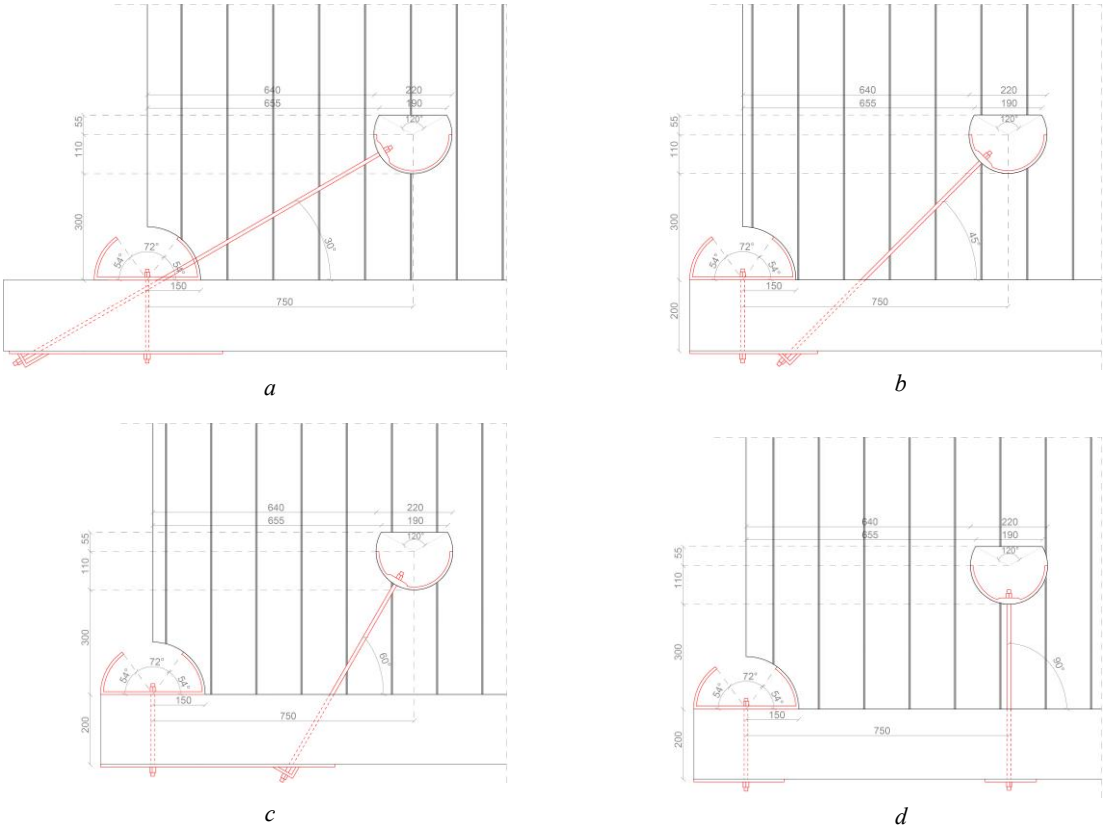


Figura 26 Rappresentazioni dei quattro livelli di inclinazione delle barre: a) barre inclinate a 30°; b) barre inclinate a 45°; c) barre inclinate a 60°; d) barre inclinate a 90°.

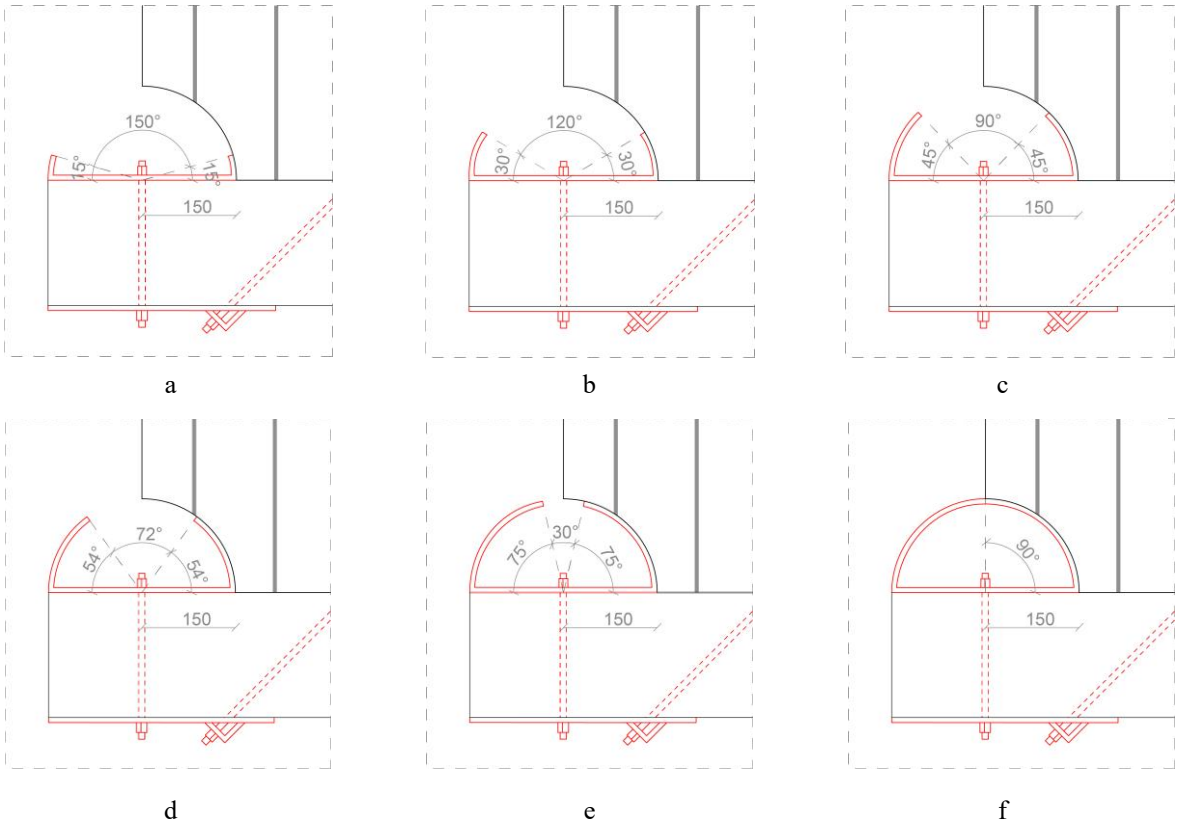


Figura 27 Rappresentazione dei sei livelli del parametro shear connection: a) 15°; b) 30°; c) 45°; d) 54°; e) 75°; f) 90°.

Per quanto riguarda lo studio parametrico del prototipo a doppia curvatura, si è deciso di andare a studiare gli stessi parametri per il sistema resistente a trazione (precarico barre e inclinazione barre) mentre per quanto riguarda il sistema resistente a taglio si è deciso di far variare il raggio del tratto della doppia curvatura andando quindi a variare il gap presente tra il piatto e il pannello. Per poi controllare gli stessi parametri visti per il primo prototipo (resistenza massima e coefficiente di smorzamento viscoso equivalente). Andando a combinare i vari livelli di ognuno dei parametri analizzati per il prototipo a doppia curvatura, si è giunti ad analizzare un totale di quarantotto configurazioni differenti (Figura 28).

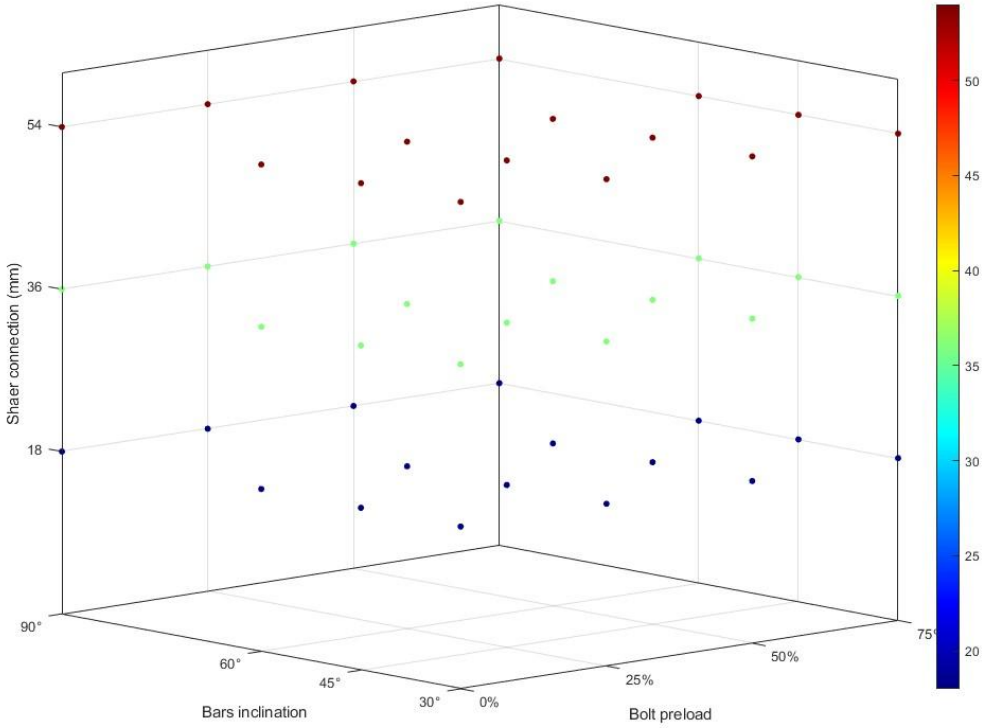
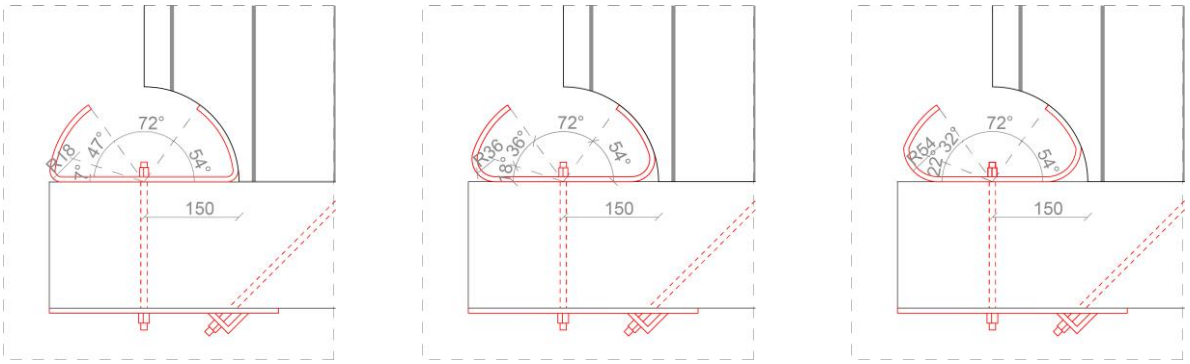


Figura 28 Rappresentazione delle quarantotto combinazioni studiate per il prototipo a doppia curvatura

Per quanto riguarda i livelli dei parametri analizzati per il secondo prototipo abbiamo:

- **Precarico barre (Bolt Preload BP)**: sono stati analizzati quattro diversi livelli di precarico, pari a 0%, 25%, 50% e 75%, riferiti al valore massimo applicabile calcolato secondo NTC18;
- **Inclinazione barre (Bars Inclination BI)**: Per questo parametro sono stati osservati quattro diversi valori pari a 30°, 45°, 60° e 90°. L'angolo preso come riferimento è quello tra il solaio e le barre;
- **Raggio doppia curvatura connessione a taglio (Shear Connection SCr)**: Per comprendere quanto influisse la doppia curvatura nella risposta della connessione sono stati proposti tre diversi valori del raggio del ramo curvo non a contatto direttamente con il pannello. Nello specifico i valori studiati sono 18, 36, 54, valori in millimetri (Figura 29).

La nomenclatura utilizzata è la stessa di prima viene semplicemente aggiunta la lettera r (raggio) dopo la sigla SC, diventando quindi BPxx_BIxx_SCrxx.



a b c

Figura 29 Rappresentazione dei tre livelli del parametro shear connection: a) 18 mm; b) 36 mm; c) 54 mm.

4 MODELLAZIONE FEM

Per analizzare il comportamento della connessione e studiare l'interazione del pannello in CLT con gli altri elementi, quali piastre, barre e dadi, è stato sviluppato un modello ad elementi finiti utilizzando il software Abaqus CAE [33] (Figura 30). Al fine di ottenere una comprensione dettagliata degli stati di tensione e deformazione, tutti gli elementi sono stati modellati utilizzando elementi solidi. La scelta di modellare tutti gli elementi con elementi solidi consente di studiare in modo completo lo svilupparsi delle tensioni e delle deformazioni, in tutti gli elementi, durante le fasi di carico e scarico.

Per il modello di calcolo realizzato sono state assunte le seguenti ipotesi:

- Solaio di calpestio infinitamente rigido;
- Solaio superiore infinitamente rigido, ma soggetto a traslazione orizzontale (lungo l'asse X), verticale (asse Y) e a rotazione (asse Z);
- Collegamento pannello-solaio di calpestio: questo contatto è stato modellato a comportamento monolatero a sola compressione, vincolo che consente il trasferimento tra le due superfici a contatto di forze e spostamento. Il vincolo è stato realizzato in modo che le due superfici si possano separare anche se sono già venute in contatto e il trasferimento avviene solo quando le superfici sono in contatto. Questo comportamento descrive in modo realistico il comportamento dei pannelli in CLT quando soggetti a rocking e sliding;
- Collegamento pannello-solaio a soffitto: per questa situazione è stato sia riproposto il contatto realizzato tra pannello-solaio di calpestio, ma è stato realizzato anche un vincolo di tipo coupling che permette di collegare lo spostamento di una superficie allo spostamento di un nodo di riferimento. In questo caso è stato collegata la superficie della parete con il centro di massa del solaio.

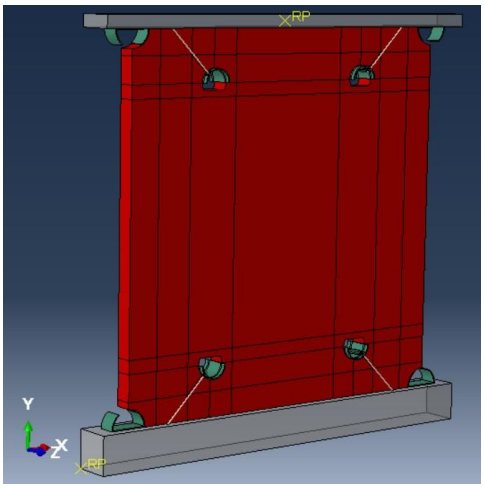


Figura 30 Modello 3D Abaqus

4.1 Geometria componenti e materiali adottati

Di seguito viene descritto il modello agli elementi finiti sviluppato sulla base delle configurazioni strutturali analizzate e precedentemente presentate nel Capitolo 3. Il modello numerico riproduce fedelmente la geometria delle pareti in CLT, i dispositivi di connessione e le condizioni di vincolo adottate nel provino di riferimento. Tutte le componenti che costituiscono il sistema (pannello in CLT, piatti in acciaio, dadi, barre, solaio di calpestio e solaio superiore) sono state modellate direttamente nel software di calcolo Abaqus e sono state descritte come solidi 3D, entrambi gli elementi per descrivere i solai sono stati definiti come rigidi mentre le altre componenti del sistema come elementi deformabili. Si è scelto di modellare tutto attraverso elementi solidi 3D così da poter studiare in dettaglio come si sviluppava lo stato tensionale e deformativo, durante l'analisi, dei vari elementi del sistema.

Per rappresentare le varie componenti del sistema sono stati utilizzati elementi C3D8R, per la parete in CLT, le barre, i dadi e i piatti in acciaio, mentre elementi tipo R3D4 per gli elementi rigidi (Figura 31). Gli elementi C3D8R rappresentano elementi solidi (Continuum), tridimensionali (3D), con 8 nodi, punti di integrazione ridotti (R) e con controllo dei fenomeni di hourglass (presenza di deformazioni a cui corrisponde un'energia di deformazione nulla). La scelta di adottare tali elementi è stata dettata dalla necessità di ottenere una rappresentazione accurata delle geometrie modellate, riducendo al contempo i tempi di calcolo. L'impiego di elementi più complessi, quali ad esempio C3D20R, avrebbe infatti comportato un incremento significativo del costo computazionale. Mentre gli elementi R3D4 rappresentano elementi rigidi (R), tridimensionali (3D) con 4 nodi.

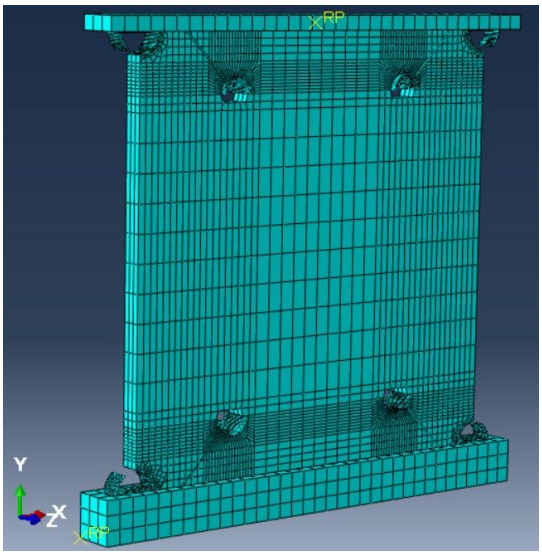


Figura 31 Mesh modello di calcolo - elementi C3D8R per gli elementi deformabili, R3D4 per gli elementi rigidi

Data la dimensione del modello, riprodotto in scala reale all'interno sul software Abaqus, si è ritenuto opportuno adottare una strategia di meshatura differente in base alle zone modellate dei vari elementi, al fine di contenere l'onere computazionale senza compromettere la qualità delle analisi. In particolare, la mesh è stata infittita localmente in corrispondenza delle zone di contatto più critiche (parete-piatto sistema resistente a trazione, parete-piatto sistema resistente a taglio, dado-barra), con elementi di dimensione compresa tra 1 e 2 cm per i contatti parete-piatti in acciaio e dell'ordine di 0.5 cm per barre e dadi. Per le aree centrali della parete è stata invece adottata una mesh di grandezza maggiore, con dimensioni medie degli elementi comprese tra 10 e 15 cm.

Nel modello sono stati implementati tre diversi tipi di materiali, due diverse classi di acciaio, una per descrivere i piatti e un'altra tipologia per le barre e i dadi, e un materiale per descrivere la classe di legno del pannello in CLT.

Il materiale acciaio di piastre, dadi e barre è stato descritto con una curva bi-lineare (comportamento elasto-plastico incrudente). Sono stati utilizzati diversi tipi di acciaio per i vari elementi; in particolare, per le piaste è stato usato un acciaio S235 (Figura 32), mentre per dadi e barre un acciaio Classe 3.6 (Figura 33). Di seguito si riportano i valori inseriti nel software per la loro caratterizzazione.

S 235	
σ (MPa)	ε (mm/mm)
0	0
235	0.0012
360	0.0102

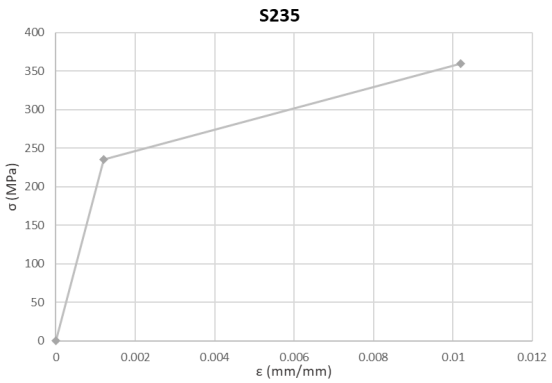


Figura 32 Caratteristiche materiale per piastre

Class 3.6	
σ (MPa)	ε (mm/mm)
0	0
180	0.002
300	0.066
300	0.0675

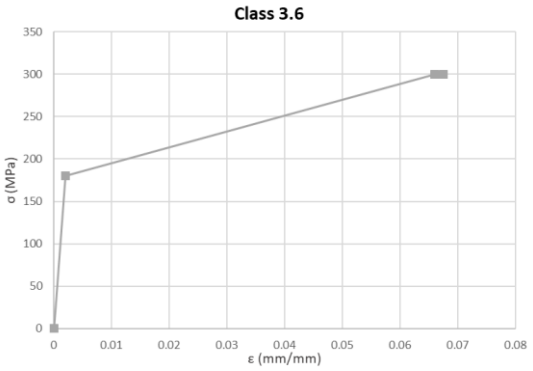


Figura 33 Caratteristiche materiale per barre e dadi

Per quanto riguarda il pannello in CLT il legno è stato descritto come materiale omogeneo ortotropo elasto-plastico, descrivendo il comportamento del materiale attraverso il criterio di Hill ([34], [35]), generalizzazione del criterio di Von Mises, utilizzato per descrivere materiali anisotropi in quanto permette di definire le proprietà meccaniche dei materiali nelle diverse direzioni principali, adatto quindi a descrivere il legno che presenta tre diverse direzioni principali. Si è deciso di utilizzare un legno di classe C24. Dato che il pannello è composto da due strati esterni con fibratura verticale e uno strato intermedio con fibratura orizzontale, il modulo elastico nella direzione principale è stato posto pari a $2/3*E_{0mean}$, mentre quelle nelle direzioni trasversale e radiale pari a $1/3*E_{0mean}$, dove E_{0mean} è il modulo elastico del legno in direzione parallela alla fibratura. In Figura 34 vengono riportati i valori utilizzati per descrivere il materiale nel software di calcolo.

E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	G_{xy} (MPa)	G_{xz} (MPa)	G_{yz} (MPa)
8000	4000	4000	0.4	0.4	0.04	690	690	69

σ_{t0} (MPa)	σ_{c0} (MPa)	σ_{t90} (MPa)	σ_{c90} (MPa)	τ_{90} (MPa)	τ_t (MPa)
14	-21	0.5	-2.5	3.8	1.2

Figura 34 Caratteristiche materiale legno

Il comportamento plastico del legno viene implementato in Abaqus andando a descrive sei coefficienti, riportati di seguito, che dipendono dai valori delle tensioni di resistenza del materiale.

$$R_{11} = \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_0} \qquad R_{22} = \frac{\sigma_{c90}}{\sigma_0} \qquad R_{33} = \frac{\sigma_{c90}}{\sigma_0}$$

$$R_{12} = \frac{\tau_{90}}{\tau_0} \qquad R_{13} = \frac{\tau_{90}}{\tau_0} \qquad R_{23} = \frac{\tau_t}{\tau_0}$$

Dove:

- σ_0 è la tensione di compressione normale alle fibre;
- σ_{c0} è la resistenza a compressione parallela alle fibre;
- σ_{c90} è la resistenza a compressione ortogonale alle fibre;
- τ_0 è la sollecitazione di taglio di riferimento $=\sigma_0/\sqrt{3}$;
- τ_t è la resistenza a taglio per rotolamento;
- τ_{90} è la resistenza a taglio e torsione.

4.2 Modellazione contatti, vincoli e carichi applicati

Considerando l'elevato numero di elementi che interagiscono è stato necessario definire numerosi contatti tra le varie superfici. Oltre a quelli già descritti in precedenza (parete-solaio

di calpestio e parete-solaio a soffitto) è stato necessario realizzare contatti per le diverse interazioni tra la parete e i sistemi resistenti. Sia il contatto parete-solaio di calpestio che parete-solaio a soffitto sono stati descritti con le medesime proprietà di *Tangential Behavior*, che permette di definire il comportamento tangenziale ovvero come le superfici interagiscono tra di loro in direzione tangente durante il movimento relativo andando a definire un valore del coefficiente d'attrito tra le superfici a contatto ([36]), e la proprietà di *Normal Behavior,* che definisce come due superfici interagiscono in direzione normale durante il contatto, questa proprietà controlla se le superfici possono separarsi l'una dall'altra una volta venute a contatto. Nel caso studio, per quanto riguarda quest'ultima proprietà è stato definito un Hard Contact che impedisce la penetrazione delle superfici calcolando una reazione normale solo quando queste entrano in contatto ed è stata data la possibilità alle superfici di separarsi una volta avvenuto il contatto. Per quanto riguarda l'interazione parete-sistema resistente a trazione è stato necessario descrivere un contatto tra la superficie della parete sagomata e il piatto in acciaio utilizzando la proprietà di *Tangential Behavior*, andando a definire un coefficiente d'attrito tra la parete e il piatto in acciaio per descrivere lo scorrimento che può avvenire tra le due superfici, e la proprietà di *Normal Behavior* (Hard Contact), per descrivere il comportamento in direzione normale delle due superfici. Tra le barre e i dadi è stato definito un contatto dove, a differenza di quello descritto prima, alla proprietà *Hard Contact* non è stata data la possibilità di separarsi, e nelle *Tangential Behavior* è stato definito una proprietà di contatto *Rough*, che in pratica impone una condizione in cui non è consentito lo scorrimento tangenziale tra le superfici a contatto. Le barre sono state poi vincolate al solaio attraverso la definizione di un *Tie Constraint*. Il contatto tra la parete e il piatto del sistema resistente a taglio è stato definito andando ad utilizzare la proprietà *Tangential Behavior* Frictionless imponendo quindi che le superfici posso scorrere liberamente l'una rispetto all'altra. Il collegamento tra il piatto in acciaio con il solaio è stato realizzato con un *Tie Constraint*. È stato poi applicato un incastro al solaio di calpestio.

Al modello sono stati applicati tre carichi distinti: quello gravitazionale, a seguito dell'analisi dei carichi (Figura 35) combinati secondo la combinazione sismica da normativa, un precarico alle barre del sistema resistente a trazione, calcolato secondo NTC18 ([37]), e un protocollo di carico per simulare l'azione sismica secondo ECCS85 ([38]).

CARICHI SOLAIO			
	P (kN/m³)	s (m)	P (kN/m²)
pannello CLT	5	0.25	1.25
massetto alleggerito	4	0.07	0.28
isolante	1.5	0.05	0.075
massetto autolivellante	22	0.05	1.1
pavimento	27	0.03	0.81
pannello cartongesso			0.12
carico accidentale			2

Figura 35 Analisi dei carichi

Per la modellazione dei carichi applicati, ipotizzando di studiare una parete dell'ultimo piano di un edificio con un'area di influenza di 15 m^2, il carico gravitazionale che è stato applicato è quello che risulta dalla combinazione sismica secondo NTC18:

$$G_1 + G_2 + 0.3Q$$

e risulta pari a 63.5 kN.

La forza di precarico sui bulloni è stata applicata per ridurre l'instabilità che si potrebbe verificare quando le barre di acciaio sono sottoposte a forze di compressione. Il precarico è stato calcolato secondo norma (NTC18) i valori applicati nei modelli rappresentano una percentuale del precarico massimo, pari allo 0%, 25%, 50 %, e 75% (Figura 36):

$$F_{p,Cd} = \frac{0.7 f_{tbk} A_{res}}{\gamma_{M7}}$$

A_{res}	58.0	mm^2	$0.25*F_{p,Cd}$	2768	N
f_{tbk}	300	N/mm^2	$0.50*F_{p,Cd}$	5537	N
γ_{m7}	1.1		$0.75*F_{p,Cd}$	8305	N
$F_{p,Cd}$	11073	N			

Figura 36 Calcolo precarico massimo applicabile da NTC18

Con:

- $F_{p,Cd}$ forza massima di precarico applicabile;
- F_{tbk} resistenza a rottura dell'acciaio;
- A_{res} area resistente della barra (Φ10);
- γ_{M7} coefficiente di sicurezza.

I carichi gravitazionali, il precarico sulle barre e il protocollo di carico sono uguali per tutti i modelli studiati. Conformemente all'ECCS85, l'ampiezza del protocollo dipende dal valore di deformazione allo snervamento (Figura 37) che prevede:

- un ciclo per ogni ampiezza pari a: $0.25u_y$, $0.50u_y$, $0.75u_y$ e $1.00u_y$;
- tre cicli per ogni ampiezza pari a: $2.00u_y$, $4.00u_y$, $6.00u_y$…

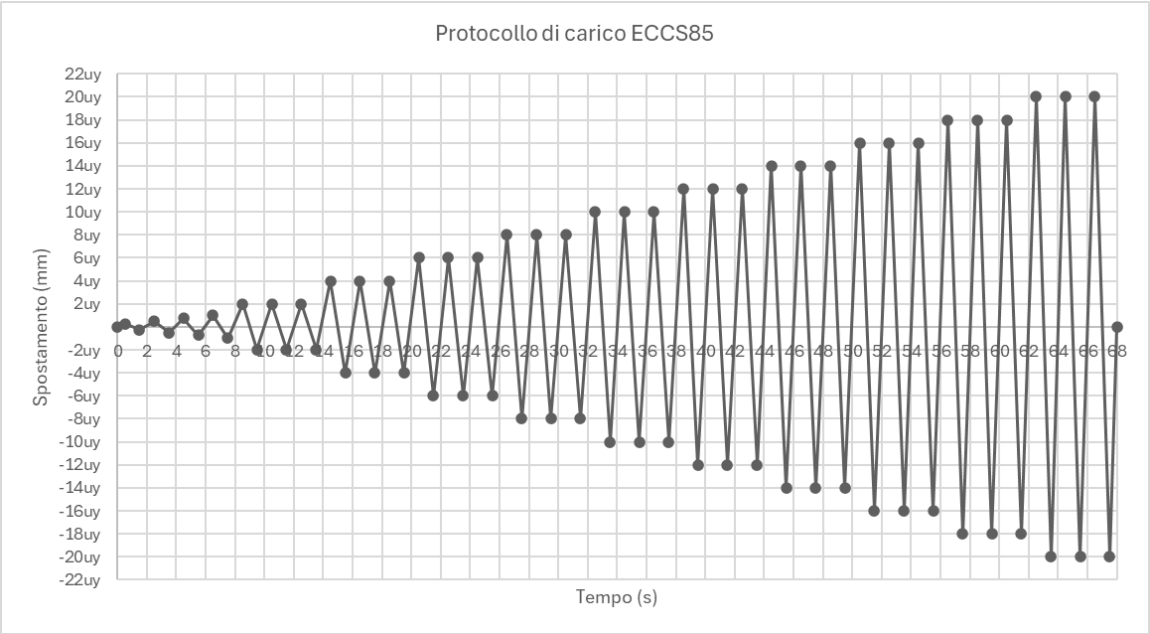


Figura 37 Protocollo di carico secondo ECCS 85

Dato l'elevato numero di analisi condotto è stato preso come valore di deformazione di snervamento un unico valore, ricavato nelle analisi condotte nei precedenti anni, permettendo così di avere per tutti i modelli il medesimo protocollo di carico. Il valore di snervamento preso come riferimento per le ampiezze dei cicli è pari 0.0085 m, il ciclo era stato spinto fino a quando si raggiungevano le tensioni di rottura nelle barre (ampiezza del ciclo pari a $20u_y$).

4.3 Analisi cicliche

Per tutti i modelli studiati di entrambi i prototipi delle connessioni sono state condotte delle analisi cicliche. Per ognuno di questi modelli è stato ricavato l'andamento del ciclo in termini di spostamento applicato in sommità e forza in sommità dal quale sono poi stati ricavati i valori di resistenza massima e il coefficiente di smorzamento viscoso calcolato come rapporto tra l'energia plastica (E_d), pari all'area sottesa al grafico dell'andamento ciclico, e quella elastica (E_s) del ciclo secondo la formula:

$$\nu_{eq} = \frac{E_d}{4\pi E_s}$$

Nei casi analizzati, i valori di energia plastica E_d ed energia elastica E_s sono stati calcolati andando a sommare i contributi di energia di ogni singolo ciclo ($E_d=\Sigma E_{di}$, $E_s=\Sigma E_{si}$) (Figura 38). Successivamente i due dati di energia ricavati sono stati utilizzati per il calcolo del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente.

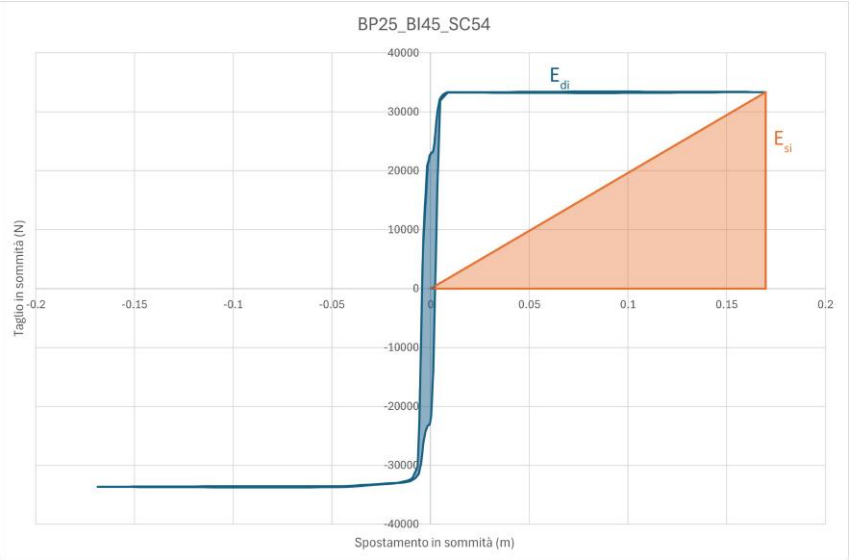


Figura 38 Esempio calcolo di E_d e E_s del ciclo i-esimo

Oltre ai risultati principali derivanti dal ciclo di carico, quali la resistenza massima e il coefficiente di smorzamento viscoso, l'analisi è stata ulteriormente approfondita osservando altri aspetti critici del comportamento strutturale. In particolare, è stato esaminato:

- L'andamento medio delle tensioni e deformazioni nelle barre del sistema resistente a trazione. Considerando che le barre lavorano in fase alterne si è deciso di prendere come riferimento i valori ottenuti da una sola di queste;
- Evoluzione delle deformazioni nel pannello: con l'obiettivo di verificare che le deformazioni plastiche fossero localizzate nei pressi della zona di contatto tra il pannello

e il sistema resistente a taglio, luogo in cui il panello viene maggiormente sollecitato nelle fasi di rocking e/o sliding.

È importante notare che il software utilizzato, per le analisi eseguite, non prevede un criterio di modellazione del danno nei punti in cui i materiali raggiungono le resistenze ultime ipotizzate per tanto le condizioni di collasso strutturale che si potrebbero raggiungere durante l'analisi sono state controllate puntualmente e globalmente a seguito delle analisi condotte. Inoltre, le procedure di calcolo dei software ad elementi finiti solitamente continuano l'analisi numerica fintanto che risultino soddisfatte le condizioni di congruenza e di equilibrio del modello analizzato.

Per questi motivi, come si vedrà nei risultati riportati nei successivi capitoli e allegati, è stato necessario, in fase di post-processione, interrompere alcune analisi in quanto erano stati superati i valori di tensioni e deformazioni ultimi del materiale. Questo ha portato ad escludere, per il calcolo della resistenza e del coefficiente di smorzamento viscoso, tutti i dati ottenuti dalle analisi successivi al raggiungimento dei valori ultimi del materiale. Per tutte le configurazioni con BP0 è stato necessario escludere tutti i dati successivi al raggiungimento della deformazione ultima nelle barre in acciaio. In ALLEGATO A: Risultati prototipo a semplice curvatura e ALLEGATO B: Risultati prototipo a doppia curvatura tutti grafici, con BP0, delle deformazioni delle barre riportano evidenziato il punto in cui viene raggiunta la deformazione ultima dell'acciaio.

5 RISULTATI

I risultati delle analisi sono stati riportati suddividendoli in base ai due prototipi. Per ogni prototipo i risultati delle analisi parametriche sono stati presentati suddivisi in base al livello di precarico. Vengono analizzati sia l'andamento medio delle tensioni che delle deformazioni nelle barre, sia l'evoluzione delle deformazioni nel pannello.

Per semplificare l'esposizione, nel presente capitolo sono stati selezionati dei casi rappresentativi per ciascun livello di precarico. I risultati completi vengono riportati negli allegati.

5.1 Risultati prototipo a semplice curvatura

Di seguito sono stati riportati i risultati delle analisi parametriche eseguite per il prototipo a semplice curvatura suddivisi in base al livello di precarico. Per ogni livello sono analizzati come variano le caratteristiche di resistenza massima e coefficiente di smorzamento per tutte le configurazioni studiate, con lo stesso livello di precarico, e successivamente è stato riportato lo studio di una delle configurazioni analizzate riportando il comportamento ciclico e dell'andamento delle tensioni e deformazioni nelle barre in acciaio e nel pannello in CLT. I risultati di tutte le configurazioni riguardanti il prototipo a semplice curvatura sono inserite nell'ALLEGATO A

5.1.1 Risultati per BP0

Per quanto riguarda le analisi con precarico nullo è stato osservato che lo snervamento delle barre precede il danneggiamento localizzato del pannello per tutte le configurazioni con inclinazioni delle barre pari a BI30, BI45 e BI60 (in totale 18 casi), mentre per le configurazioni con BI90 (6 casi) la plasticizzazione delle barre e successiva allo schiacciamento del pannello.

Di seguito vengono riportati, attraverso grafici 3D, l'andamento dei risultati delle analisi parametriche in termini di resistenza massima e coefficiente di smorzamento viscoso.

Nelle immagini inserite di seguito (Figura 39) vengono riportati i risultati in termini di resistenza massima (RF_x), l'immagine di sinistra riporta i risultati ottenuti per ogni configurazione studiata, mentre l'immagine a destra rappresenta in modo più chiaro, andando a realizzare una superficie passante per i punti, come varia la risposta in termini di resistenza massima. Dall'andamento risulta chiaro come questa caratteristica risulta fortemente influenzata dal valore di inclinazione delle barre, mentre il parametro riguardante la lunghezza della connessione a taglio non dà un contributo significativo.

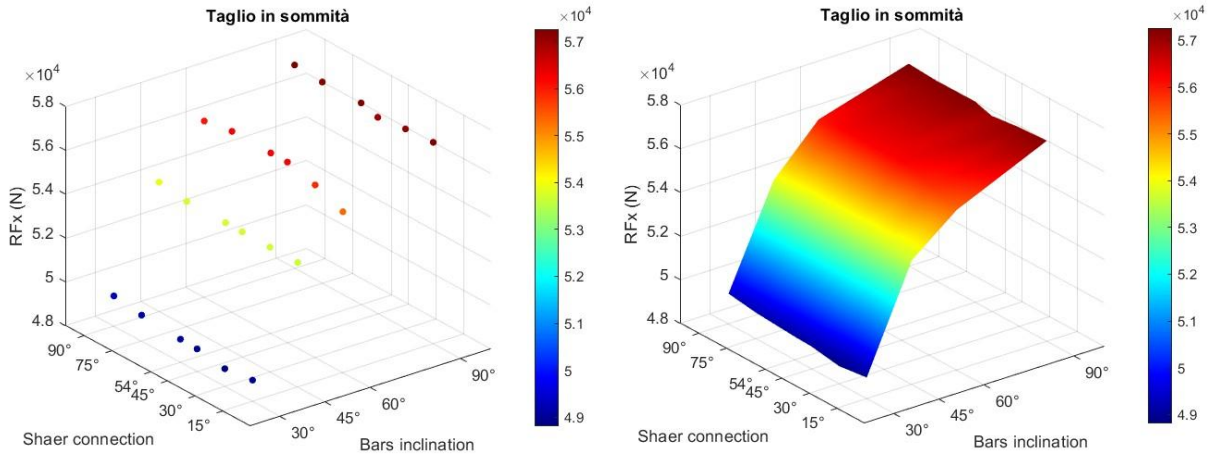


Figura 39 A sinistra i risultati in termini di resistenza massima per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP0)

Dall'andamento è possibile notare come si ha una crescita di resistenza molto alta passando dalle configurazioni BI30 a quelle BI45 e BI60, mentre dalle configurazioni BI60 a BI90 la resistenza aumenta ma con una pendenza inferiore. In Figura 40 vengono riportati i valori minimi e massimi registrati per la resistenza con le relative configurazioni.

	BP	BI	SC	RFx (N)
min	0	30	30	48806.2
max	0	90	90	57266.2
differenza percentuale				15%

Figura 40 Identificazione configurazioni con valore della resistenza minima e massima

Ottenendo una differenza percentuale tra i due valori, rispetto al valore massimo, pari al 15%. Per quanto riguarda il coefficiente di smorzamento viscoso, (Figura 41), in questo caso l'andamento risulta simile a quello della resistenza massima, infatti il coefficiente di smorzamento viscoso tende a crescere con l'aumentare dell'inclinazione delle barre. Anche in questo caso il parametro dell'estensione della connessione a taglio non risulta influire in maniera significativa sullo smorzamento del sistema.

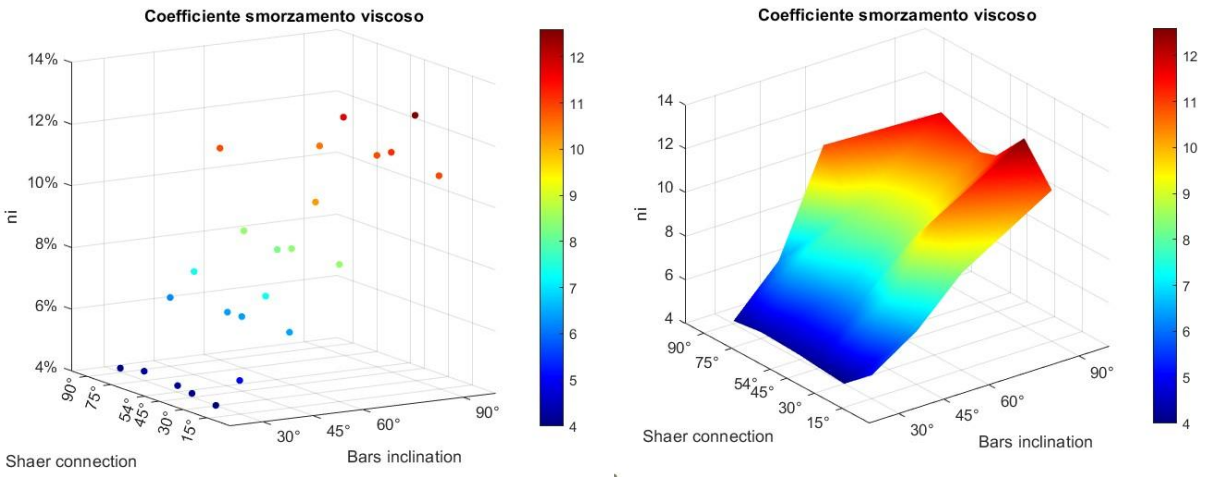


Figura 41 A sinistra i risultati in termini di coefficiente di smorzamento per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP0)

Come riportato in Figura 42 il valore minimo del coefficiente si smorzamento è stato registrato per una configurazione con il valore più basso del parametro BI, mentre il valore massimo è stato ottenuto per una configurazione con l'inclinazione delle barre pari a 90°.

	BP	BI	SC	v_{eq}
min	0	30	30	4
max	0	90	30	12.6
differenza percentuale				68%

Figura 42 Identificazione configurazioni con valore del coefficiente di smorzamento minimo e massimo

Per quanto riguarda il coefficiente di smorzamento, è stata osservata una differenza tra il valore massimo e minimo, sempre riferito al valore massimo, pari al 68%. Come descritto in precedenza, per il caso di precarico nullo lo snervamento delle barre precede il danneggiamento localizzato del pannello per tutte le configurazioni ad eccezione di quelle con inclinazione delle barre pari a 90°. Per ognuno di questi si è poi andati ad osservare l'andamento medio delle tensioni e delle deformazioni delle barre, mentre per quanto riguarda il pannello si è andati ad osservare se la plasticizzazione che si verifica durante il protocollo di carico fosse localizzata alle zone in cui il pannello è in contatto con il sistema resistente a taglio. Di seguito vengono riportati il grafico dell'analisi ciclica eseguita, l'andamento medio delle tensioni e deformazioni nelle barra d'acciaio e infine la distribuzione localizzata delle deformazioni plastiche nel pannello in legno (condizione che si verifica per tutti i modelli).

I grafici dell'analisi ciclica (Figura 43), per tutti i casi con BP0, mostrano un'area sottesa alla curva più ampia, questo perché durante il ciclo si verificano sia la plasticizzazione della barra, dal grafico della media delle tensioni nella barra, (Figura 44), è possibile vedere come la barra raggiunge il valore di rottura (300 MPa), che la plasticizzazione locale del legno portando quindi ad avere un'elevata energia di dissipazione. Anche l'andamento medio delle deformazioni raggiunge il valore di rottura che erano stati definiti per il materiale (Figura 45).

Per la verifica dello sviluppo localizzato delle deformazioni nel pannello si è proceduto andando ad osservare come queste si sviluppavano durante il ciclo, in Figura 46 viene riportato come si distribuiscono, alla fine dell'analisi, nella zona di contatto tra il pannello e il sistema resistente a taglio.

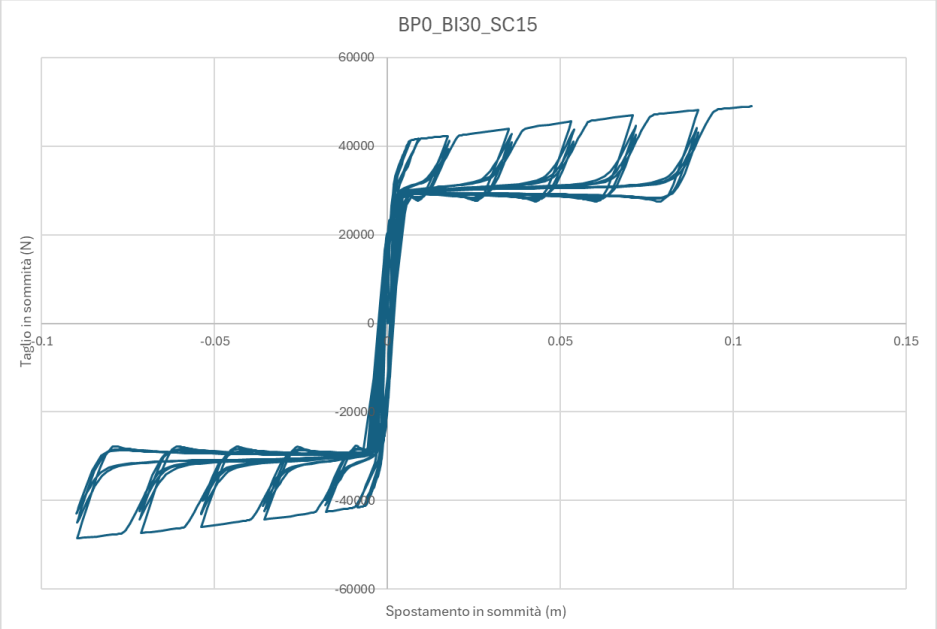


Figura 43 Analisi ciclica

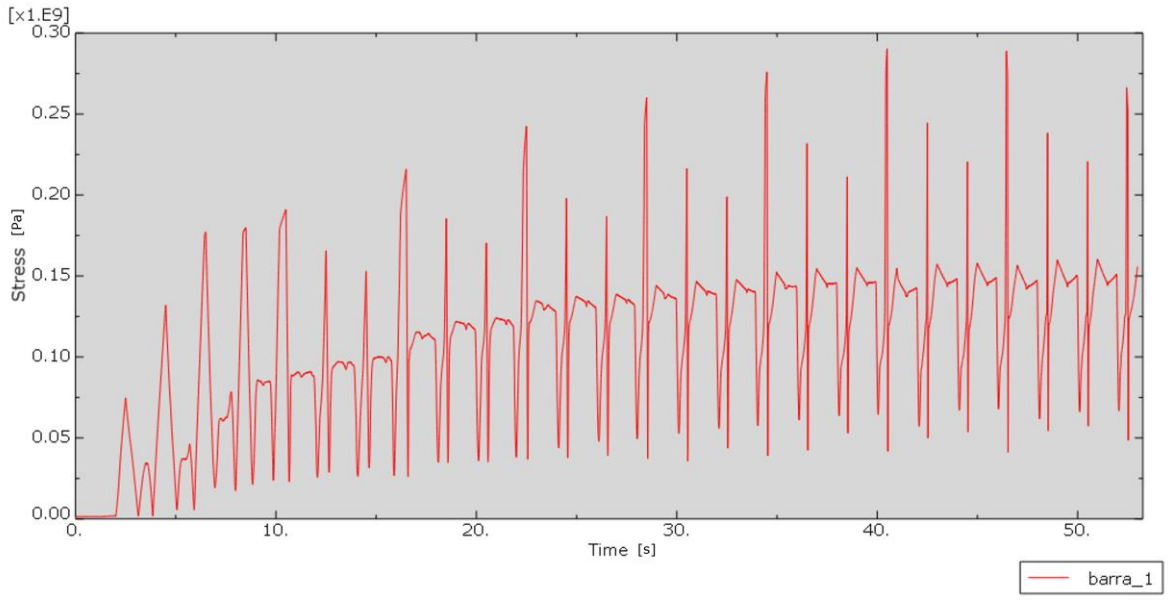


Figura 44 Andamento medio delle tensioni della barra durante l'analisi

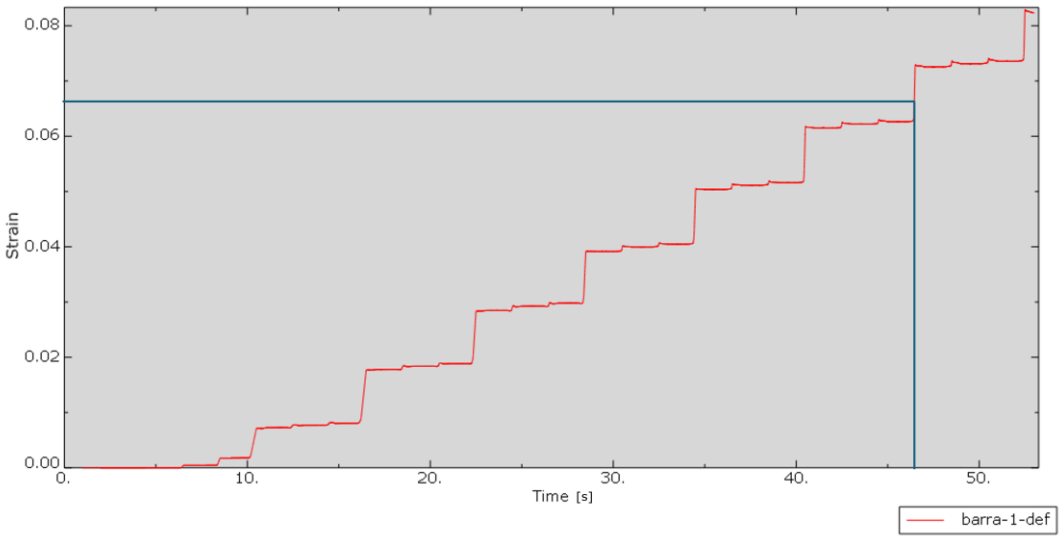


Figura 45 Andamento medio delle deformazioni della barra durante l'analisi

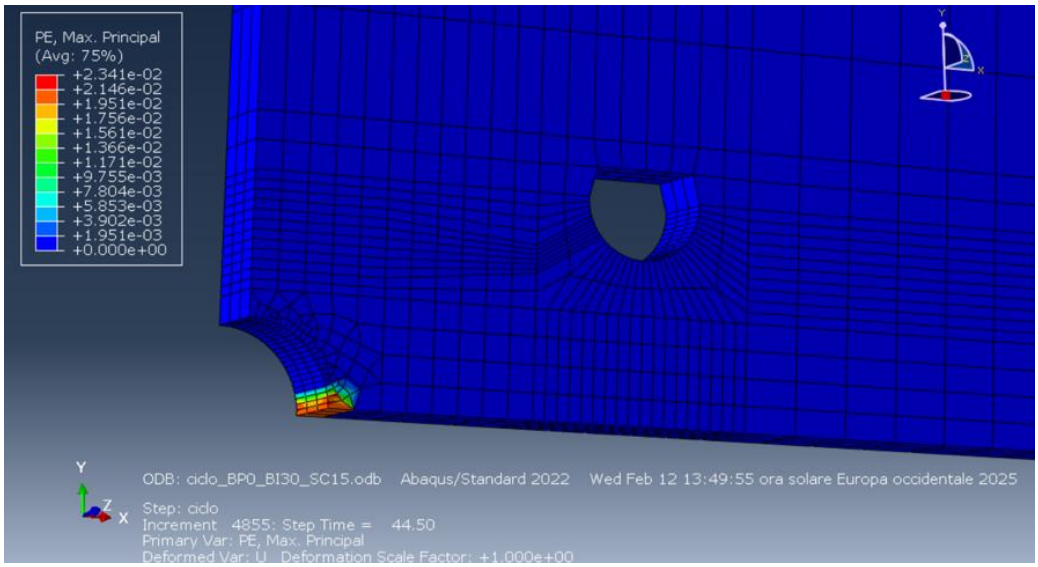


Figura 46 Distribuzione localizzata delle deformazioni plastiche che si sviluppano nel pannello in CLT

5.1.2 Risultati per BP25

Per le analisi eseguite con precarico pari al 25% si è osservato che l'elemento che raggiunge per primo la palsticizzazione è sempre il pannello.

Come per il caso di precarico nullo vengono riportati i grafici 3D che rappresentano l'andamento della resistenza massima e del coefficiente di smorzamento viscoso.

Dall'andamento dei risultati ottenuti (Figura 47) risulta chiaro come, anche in questo caso con il valore di precarico pari al 25% del valore massimo applicabile, questa caratteristica risulta fortemente influenzata dal valore di inclinazione delle barre.

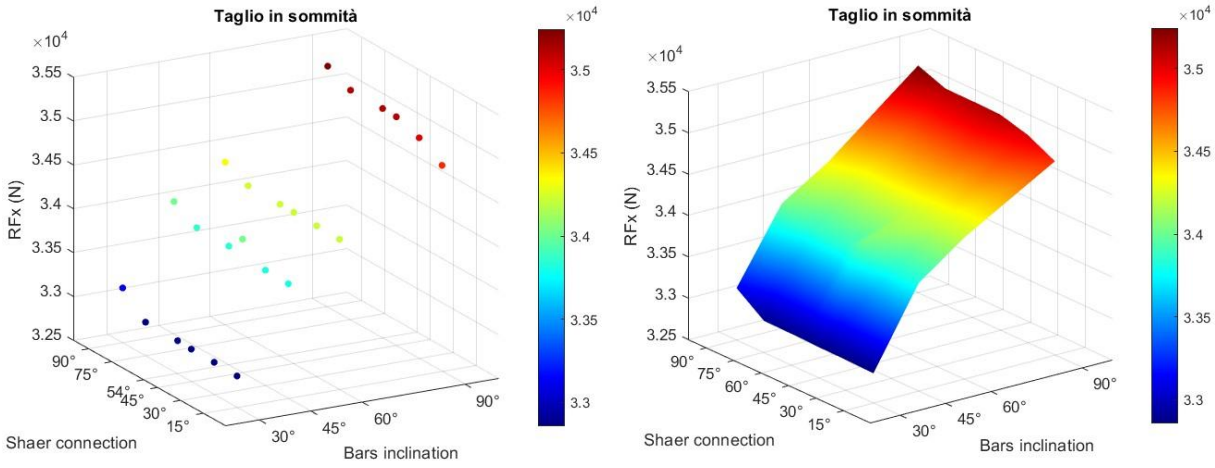


Figura 47 A sinistra i risultati in termini di resistenza massima per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP25)

Dall'andamento è possibile notare anche una crescita repentina sia passando dalle configurazione con BI30 a BI45 che dal passaggio da BI60 a BI90, mentre dalle configurazioni con BI45 a BI60 la resistenza tende ad aumentare ma in maniera più graduale. In Figura 48 vengono riportati i valori minimi e massimi con le corrispondenti configurazioni.

	BP	BI	SC	RFx (N)
min	25	30	15	32856.9
max	25	90	90	35244.4
differenza percentuale				7%

Figura 48 Configurazioni con i valori minimo e massimo della resistenza

Notando una differenza percentuale pari al 7% tra il valore massimo e quello minimo.

Per il coefficiente di smorzamento viscoso, (Figura 49) ad eccezione delle configurazioni BP25_BI45_SC15 e BP25_BI45_SC30 che presentano una energia plastica dissipata maggiore rispetto alle altre configurazioni con BI45, l'andamento sembra anche qui essere governato dall'inclinazione delle barre crescendo all'aumentare dell'angolo di quest'ultime.

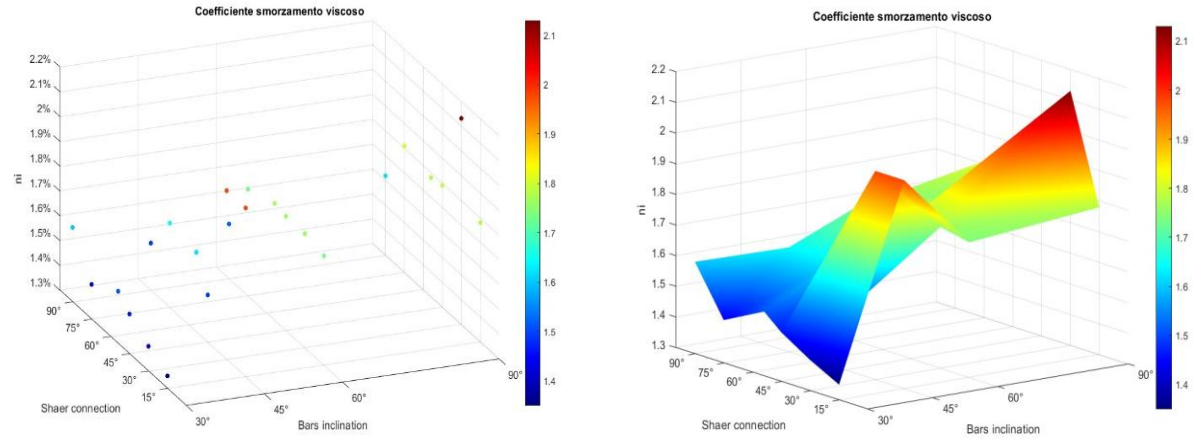


Figura 49 A sinistra i risultati in termini di coefficiente di smorzamento per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP25)

Il valore minimo e massimo dello smorzamento è stato ottenuto rispettivamente nelle configurazioni BP25_BI30_SC15 e BP25_BI90_SC30 (Figura 50), registrando una differenza percentuale pari al 37%.

	BP	BI	SC	v_{eq}
min	25	30	15	1.35
max	25	90	30	2.13
differenza percentuale				37%

Figura 50 Valori minimo e massimo dello smorzamento per le configurazioni con BP25

Per quanto concerne lo studio della plasticizzazione degli elementi, dalle analisi eseguite si evince che per tutti i casi con precarico BP25 il primo elemento a danneggiarsi è sempre la parete, andando a danneggiarsi sempre nella zona a contatto con il sistema resistente alle sollecitazioni taglianti.

Dal grafico dell'analisi ciclica, che mette in relazione il taglio in sommità con lo spostamento in sommità (Figura 51), si nota immediatamente un comportamento molto rigido e una bassa dissipazione di energia, inferiore a quella osservata per i casi con precarico nullo, che avviene attraverso il fenomeno del rocking a causa della plasticizzazione locale del pannello (Figura 54). Andando ad osservare la media di tutte le tensioni sviluppate nei punti della barra, (Figura 52), si nota che in nessun caso viene raggiunta la tensione di snervamento. A differenza delle analisi con precarico nullo in cui le tensioni nelle barre partivano da un valore pari a zero, nel caso con precarico al 25% la tensione nelle fasi iniziali del protocollo di carico è pari a quella prodotta del serraggio. Dal grafico delle deformazioni è possibile notare come con il progredire del ciclo la media delle deformazioni tende ad incrementare (Figura 53).

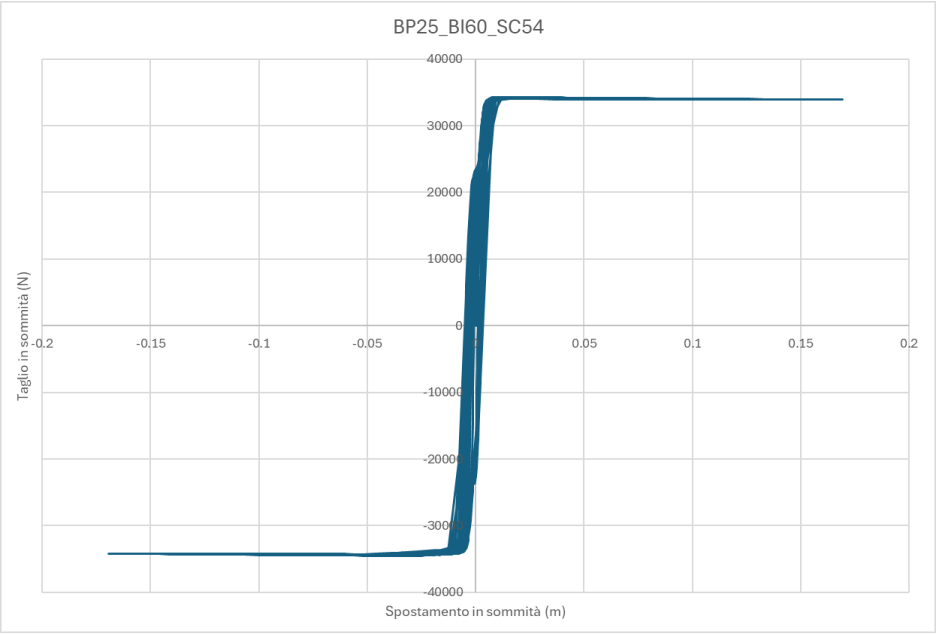


Figura 51 Analisi ciclica

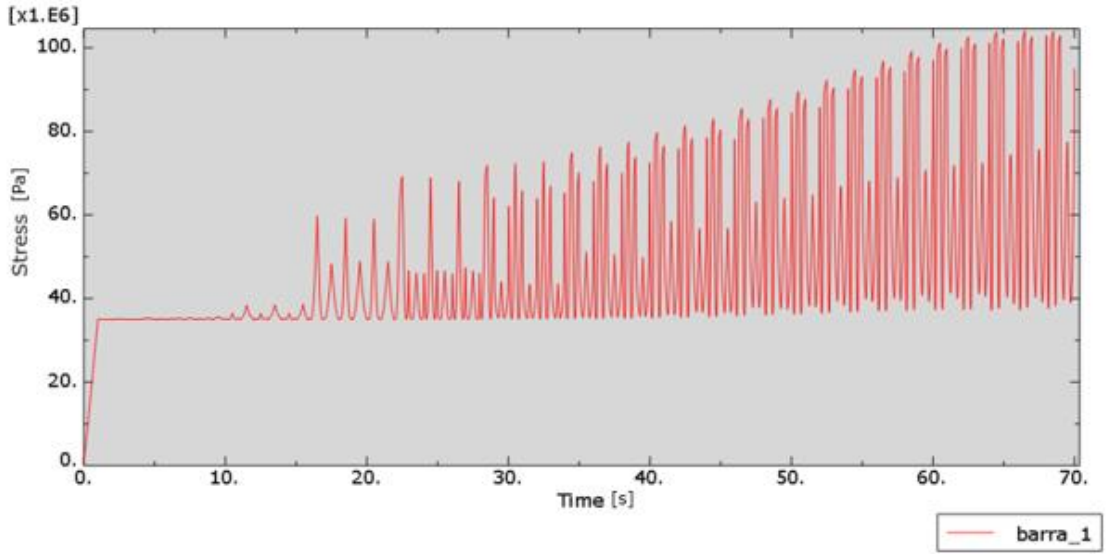


Figura 52 Andamento medio delle tensioni della barra durante l'analisi

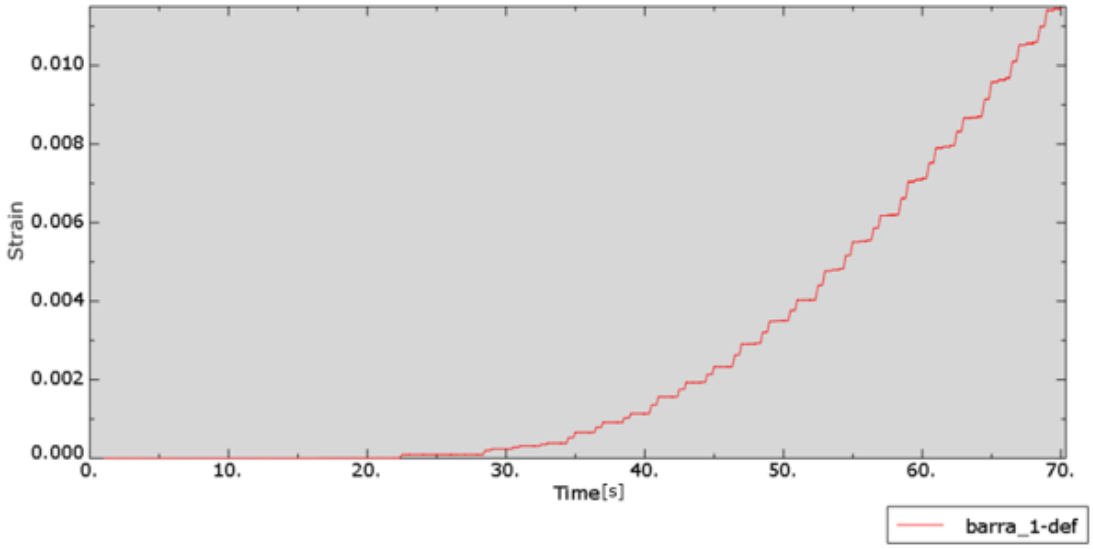


Figura 53 Andamento medio delle deformazioni della barra durante l'analisi

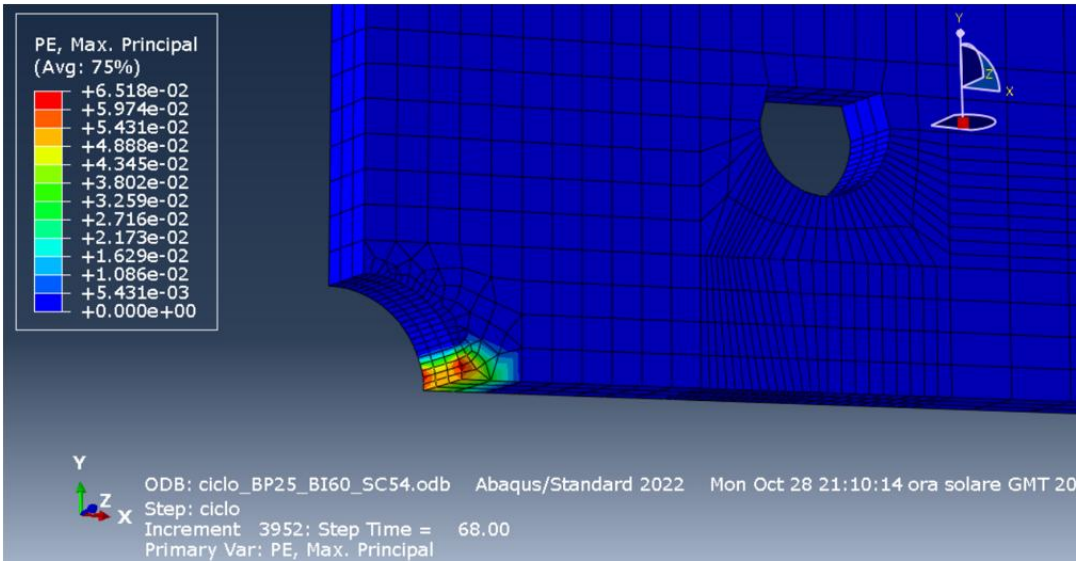


Figura 54 Distribuzione localizzata delle deformazioni plastiche che si sviluppano nel pannello in CLT

5.1.3 Risultati per BP50

Come per il caso con il precarico al 25%, anche nei modelli con il precarico al 50% è stato osservato che la plasticizzazione viene raggiunta prima dal pannello nella zona antistante il sistema resistente a taglio. I risultati in termini di resistenza massima, (Figura 55), mostrano un andamento che rispetta quello osservato nei casi di livello di precarico precedente (la resistenza massima aumenta all'aumentare dell'inclinazione delle barre del sistema resistente a trazione).

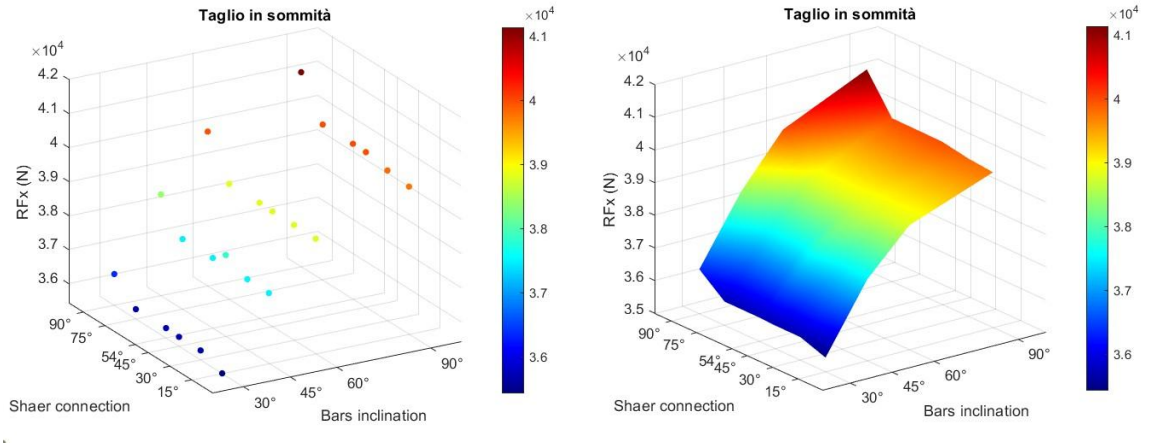


Figura 55 A sinistra i risultati in termini di resistenza massima per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP50)

Per quanto riguarda il valore di precarico pari al 50% i valori massimo e minimi sono stati ottenuti rispettivamente nelle configurazioni BP50_BI90_SC90 e BP50_BI30_SC15 (Figura 56), registrando una diminuzione, rispetto al valore massimo, pari al 14%.

	BP	BI	SC	RFx (N)
min	50	30	15	35430
max	50	90	90	41138
differenza percentuale				14%

Figura 56 Valore minimo e massimo della resistenza del sistema

Per il coefficiente di smorzamento viscoso, (Figura 57), è possibile notare una grande similitudine tra l'andamento per il precarico al 50% e quello al 25%, con un leggero aumento dei valori dello smorzamento.

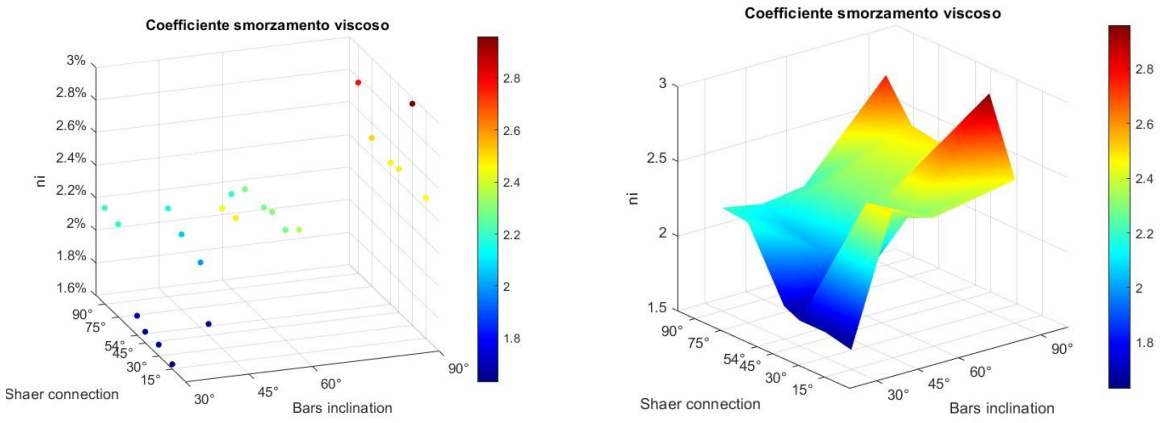


Figura 57 A sinistra i risultati in termini di coefficiente di smorzamento per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP50)

Come riportato in Figura 58 il valore minimo del coefficiente si smorzamento è stato registrato per una configurazione con il valore più basso del parametro BI, mentre il valore massimo è stato ottenuto per una configurazione con l'inclinazione delle barre pari a 90°. Osservando una differenza percentuale tra i due valori pari al 45%.

	BP	BI	SC	v_{eq}
min	50	30	15	1.63
max	50	90	30	2.96
differenza percentuale				45%

Figura 58 Valori massimo e minimo dello smorzamento per le configurazioni con BP50

Anche in questo caso l'elemento si danneggia prima durante l'analisi ciclica è la parete per tutte le configurazione delle analisi eseguite.

I risultati dell'analisi ciclica per i modelli con precarico BP50 presentano un andamento molto simile a quello visto per i casi con precarico BP25 (Figura 59), evidente anche in questo caso l'elevata rigidezza e la bassa dissipazione che anche in questi casi avviene attraverso il fenomeno del rocking, andando a plasticizzare la zona del pannello vicino il sistema resistente a taglio, plasticizzazione che resta localizzata fino alla fine del ciclo (Figura 62). Dal punto di vista delle tensioni che si sviluppano nelle barre (Figura 60) è subito evidente l'aumento di tensione dovuto al precarico maggiore, ma anche in questo caso osservando il grafico della media delle tensioni che si sviluppano nel corso del protocollo di carico si può notare che la tensione di snervamento del materiale (180 MPa) non viene raggiunta. Il grafico delle deformazioni, come per il caso precedente, mostra un andamento che va crescendo con l'andare avanti dell'analisi ciclica (Figura 61).

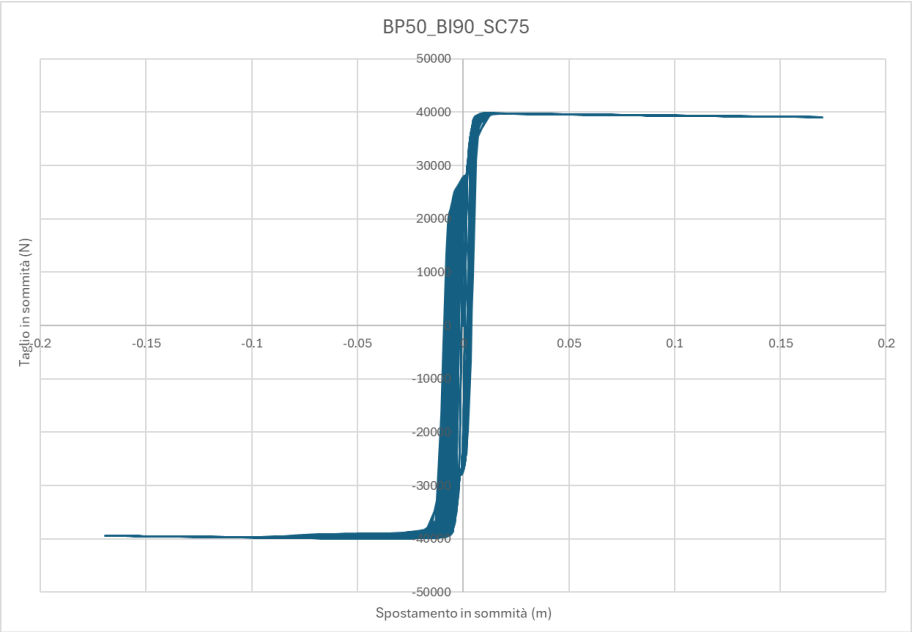


Figura 59 Analisi ciclica

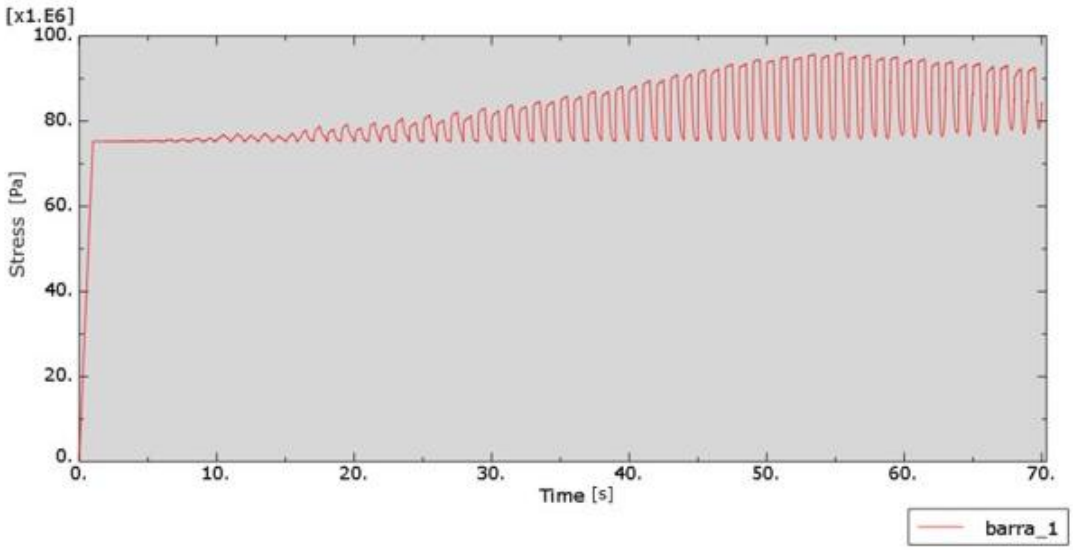


Figura 60 Andamento medio delle tensioni della barra durante l'analisi

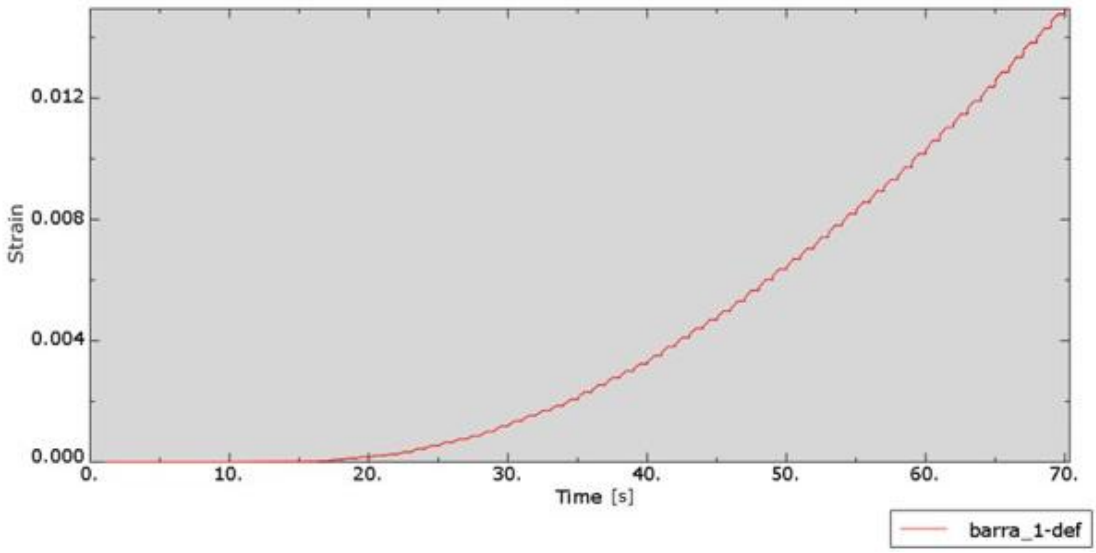


Figura 61 Andamento medio delle deformazioni della barra durante l'analisi

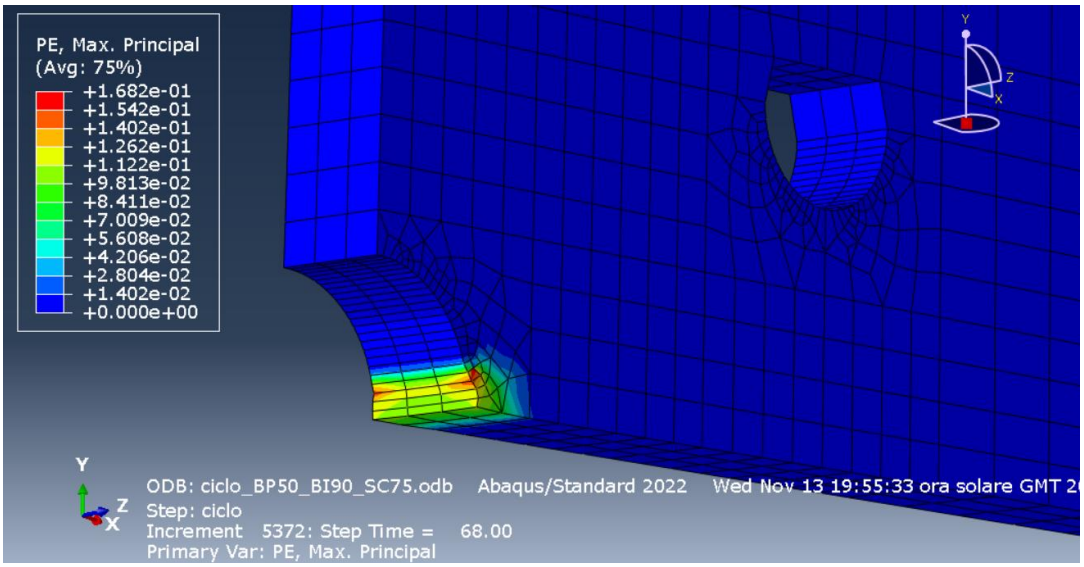


Figura 62 Distribuzione localizzata delle deformazioni plastiche che si sviluppano nel pannello in CLT

5.1.4 Risultati per BP75

Anche nel caso dei modelli con precarico al 75% si è osservato che la plasticizzazione si verifica inizialmente nella zona del pannello vicino la connessione a taglio.

La resistenza massima risulta, anche in quest'ultimo caso, fortemente influenzata dal parametro dell'inclinazione delle barre aumentando passando dalla configurazione BI30 fino ai valori massimi registrati per BI90 (Figura 63). Registrando il valore minimo per le configurazioni con BI30 e il valore massimo con BI90 (Figura 64), con una differenza percentuale, rispetto al valore massimo pari al 17%.

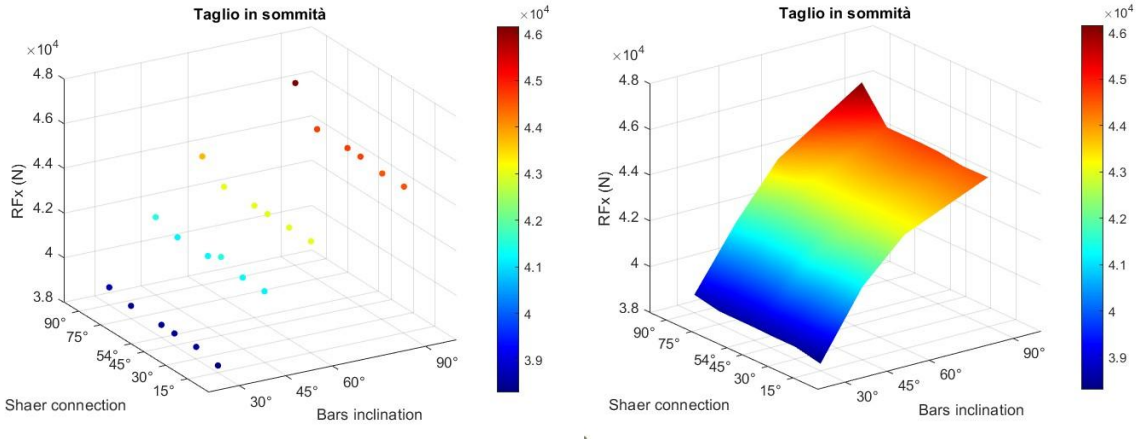


Figura 63 A sinistra i risultati in termini di resistenza massima per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP75)

	BP	BI	SC	RFx (N)
min	75	30	15	38304
max	75	90	90	46159
differenza percentuale				17%

Figura 64 Valori massimo e minimo della resistenza per le configurazioni con BP75

Dai grafici dei risultati del coefficiente di smorzamento viscoso (Figura 65) è possibile notare una grande similitudine con l'andamento registrato per i risultati dei modelli con precarico BP50 e BP25. Anche in questo caso, all'aumentare del precarico applicato alle barre, i valori del coefficiente di smorzamento tendono ad aumentare rispetto ai modelli con BP50 (Figura 66), osservando una diminuzione del valore pari al 51% rispetto al valore massimo.

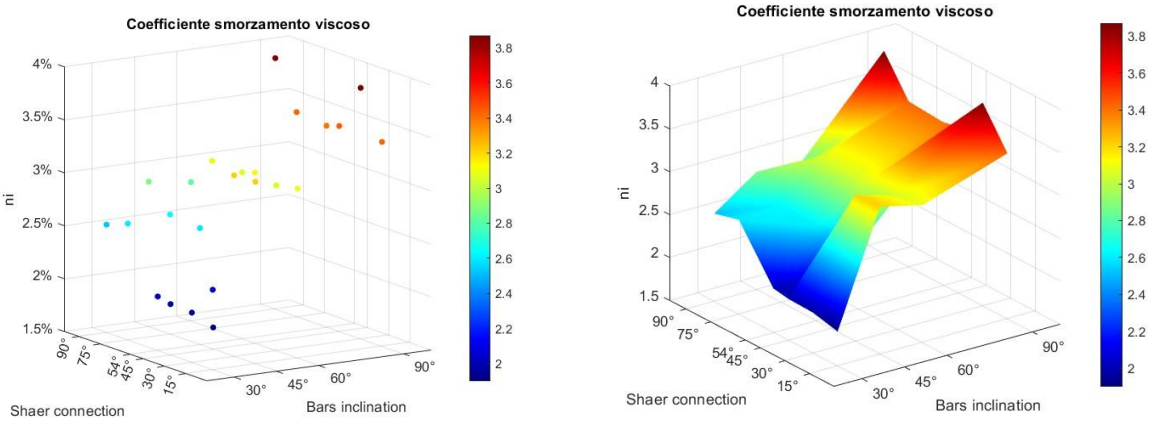


Figura 65 A sinistra i risultati in termini di coefficiente di smorzamento per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP75)

	BP	BI	SC	v_{eq}
min	75	30	15	1.9
max	75	90	30	3.87
differenza percentuale				51%

Figura 66 Valori massimo e minimo per il coefficiente di smorzamento per le configurazioni con BP75

L'analisi degli elementi che si plasticizzano nel corso del ciclo, come per entrambi i casi precedenti con un livello di precarico diverso da zero, ha evidenziato che la parte in CLT si plasticizza prima delle barre.

I risultati dell'analisi ciclica per i modelli con precarico BP75 presentano un andamento molto simile a quello visto per i casi con precarico BP25 e BP50 (Figura 67). Sia la bassa energia di dissipazione che la grande rigidezza sono evidenti dal grafico dell'analisi ciclica. Osservando il grafico della media delle tensioni (Figura 68) che si sviluppano nel corso del protocollo di carico si può notare che la tensione di snervamento del materiale (180 MPa) non viene raggiunta. Il grafico delle deformazioni, come per il caso precedente, mostra un andamento che va crescendo con l'andare avanti dell'analisi ciclica (Figura 69).

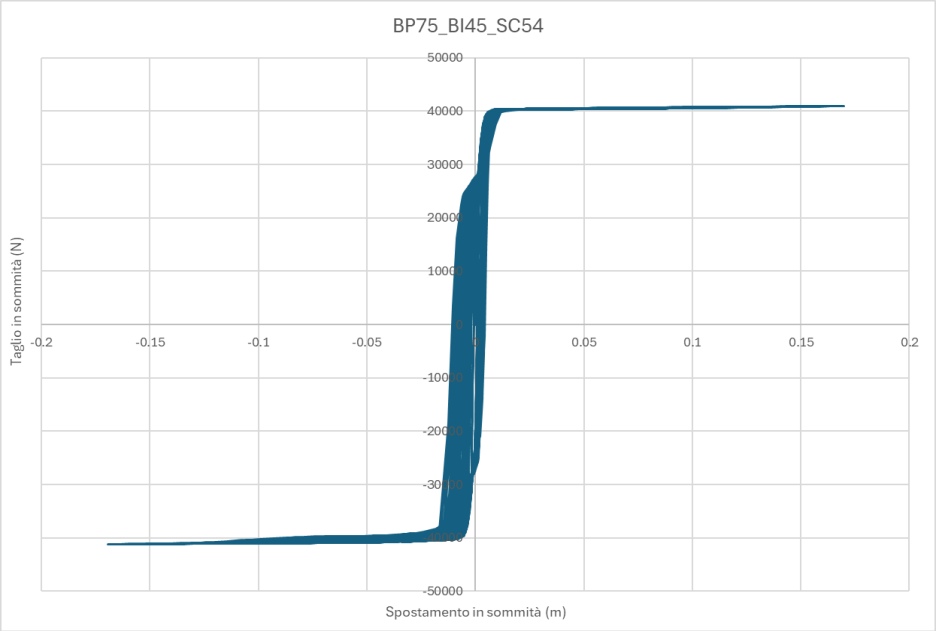


Figura 67 Analisi ciclica

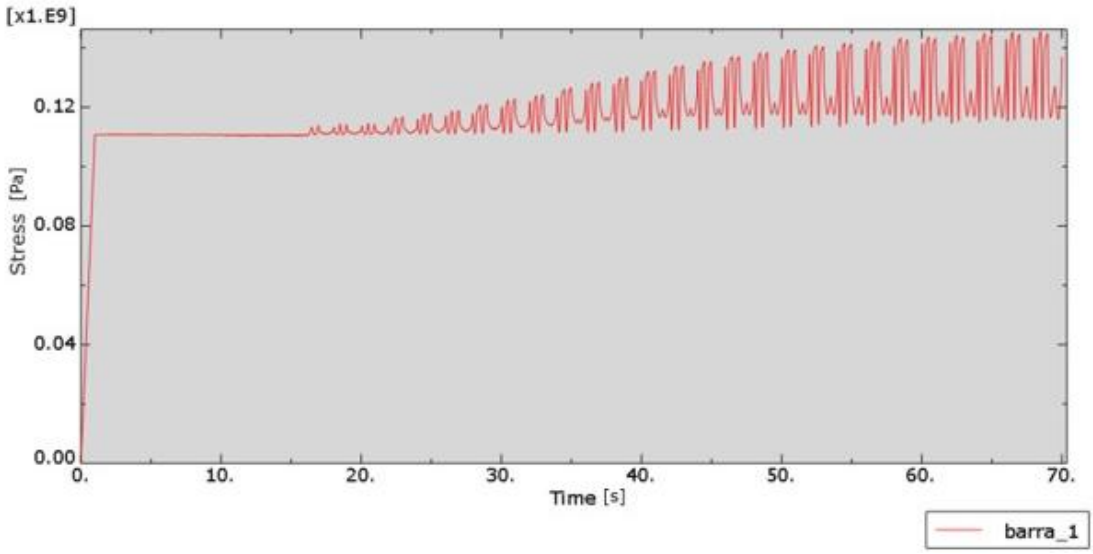


Figura 68 Andamento medio delle tensioni della barra durante l'analisi

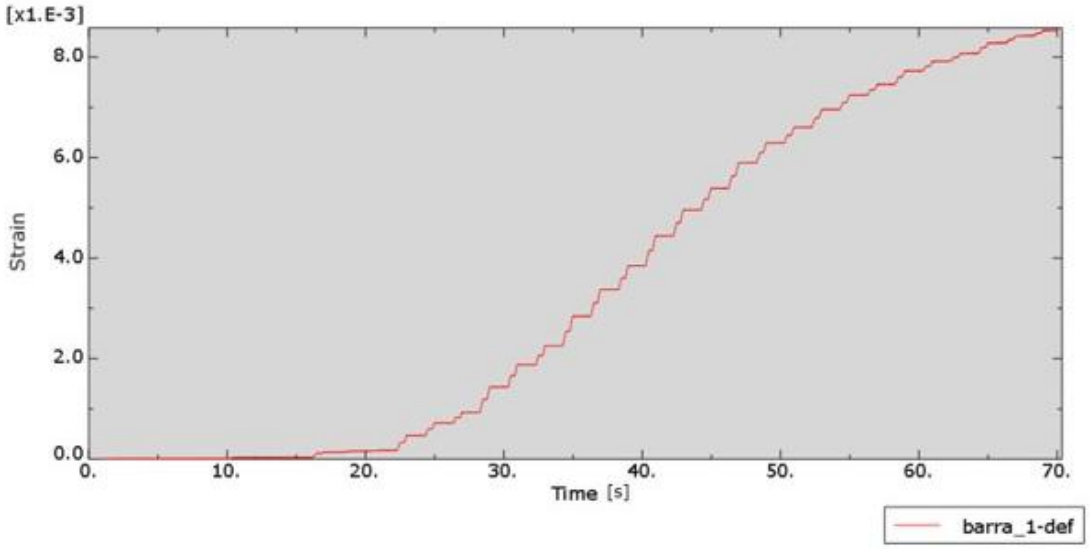


Figura 69 Andamento medio delle deformazioni della barra durante l'analisi

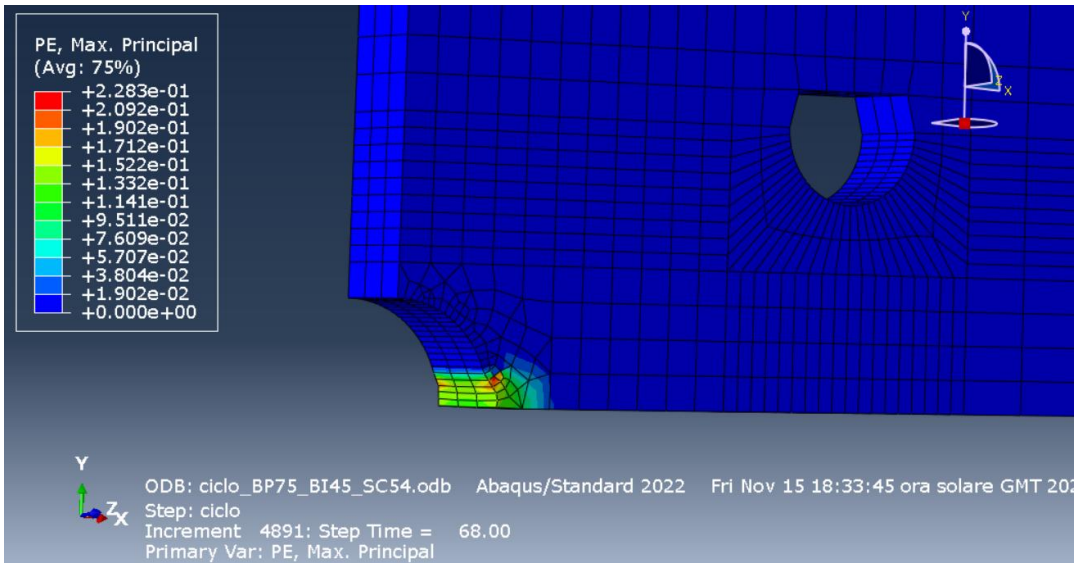


Figura 70 Distribuzione localizzata delle deformazioni plastiche che si sviluppano nel pannello in CLT

Anche in questi casi, come visibile in Figura 70, a fine ciclo le deformazioni plastiche nella parete sono concentrate nella zona sagomata per l'alloggiamento del piatto del sistema resistente alle sollecitazioni taglianti.

5.2 Risultati prototipo a doppia curvatura

I risultati delle analisi parametriche condotte sul prototipo a doppia curvatura sono presentati suddivisi in base al livello di precarico applicato. Per ciascun livello di precarico, si analizza la variazione della resistenza massima e del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente considerando tutte le configurazioni studiate con lo stesso livello di precarico. Successivamente, viene approfondito il comportamento di una specifica configurazione, includendo l'analisi del comportamento ciclico e l'evoluzione delle tensioni e delle

deformazioni nelle barre e lo sviluppo delle deformazioni nel pannello in CLT. A differenza di quanto visto per il primo prototipo, l'andamento del ciclo in termini di forza-spostamento risulta essere influenzato oltre che dal livello di precarico nelle barre anche dal parametro della connessione a taglio (SCr). Il gap presente tra il piatto in acciaio e il pannello in legno porta ad avere uno quota dello sliding che non viene recuperata, perdendo il meccanismo di ricentraggio osservato nel primo prototipo, ma dissipando più energia. Tutti i risultati relativi alle quarantotto configurazioni esaminate per il prototipo a doppia curvatura sono riportati nell'ALLEGATO B.

5.2.1 Risultati per BP0

Dalle analisi con precarico nullo è stato osservato che lo snervamento delle barre precede la rottura localizzata del pannello per tutte le configurazioni. Come già fatto per il primo prototipo, di seguito vengono riportati, attraverso grafici 3D, l'andamento dei risultati delle analisi parametriche in termini di resistenza massima e coefficiente di smorzamento viscoso.

Nelle immagini inserite di seguito (Figura 71) vengono riportati i risultati in termini di resistenza massima (RF_x), così da porter osservare come varia questo valore al variare dei parametri delle configurazioni analizzate. Dall'andamento risulta chiaro come questa caratteristica risulta fortemente influenzata sia dal valore di inclinazione delle barre, registrando valori inferiori per le configurazioni con BI30 .e massimi per BI90, che dal valore del parametro del raggio della doppia curvatura, portando ad avere valori di resistenza più alta per le configurazioni con SCr18 che vanno a diminuire all'aumentare del raggio.

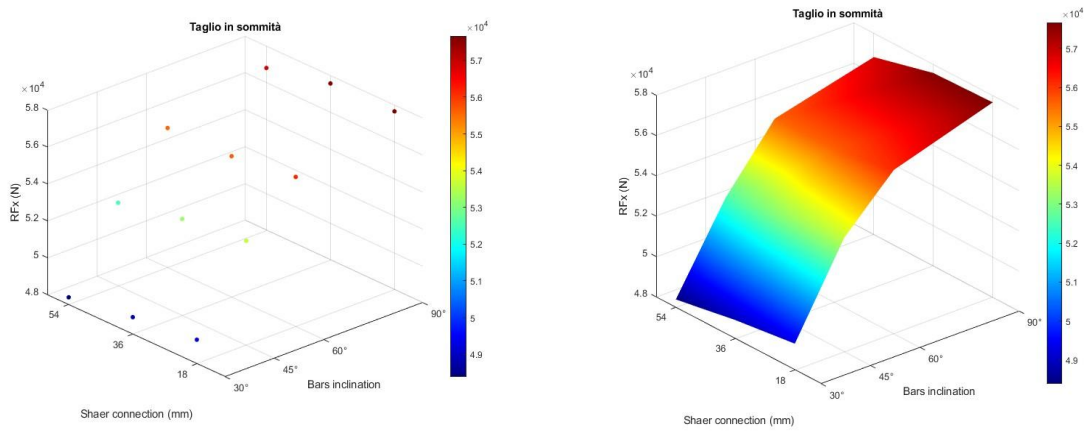


Figura 71 A sinistra i risultati in termini di resistenza massima per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP0)

In Figura 72 sono stati riportati il valore minimo e massimo, con le rispettive configurazioni, della resistenza ottenuti per le configurazioni con BP0.

	BP	BI	SCr	RFx (N)
min	0	30	54	48385
max	0	90	18	57665
differenza percentuale				16%

Figura 72 Valori massimo e minimo della resistenza del sistema con BP0, prototipo a doppia curvatura

Ottenendo una differenza percentuale tra il valore massimo e minimo pari al 16% (differenza rispetto al valore massimo). Per quanto riguarda il coefficiente di smorzamento viscoso (Figura 73), dall'andamento dei grafici si può notare come questo valore risulti influenzato nello stesso modo della resistenza per quanto riguarda il parametro BI, i valori crescono al crescere dell'angolo. Il parametro della SCr influenza in modo inverso, portando ad aver valori dello smorzamento superiori per le configurazioni con SCr54 e inferiori per quelle con SCr18. Come riportato in ALLEGATO B, tutti i casi con SCr54 presentano un'area sottesa al grafico dell'andamento ciclico maggiore rispetto agli altri casi, permettendo in questo modo di avere un maggiore smorzamento di energia.

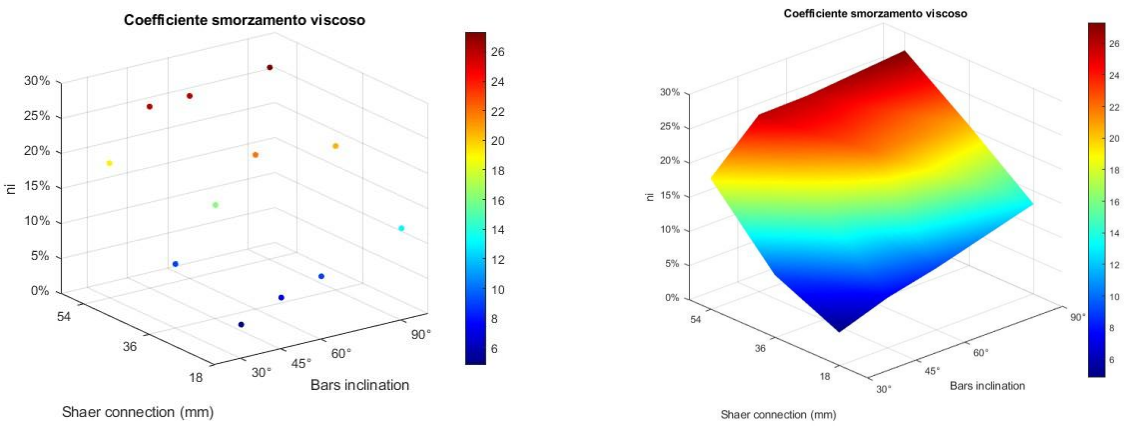


Figura 73 A sinistra i risultati in termini di coefficiente di smorzamento per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP0)

In Figura 74 sono stati riportati il valore più basso e più alto registrati per queste configurazioni.

	BP	BI	SCr	v_{eq}
min	0	30	18	4.84
max	0	90	54	27.31
differenza percentuale				82%

Figura 74 Valori massimo e minimo del coefficiente di smorzamento con BP0, prototipo a doppia curvatura

Per tutti i casi con BP0 è stato osservato che per le barre lo snervamento è antecedente al danneggiamento del pannello. Anche in questo caso i grafici dell'analisi ciclica con BP0, hanno mostrato un'area sottesa alla curva maggiore rispetto agli altri casi con diverso livello di precarico (Figura 75), questo perché per queste configurazioni, come è stato possibile vedere dal grafico della media delle tensioni (Figura 76), oltre al danneggiamento localizzato del pannello si verifica anche la plasticizzazione delle barre, che quindi contribuiscono alla

dissipazione dell'energia. Nei grafici, riportati in seguito, dello sviluppo delle deformazioni nelle barre (Figura 77) viene evidenziato (attraverso delle linee) il punto in cui viene raggiunta le deformazione a rottura delle barre. Dato che il software ha continuato l'analisi, anche se il materiale aveva superato la deformazione ultima, si è deciso di considerare i risultati dell'analisi solo fino a tale punto escludendo tutti i dati ricavati successivamente. Anche per queste configurazioni è stato osservato, a fine ciclo, che il danno nel pannello risulta localizzato alla zona di contatto tra il pannello e il piatto del sistema resistente a taglio(Figura 78).

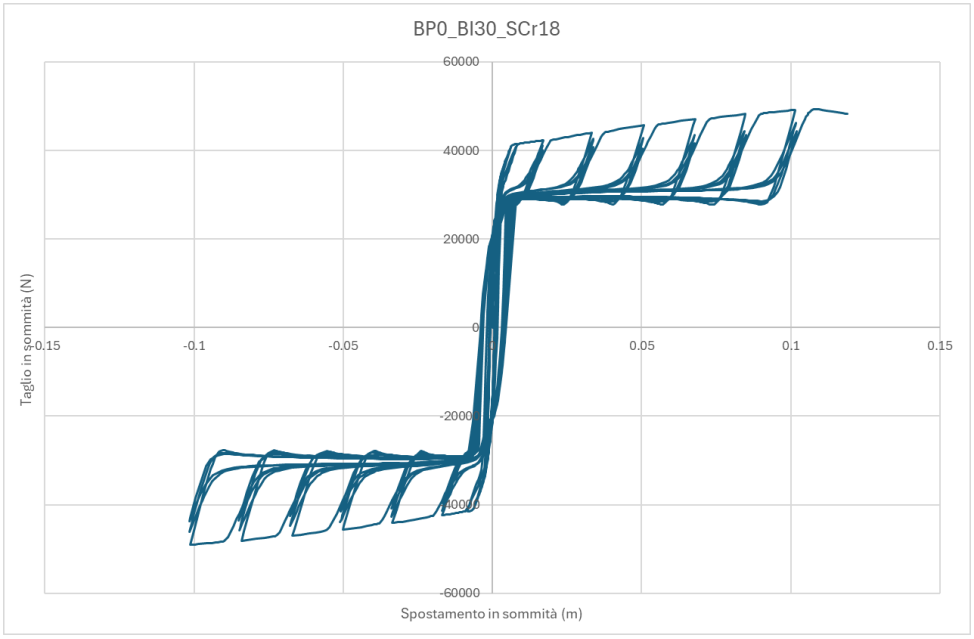


Figura 75 Analisi ciclico forza-spostamento

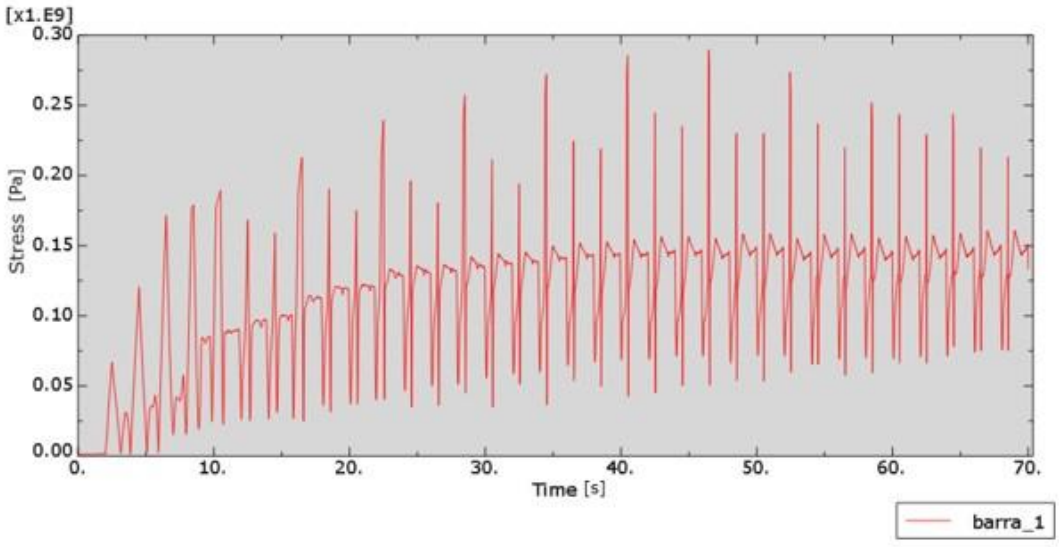


Figura 76 Andamento medio delle tensioni della barra durante l'analisi

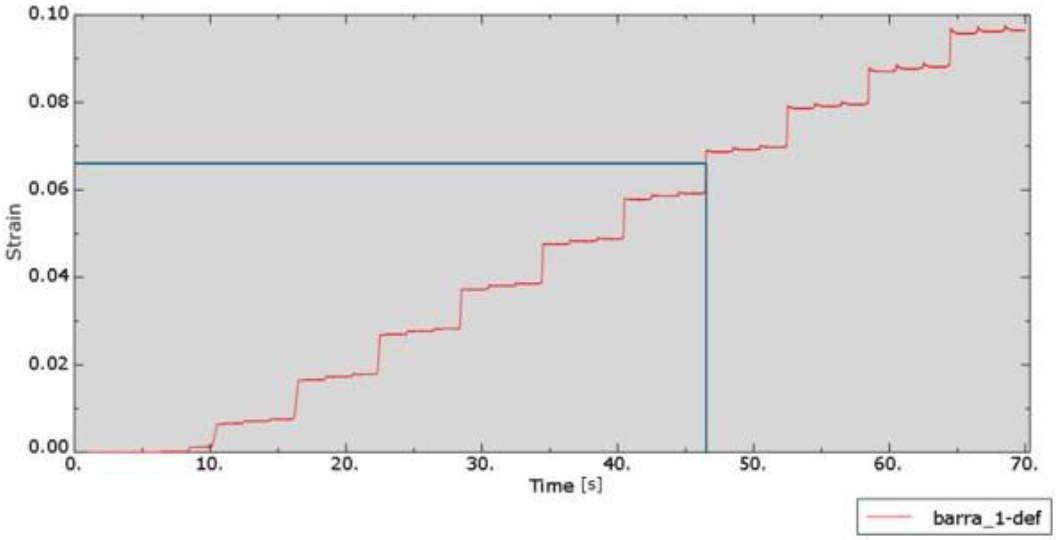


Figura 77 Andamento medio delle deformazioni della barra durante l'analisi

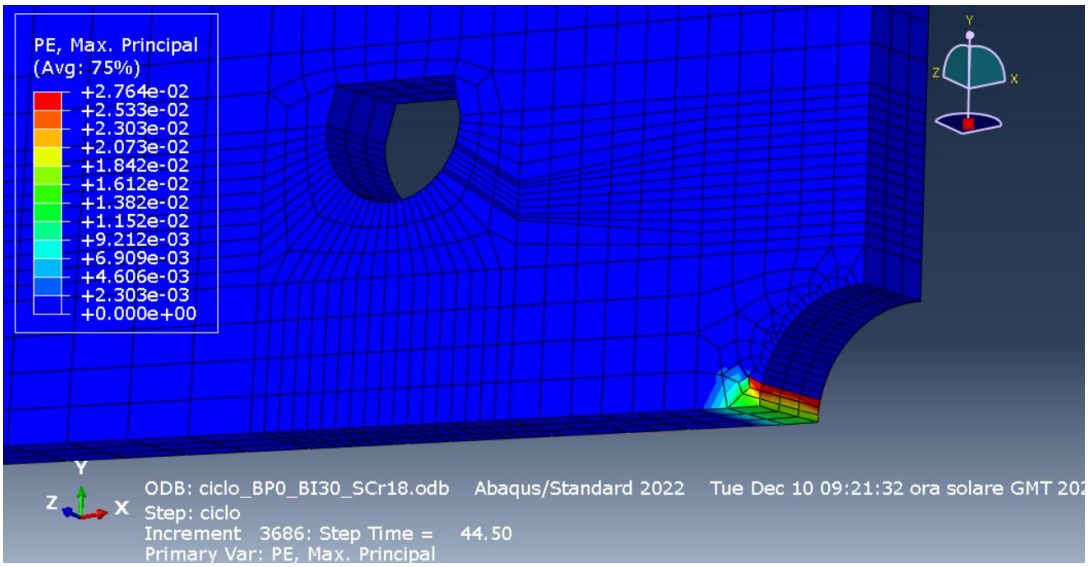


Figura 78 Distribuzione localizzata delle deformazioni plastiche che si sviluppano nel pannello in CLT

5.2.2 Risultati per BP25

I risultati delle analisi con il precarico al 25% hanno fatto notare, per tutte le configurazioni, che con l'applicazione del precarico la risposta del sistema in termini di andamento del ciclo (forza-spostamento) e sviluppo tensionale e deformativo durante il protocollo di carico cambia. Infatti, rispetto ai casi con BP0, le barre non raggiungono lo snervamento e di conseguenza il contributo che danno in termini di dissipazione di energia durante il ciclo è inferiore.

In termini di resistenza massima (Figura 79), anche per questo livello di precarico, l'andamento varia principalmente in base all'angolo di inclinazione delle barre (la resistenza aumenta all'aumentare dell'angolo), mentre, anche se meno evidente, la resistenza tende ad aumentare per valori di SCr più bassi.

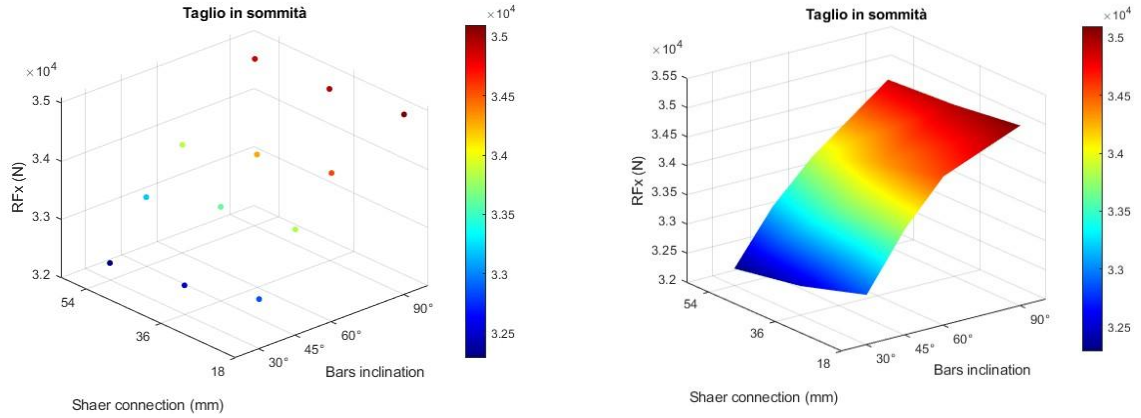


Figura 79 A sinistra i risultati in termini di resistenza massima per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP25)

Per quanto riguarda le configurazioni con il precarico pari al 25% i valori massimo e minimi sono stati ottenuti rispettivamente nelle configurazioni BP25_BI90_SC18 e BP25_BI30_SC54 (Figura 80), ottenendo una differenza percentuale del 8%.

	BP	BI	SCr	RFx (N)
min	25	30	54	32292
max	25	90	18	35095
differenza percentuale				8%

Figura 80 Valori massimo e minimo della resistenza del sistema con BP25, prototipo a doppia curvatura

Per quanto riguarda il coefficiente di smorzamento viscoso (Figura 81), questo risulta essere fortemente influenzato dal parametro della connessione a taglio (SCr), aumenta all'aumentare del raggio del ramo curvo del piatto resistente a taglio. Il parametro dell'inclinazione delle barre non risulta predominante, infatti il valore dello smorzamento non varia significativamente al variare di BI.

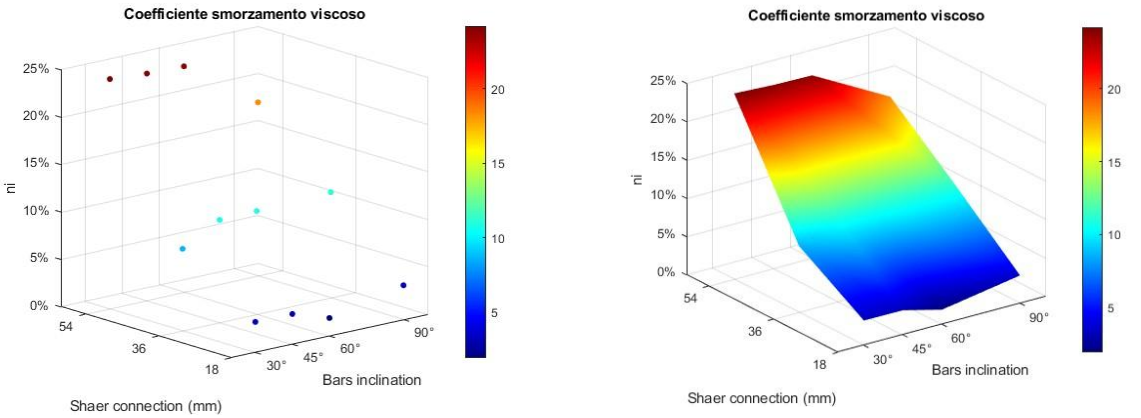


Figura 81 A sinistra i risultati in termini di coefficiente di smorzamento per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP25)

In Figura 82 vengono riportate le configurazione per le quali sono stati osservati i valori minimo e massimo del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente. In termini di differenza

percentuale tra questi valori è stata osservata una differenza pari al 92% rispetto al valore massimo.

	BP	BI	SCr	v_{eq}
min	25	30	18	1.9
max	25	90	54	24.22
differenza percentuale				92%

Figura 82 Valori massimo e minimo del coefficiente di smorzamento con BP25, prototipo a doppia curvatura

Dal grafico forza-spostamento dell'analisi ciclica (Figura 83), è possibile notare un comportamento molto rigido e una dissipazione di energia, inferiore a quella osservata per i casi con precarico nullo, che avviene attraverso il fenomeno del rocking e dello sliding e con il danneggiamento locale del pannello (Figura 86). Lo studio delle media delle tensioni sviluppate nei punti della barra, (Figura 84), ha evidenziato che in nessun caso viene raggiunta la tensione di snervamento. A seguito del serraggio le tensioni nella barra risultano superiori al caso con precarico nullo nelle prime fasi dell'analisi, senza però raggiungere mai lo snervamento nel corso del ciclo.

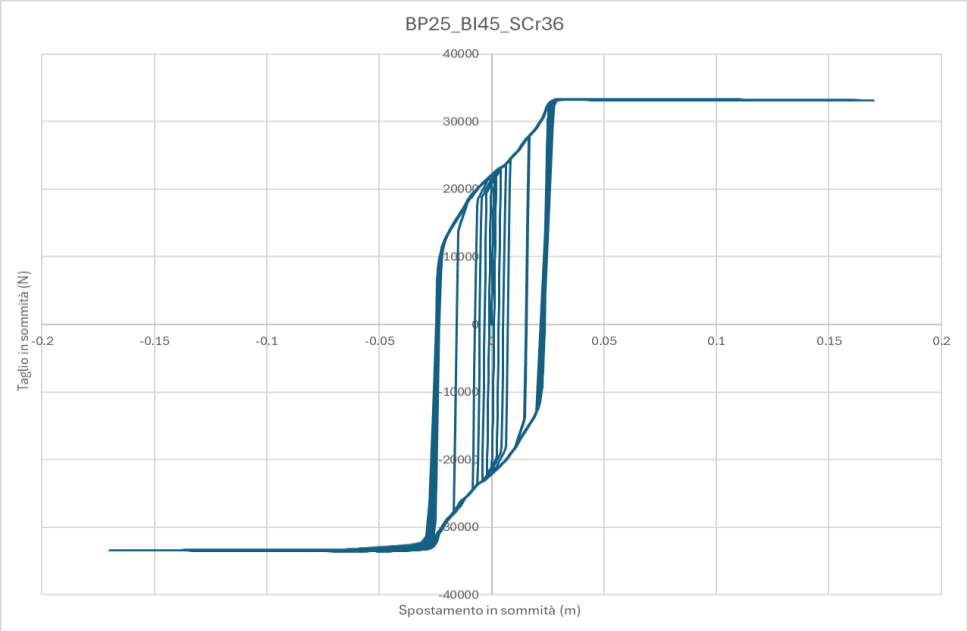


Figura 83 Analisi ciclico forza-spostamento

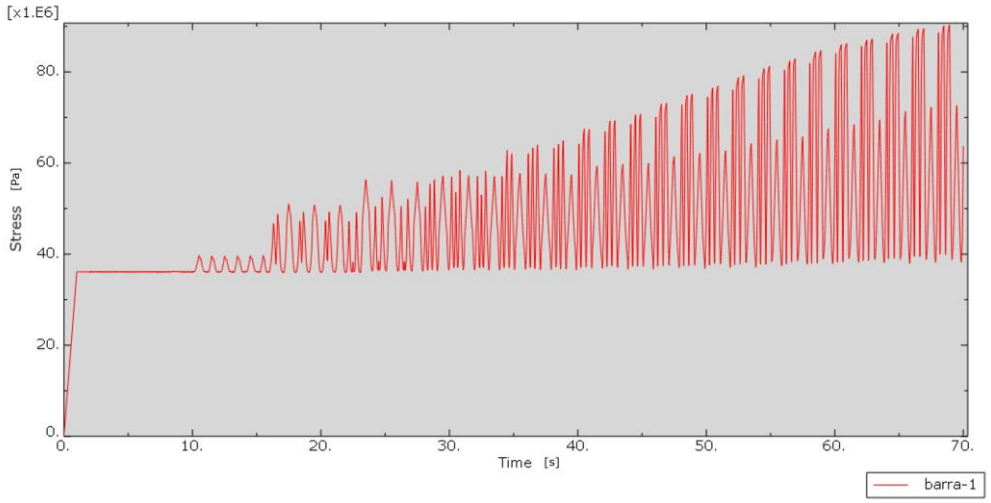


Figura 84 Andamento medio delle tensioni della barra durante l'analisi

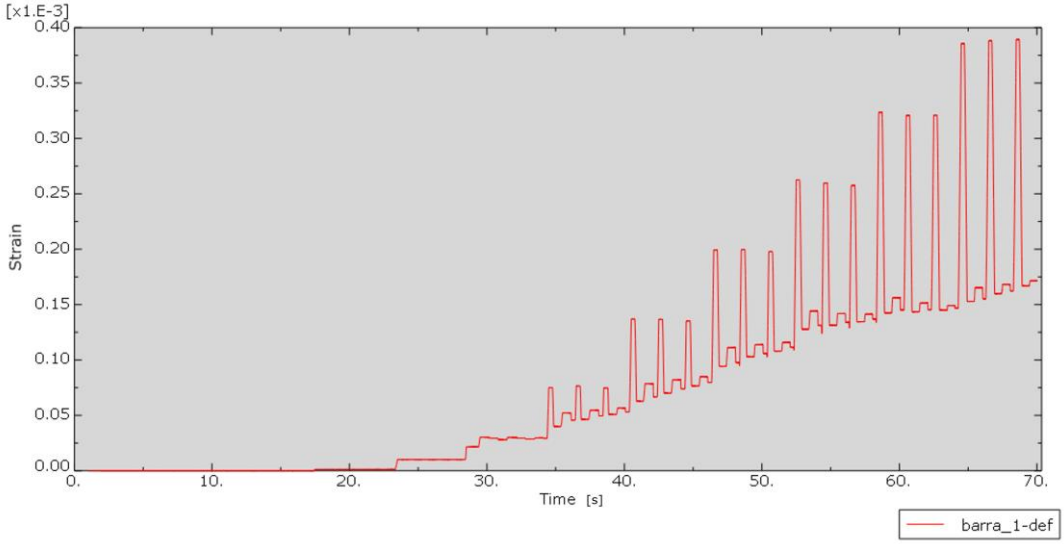


Figura 85 Andamento medio delle deformazioni della barra durante l'analisi

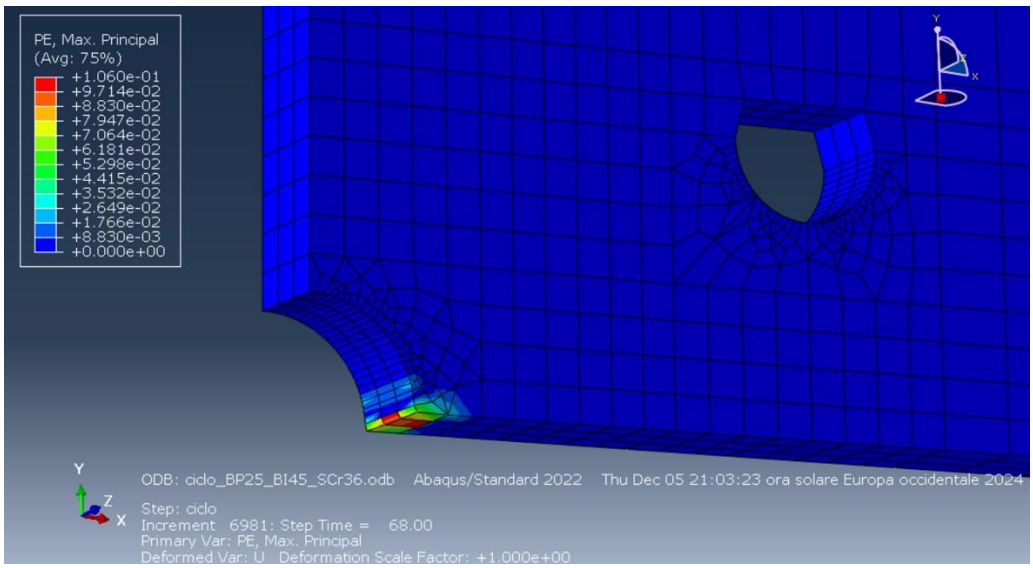


Figura 86 Distribuzione localizzata delle deformazioni plastiche che si sviluppano nel pannello in CLT

5.2.3 Risultati per BP50

Anche per queste configurazioni, come per BP25%, il danneggiamento del pannello è limitato alla zona di contatto tra il sistema resistente a taglio e il pannello in legno.

I dati ottenuti in merito alla resistenza massima (Figura 87) permettono di osservare come questa risulti aumentare al crescere del parametro BI, ottenendo valori più altri per BI90 che vanno a diminuire per BI30. L'andamento invece dato dal parametro SCr, anche se meno visibile, continua ad essere presente come per i precedenti livelli di precarico analizzati, portando ad avere valori delle resistenze che scendono passando dalle configurazioni con SCr18 a SCr54.

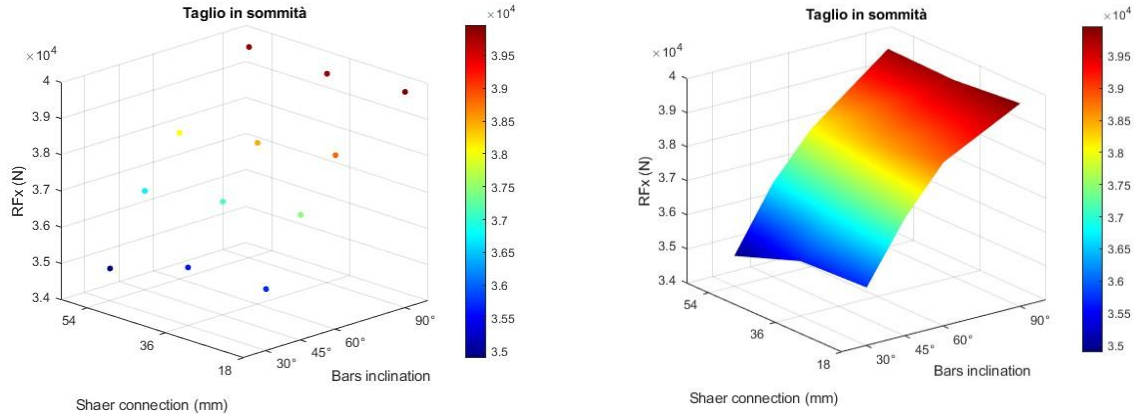


Figura 87 A sinistra i risultati in termini di resistenza massima per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP50)

Il valore minimo di resistenza è stato ricavato per la configurazione BP50_BI30_SCr54 mentre quello massimo per BP50_Bi90_SCr18 (Figura 88). Per queste configurazioni la differenza percentuale tra il valore massimo e il minimo è pari al 13%.

	BP	BI	SCr	RFx (N)
min	50	30	54	34892
max	50	90	18	39963
differenza percentuale				13%

Figura 88 Valori massimo e minimo della resistenza del sistema con BP50, prototipo a doppia curvatura

In termini di coefficiente di smorzamento i risultati delle configurazioni analizzate mostrano un andamento uguale a quello già osservato per i casi con precarico al 25% (Figura 89). Lo smorzamento risulta essere fortemente influenzato dal valore del parametro della connessione a taglio aumentando all'aumentare del valore di SCr.

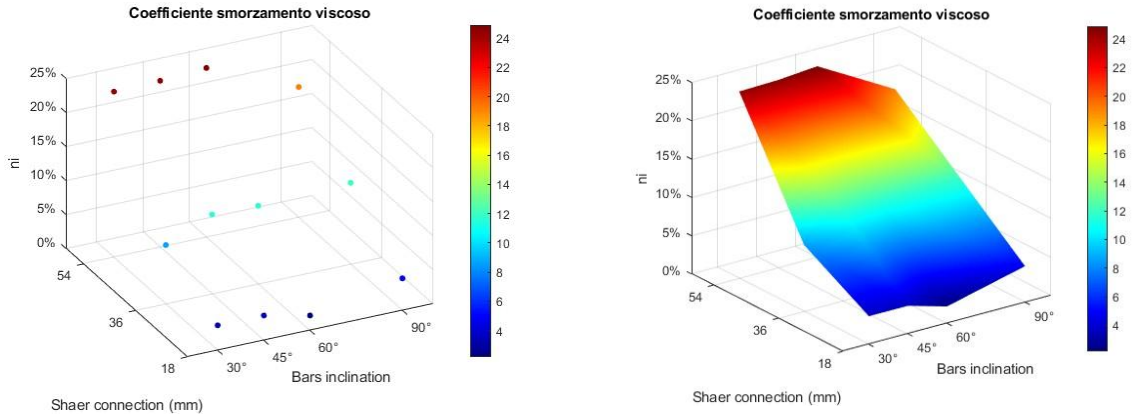


Figura 89 A sinistra i risultati in termini di coefficiente di smorzamento per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP50)

Come riportato in Figura 90 il valore minimo del coefficiente si smorzamento è stato registrato per una configurazione con il valore più basso del parametro SCr, mentre il valore massimo è stato ottenuto per una configurazione con SCr54.

	BP	BI	SCr	v_{eq}
min	50	30	18	2.19
max	50	90	54	24.89
differenza percentuale				91%

Figura 90 Valori massimo e minimo del coefficiente di smorzamento con BP50, prototipo a doppia curvatura

I risultati dell'analisi ciclica per i modelli con precarico BP50 presentano un andamento molto simile a quello visto per i casi con precarico BP25 (Figura 91), evidente anche in questo caso l'elevata rigidezza e la dissipazione che anche in questi casi avviene attraverso il fenomeno del rocking e dello sliding, andando a plasticizzare la zona del pannello vicino il sistema resistente a taglio, plasticizzazione che resta localizzata fino alla fine del ciclo (Figura 94). Dal punto di vista dello sviluppo delle tensioni nelle barre durante il protocollo di carico (Figura 92) è subito evidente l'aumento di tensione dovuto al precarico maggiore, ma anche in questo dal grafico della media delle tensioni si può notare che la tensione di snervamento del materiale (180 MPa) non viene raggiunta. Il grafico delle deformazioni, come per il caso precedente, mostra un andamento che va crescendo con l'andare avanti dell'analisi ciclica (Figura 93).

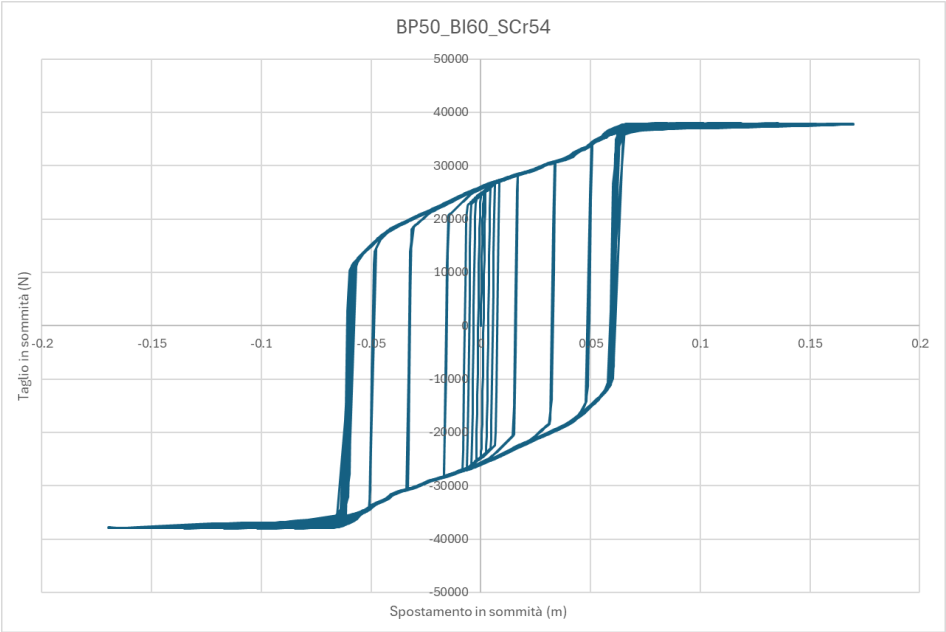


Figura 91 Analisi ciclico forza-spostamento

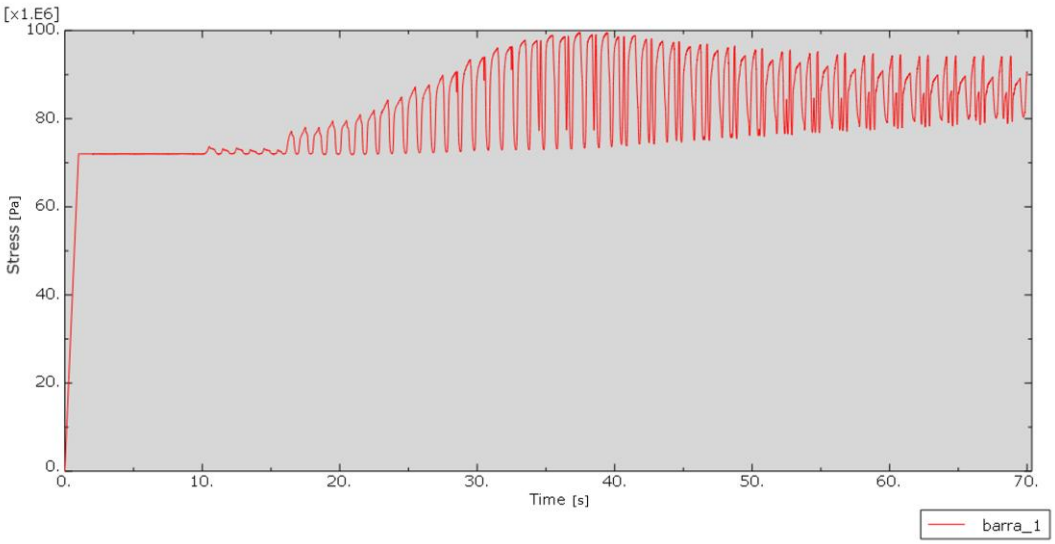


Figura 92 Andamento medio delle tensioni della barra durante l'analisi

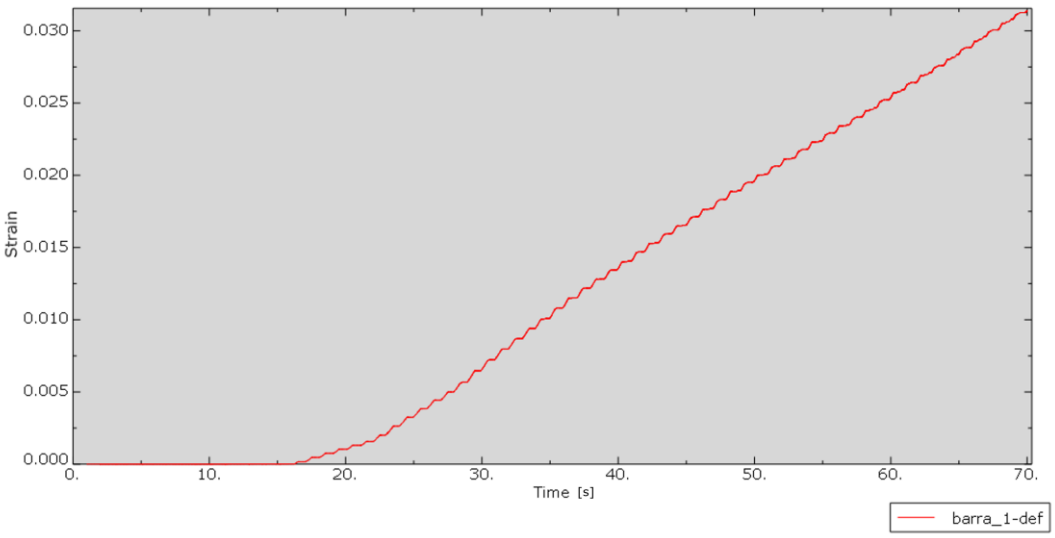


Figura 93 Andamento medio delle deformazioni della barra durante l'analisi

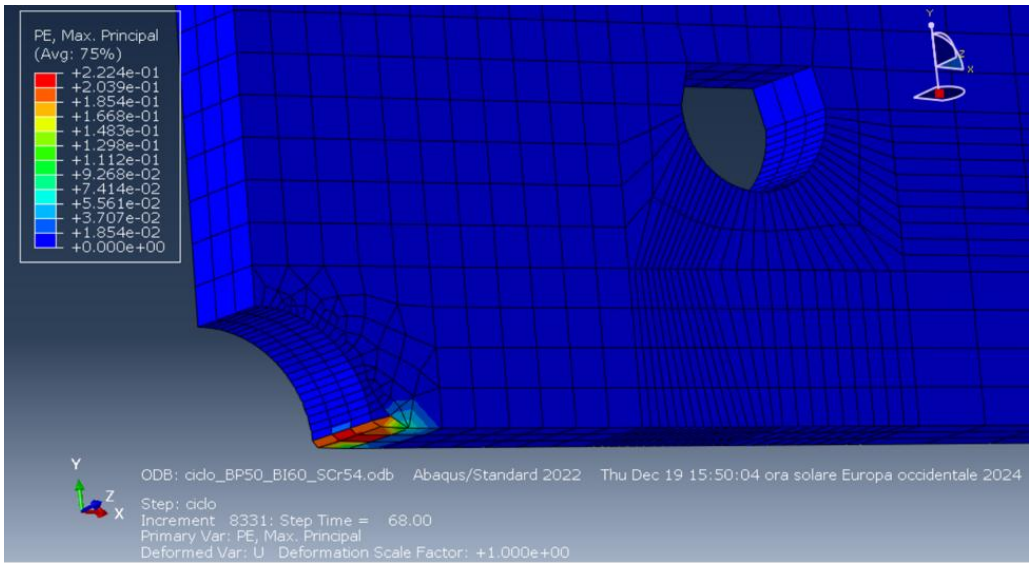


Figura 94 Distribuzione localizzata delle deformazioni plastiche che si sviluppano nel pannello in CLT

5.2.4 Risultati per BP75

Per quanto riguarda le analisi con il precarico al 75%, è stato osservato che l'andamento della resistenza massima del sistema presenta lo stesso comportamento osservato per i precedenti livelli di precarico (BP25 e BP50), cresce al crescere del valore del parametro BI e diminuisce con l'aumentare del raggio di SCr, portando ad avere dei valori di resistenza superiori rispetto ai due casi precedenti.

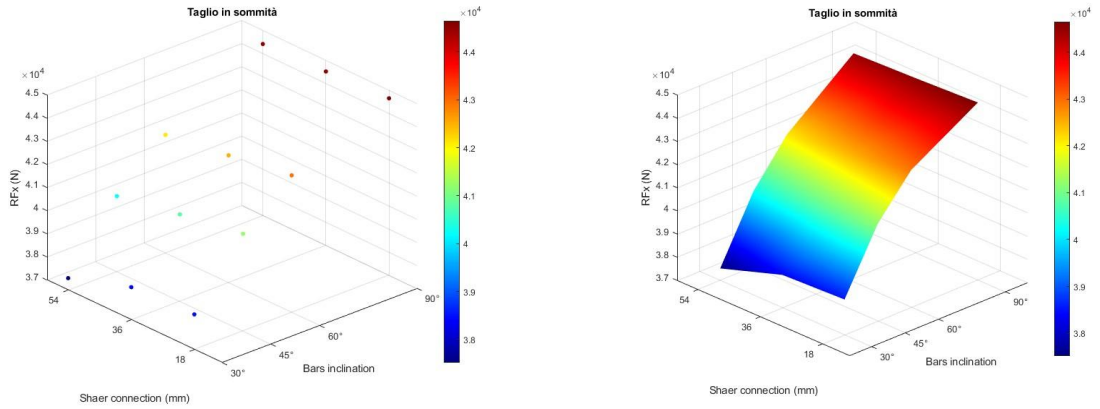


Figura 95 A sinistra i risultati in termini di resistenza massima per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP75)

Anche in questo caso le configurazioni per le quali sono stati ottenuti i valori minimo e massimo sono rispettivamente BP75_BI30_SCr54 e BP75_BI90_SCr18 (Figura 96). La differenza percentuale osservata in termini di resistenza massima tra il valore massimo e minimo è pari al 16%.

	BP	BI	SCr	RFx (N)
min	75	30	54	37515
max	75	90	18	44648
differenza percentuale				16%

Figura 96 Valori massimo e minimo della resistenza del sistema con BP75, prototipo a doppia curvatura

Dai grafici relativi al coefficiente di smorzamento viscoso (Figura 97) è emersa una notevole somiglianza con l'andamento osservato nei modelli con precarico BP50 e BP25. Anche in questo caso, l'incremento del precarico applicato alle barre determina un aumento dei valori del coefficiente di smorzamento (Figura 98).In termini di differenza percentuale tra il valore massimo e minimo è stata osservata una differenza pari al 89% rispetto al valore massimo.

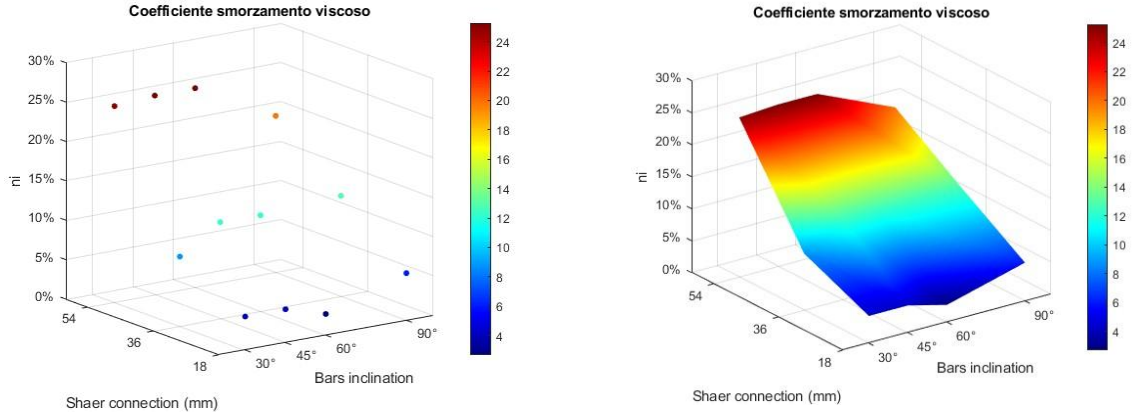


Figura 97 A sinistra i risultati in termini di coefficiente di smorzamento per ogni configurazione analizzata, a destra superficie passante per i vari punti (precarico barre BP75)

	BP	BI	SCr	v_{eq}
min	75	30	18	2.68
max	75	90	54	25.27
differenza percentuale				89%

Figura 98 Valori massimo e minimo del coefficiente di smorzamento con BP75, prototipo a doppia curvatura

I grafici dell'analisi ciclica hanno mostrato un comportamento molto rigido del sistema, e un'energia di dissipazione che avviene attraverso il rocking e lo sliding del pannello (Figura 99). Lo studio dell'andamento delle tensioni e deformazioni (Figura 100 Figura 101) nella barra ha permesso di osservare che non viene raggiunto lo snervamento, infatti anche se le tensioni nell'elemento aumentano perché è aumentato il precarico, non superano mai il valore di 180 MPa. Anche in queste configurazioni è stato osservato che il danneggiamento del pannello alla fine dell'analisi ciclica risulta concentrato nella zona di contatto tra la parete e il sistema resistente a taglio (Figura 102).

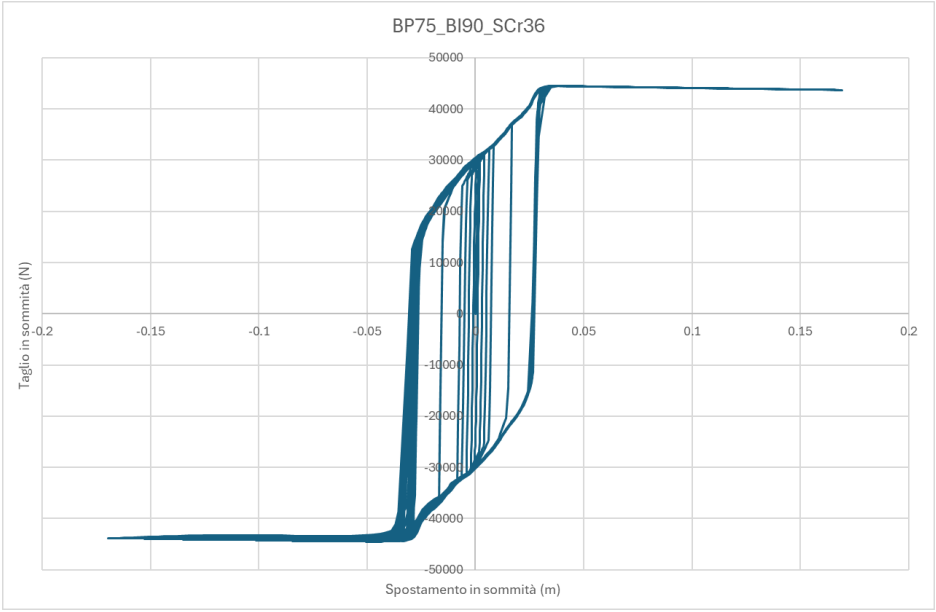


Figura 99 Analisi ciclico forza-spostamento

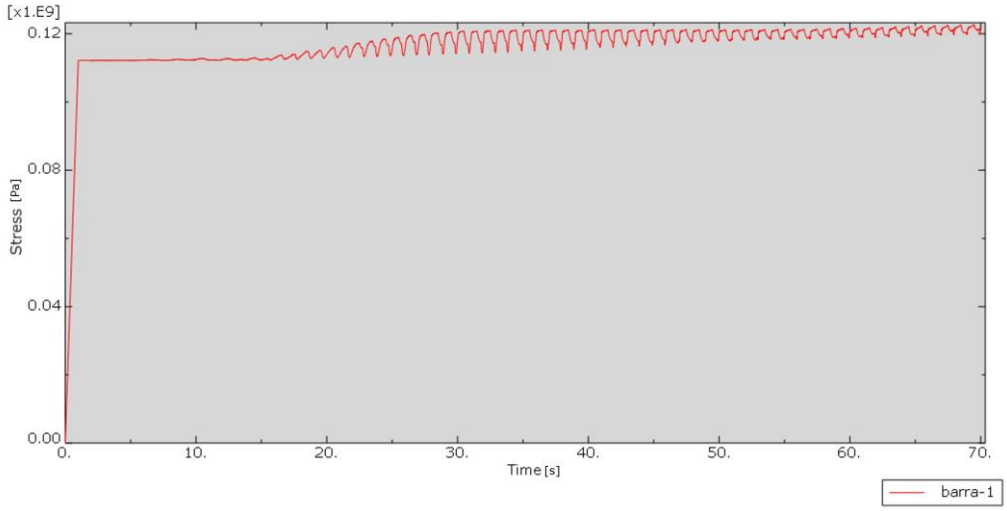


Figura 100 Andamento medio delle tensioni della barra durante l'analisi (le tensioni sono espresse in Pa)

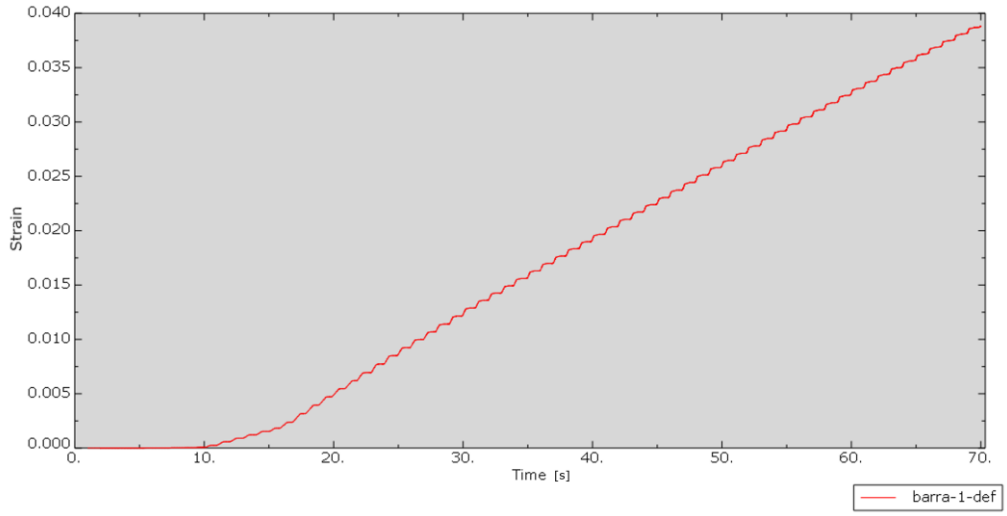


Figura 101 Andamento medio delle deformazioni della barra durante l'analisi

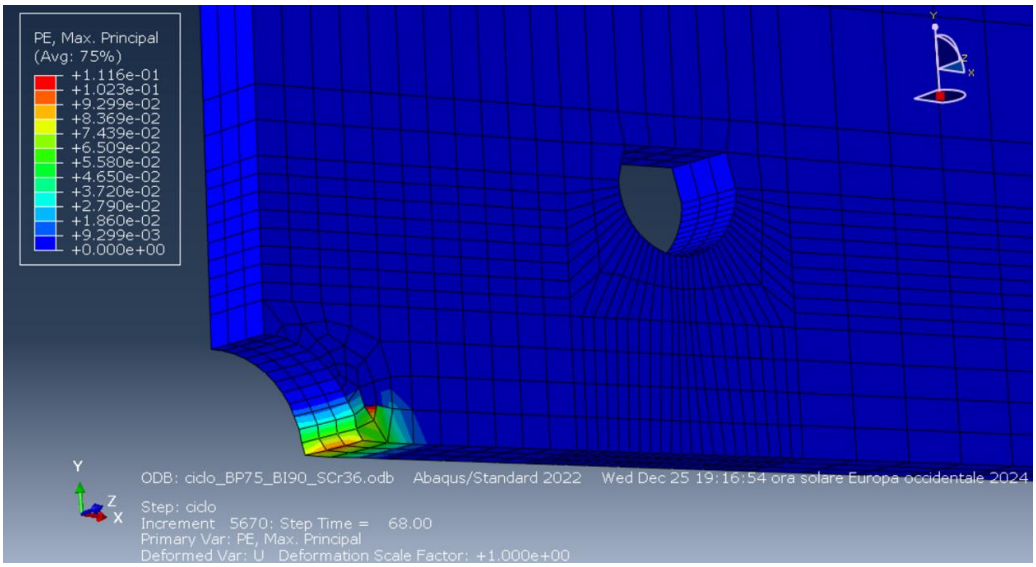


Figura 102 Distribuzione localizzata delle deformazioni plastiche che si sviluppano nel pannello in CLT

6 CONCLUSIONI

Lo studio parametrico condotto ha rappresentato una fase fondamentale per comprendere il comportamento dei prototipi e individuare le principali variabili che influenzano le loro prestazioni. Attraverso l'analisi sistematica di diversi parametri, quali il precarico delle barre, l'inclinazione delle barre del sistema resistente a trazione e la lunghezza del piatto della connessione resistente al taglio (per il primo prototipo) o il raggio del ramo curvo del piatto del sistema a taglio (per il secondo prototipo), è stato possibile esplorare un ampio spettro di configurazioni e valutarne l'effetto sulle principali caratteristiche strutturali, tra cui resistenza massima e capacità di dissipazione dell'energia.

Un aspetto cruciale emerso riguarda lo studio tensionale delle barre in acciaio e la diffusione del danneggiamento nel pannello. L'obiettivo iniziale era quello di progettare una connessione che rispettasse la gerarchia delle resistenze di barra debole e pannello forte, quindi che le barre si snervassero prima che il pannello si danneggiasse. Tuttavia, sebbene il danneggiamento del pannello sia localizzato esclusivamente nell'area vicina al sistema resistente al taglio in tutti i modelli, lo snervamento delle barre avviene prima della rottura localizzata del pannello solo per i modelli con precarico nullo.

In particolare per quanto riguarda il primo prototipo è stato osservato che le barre si plasticizzano, prima del pannello, solo nel caso con precarico nullo e inclinazione delle barre pari a 30°, 45° e 60°, per i restanti modelli il pannello si danneggia prima delle barre. Questo comportamento è dovuto al progressivo aumento delle tensioni sulle barre legato all'incremento del precarico, che impedisce di raggiungere lo snervamento prima del danneggiamento del pannello nella zona di contatto con il sistema resistente a taglio. I risultati delle analisi cicliche sul prototipo a semplice curvatura hanno evidenziato:

- un comportamento molto rigido per tutti le configurazioni analizzate;
- una bassa dissipazione di energia che si manifesta tramite il fenomeno del rocking; inoltre, solo per i casi con BP0 i valori del coefficiente di smorzamento tendono ad aumentare in maniera più significativa con l'aumentare dell'inclinazione delle barre;
- grazie alla particolare configurazione del dispositivo resistente alle forze di taglio e ai carichi verticali applicati, in tutti i modelli il pannello manifesta la capacità di riposizionarsi automaticamente nella sua configurazione iniziale dopo lo spostamento laterale.

Per quanto riguarda il prototipo a doppia curvatura, la campagna di analisi parametriche condotte, sebbene meno numerosa rispetto a quella eseguita per il primo prototipo, ha permesso

di indagare in maniera esaustiva il comportamento di questa connessione, mettendo in luce il comportamento come esso vari al variare dei parametri di precarico, inclinazione delle barre e del raggio del tratto della doppia curvatura.

Anche per queste configurazioni è stato osservato che la plasticizzazione delle barre avviene solo per i casi con precarico nullo (per tutte e dodici le configurazioni), mentre per i casi con precarico diverso da zero le barre, anche se presentano una tensione di partenza maggiore, non raggiungono in nessun caso lo snervamento. Quindi anche se il danneggiamento del pannello rimane localizzato alla sola zona di contatto tra la parete in CLT e il piatto del sistema resistente a taglio, il criterio di gerarchia di pannello forte-connessione debole non risulta verificato per queste configurazioni. Lo studio eseguito andando a variare il raggio del ramo curvo del sistema resistente a taglio ha permesso di comprendere come il gap tra la parete e il piatto influenzava il comportamento della connessione.

Le analisi sul secondo prototipo hanno permesso di osservare:

- la connessione mostra un comportamento rigido e una resistenza paragonabile a quella ottenuta per il primo prototipo;
- elevata energia di dissipazione, infatti per le configurazioni del secondo prototipo l'energia dissipata durante i cicli è nettamente superiore a quella osservata per il primo prototipo. Oltre al fenomeno del rocking (già presente nella configurazione a semplice curvatura) a causa del gap si genera uno slittamento che permette una maggiore dissipazione. In questo caso, come è stato possibile osservare dai grafici dell'andamento ciclico (forza-spostamento) all'aumentare del raggio del tratto curvo del piatto, quindi del gap, corrisponde una maggiore energia dissipata.
- perdita della capacità di autoricentraggio del pannello. Una parte dello sliding che si verifica non viene automaticamente recuperata, maggiore è il gap, quindi l'energia dissipata, maggiore sarà la quota di slittamento che non viene recuperata.

Questo approccio ha permesso di iniziare a delineare delle linee guida utili per la progettazione ottimale del prototipo, identificando le configurazioni che offrono un equilibrio tra resistenza e smorzamento. Inoltre, lo studio ha messo in luce come la combinazione dei parametri influisca sul comportamento globale del sistema.

Sebbene le analisi condotte abbiano fornito risultati significativi, ulteriori approfondimenti potrebbero essere utili per affinare le indicazioni progettuali emerse e valutarne l'applicabilità a condizioni operative. Tuttavia, i risultati ottenuti costituiscono un primo passo importante verso lo sviluppo di linee guide da utilizzare per la corretta progettazione dei prototipi studiati.

Il lavoro svolto apre la strada a ulteriori approfondimenti e perfezionamenti. In particolare, interessanti ricerche future potrebbero riguardare:

- **Campagna sperimentale**. Nonostante l'efficacia delle simulazioni numeriche, è fondamentale integrare lo studio con una serie di prove sperimentali. La realizzazione di prototipi e la conduzione di test in scala reale consentiranno di validare i modelli FEM e di confrontare i dati sperimentali con le previsioni teoriche. Questi test potrebbero rivelare comportamenti non completamente catturati dalla modellazione e fornire preziosi spunti per ulteriori ottimizzazioni. In particolare, i risultati numerici ottenuti suggeriscono la necessità di concentrare la fase sperimentale sull'analisi delle connessioni, in quanto elementi determinanti nella risposta globale del sistema, e sulla misura delle grandezze sensibili ai parametri studiati, quali precarico, inclinazione delle barre e geometria del sistema resistente a taglio. È pertanto auspicabile, in una fase successiva, condurre prove cicliche su prototipi in scala reale, al fine di calibrare con maggiore accuratezza i modelli numerici e verificarne la capacità predittiva.
- **Analisi parametriche**. Oltre alle analisi parametriche già effettuate, potrebbe essere interessante analizzare l'influenza di ulteriori parametri (e.g. diametro delle barre), hanno sulla risposta del sistema.
- **Analisi interazione tra pareti**. Un'ulteriore aspetto che si potrebbe indagare, attraverso la realizzazione di modelli FEM, riguarda l'interazione tra due pareti adiacenti che condividono lo stesso sistema resistente alle sollecitazioni di taglio, quando sollecitate da azioni orizzontali.

7 BIBLIOGRAFIA

[1] B. Calderoni, C. Giubileo, A. Sandoli, and V. Onotri, "L'influenza dei sistemi di connessione sul comportamento strutturale di pannelli in legno X-lam per edifici in zona sismica Towards the 'Ultimate Earthquake Proof' Building: Development of Integrated Low-Damage Building Systems View project A sustainable approach for the safeguard of cultural heritage View project," 2015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/282667294

[2] I. Gavric, A. Ceccotti, and M. Fragiacomo, "Experimental cyclic tests on cross-laminated timber panels and typical connections," 2011. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/332529065

[3] I. Gavric *et al.*, "Experimental-numerical analyses of the seismic behaviour of cross-laminated wall systems DynaTTB-Dynamic Response of Tall Timber Buildings under Service Load View project Innovative Connections for CLT Buildings View project Experimental-numerical analyses of the seismic behaviour of cross-laminated wall systems," 2012. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/332528990

[4] J. Hummel, W. Seim, G. Flatscher, and G. Schickhofer, "CLT wall elements under cyclic loading-details for anchorage and connection," 2013. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/305114131

[5] M. Fragiacomo, B. Dujic, and I. Sustersic, "Elastic and ductile design of multi-storey crosslam massive wooden buildings under seismic actions," *Eng Struct*, vol. 33, no. 11, pp. 3043–3053, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.05.020.

[6] F. T. Matos, J. M. Branco, P. Rocha, T. Demschner, and P. B. Lourenço, "Quasi-static tests on a two-story CLT building," 2019. doi: 10.1016/j.engstruct.2019109806.

[7] V. Awad, L. Giresini, M. Koshihara, M. L. Puppio, and M. Sassu, "Experimental Analyses and Numerical Models of CLT Shear Walls under Cyclic Loading," in *Wood in Civil Engineering*, InTech, 2017. doi: 10.5772/65024.

[8] A. Ceccotti, M. Follesa, M. P. Lauriola, and C. Sandhaas, "Sofie Project-Test Results on the Lateral Resistance of Cross-Laminated Wooden Panels," 2006. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228757822

[9] A. Ceccotti, "New technologies for construction of medium-rise buildings in seismic regions: The XLAM case," *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, vol. 18, no. 2, pp. 156–165, May 2008, doi: 10.2749/101686608784218680.

[10] A. Ceccotti, C. Sandhaas, and M. Yasumura, “SEISMIC PERFORMANCE OF X-LAM BUILDINGS: THE ITALIAN SOFIE PROJECT.”

[11] A. Ceccotti, C. Sandhaas, M. Okabe, M. Yasumura, C. Minowa, and N. Kawai, “SOFIE project - 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building,” *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 42, no. 13, pp. 2003–2021, Oct. 2013, doi: 10.1002/eqe.2309.

[12] M. Latour, G. Rizzano, G. Terrano, and G. Torello, “Comportamento Sismico di Edifici a Pannelli in Legno a Strati incrociati realizzati con connessioni di tipo innovativo,” 2013.

[13] M. Latour and G. Rizzano, “Cyclic behavior and modeling of a dissipative connector for cross-laminated timber panel buildings,” *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 137–171, Jan. 2015, doi: 10.1080/13632469.2014.948645.

[14] A. Polastri, A. Angeli, and D. R. Gianni, “A NEW CONSTRUCTION SYSTEM FOR CLT STRUCTURES.”

[15] A. Polastri and A. Angeli, “AN INNOVATIVE CONNECTION SYSTEM FOR CLT STRUCTURES: EXPERIMENTAL-NUMERICAL ANALYSIS.”

[16] “An innovative connector system for fast and safe erection with CLT - Polastri - 2014”.

[17] A. Angeli, A. Polastri, E. Callegari, and M. Chiodega, “MECHANICAL CHARACTERIZATION OF AN INNOVATIVE CONNECTION SYSTEM FOR CLT STRUCTURES.”

[18] A. Polastri, I. Giongo, and M. Piazza, “An innovative connection system for cross-laminated timber structures,” *Structural Engineering International*, vol. 27, no. 4, pp. 502–511, Nov. 2017, doi: 10.2749/222137917X14881937844649.

[19] A. Polastri, I. Giongo, A. Angeli, and R. Brandner, “Mechanical characterization of a pre-fabricated connection system for cross laminated timber structures in seismic regions,” *Eng Struct*, vol. 167, pp. 705–715, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.12.022.

[20] R. Scotta, L. Marchi, D. Trutalli, and L. Pozza, “A dissipative connector for CLT buildings: Concept, design and testing,” *Materials*, vol. 9, no. 3, Feb. 2016, doi: 10.3390/ma9030139.

[21] G. D’Arenzo, G. Rinaldin, M. Fossetti, and M. Fragiacomo, “An innovative shear-tension angle bracket for Cross-Laminated Timber structures: Experimental tests and numerical modelling,” *Eng Struct*, vol. 197, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109434.

[22] M. Kržan and B. Azinović, “Cyclic response of insulated steel angle brackets used for cross-laminated timber connections,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 79, no. 3, pp. 691–705, May 2021, doi: 10.1007/s00107-020-01643-5.

[23] D. Wrzesniak, G. W. Rodgers, M. Fragiacomo, and J. G. Chase, “Experimental testing of damage-resistant rocking glulam walls with lead extrusion dampers,” *Constr Build Mater*, vol. 102, pp. 1145–1153, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.011.

[24] F. Smiroldo, A. Gaspari, D. Viel, and M. Piazza, “HIGH PERFORMANCE CONNECTIONS TO MITIGATE SEISMIC DAMAGE IN CROSS LAMINATED TIMBER (CLT) STRUCTURES.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/344427238

[25] F. Smiroldo *et al.*, “NUMERICAL SEISMIC ANALYSES OF MULTI-STOREY CLT STRUCTURES WITH HIGH-PERFORMANCE CONNECTIONS.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/384323426

[26] A. Palermo *et al.*, “Innovative seismic solutions for multi-storey LVL timber buildings.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/29486708

[27] I. Felice Carlo Ponzo, “Edifici a telaio in legno lamellare con collegamenti post-tesi e rocking dissipativo Prove sperimentali effettuate presso l’Università della Basilicata.” [Online]. Available: www.nzwood.co.nz].

[28] A. Iqbal, S. Pampanin, A. Palermo, and A. H. Buchanan, “Performance and design of LVL walls coupled with UFP dissipaters,” *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 383–409, Apr. 2015, doi: 10.1080/13632469.2014.987406.

[29] A. Kramer, A. R. Barbosa, and A. Sinha, “Performance of Steel Energy Dissipators Connected to Cross-Laminated Timber Wall Panels Subjected to Tension and Cyclic Loading,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 142, no. 4, Apr. 2016, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001410.

[30] A. Hashemi, R. Masoudnia, and P. Quenneville, “Seismic performance of hybrid self-centring steel-timber rocking core walls with slip friction connections,” *J Constr Steel Res*, vol. 126, pp. 201–213, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.07.022.

[31] A. Hashemi, P. Zarnani, R. Masoudnia, and P. Quenneville, “Seismic resistant rocking coupled walls with innovative Resilient Slip Friction (RSF) joints,” *J Constr Steel Res*, vol. 129, pp. 215–226, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.11.016.

[32] A. Hashemi, P. Zarnani, and P. Quenneville, “Earthquake resistant timber panelised structures with resilient connections,” *Structures*, vol. 28, pp. 225–234, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.08.071.

[33] "ABAQUS/CAE User's Manual," 1991.

[34] J. Gustafsson, J. M. Supervisor, C. Amaddeo, T. K. Bader, and B. Johannesson, "Expansion Joints in timber bridges-Mechanical behavior under external loading."

[35] Y. De Santis, M. Sciomenta, L. Spera, V. Rinaldi, M. Fragiacomo, and C. Bedon, "Effect of Interlayer and Inclined Screw Arrangements on the Load-Bearing Capacity of Timber-Concrete Composite Connections," *Buildings*, vol. 12, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/buildings12122076.

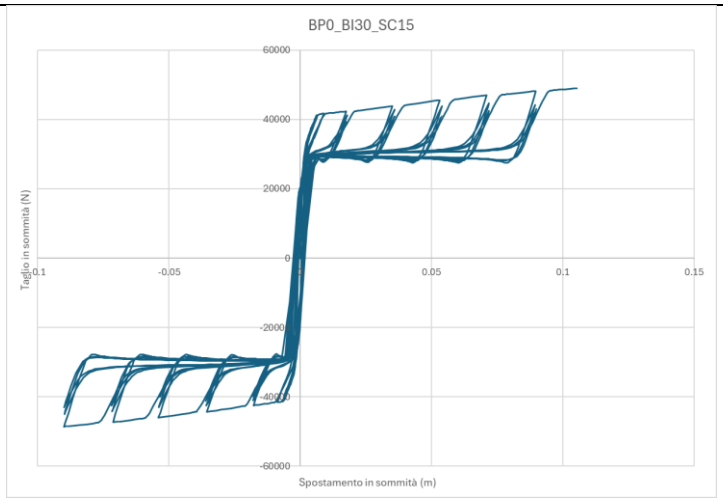
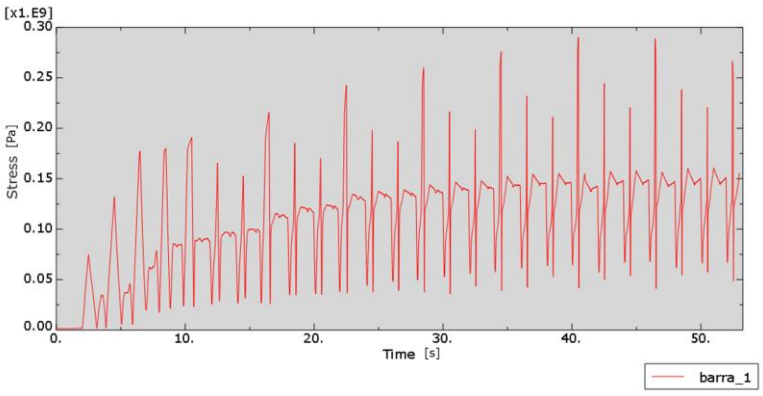
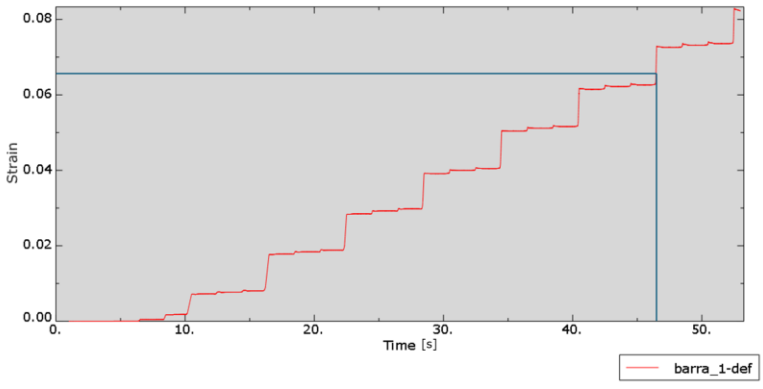
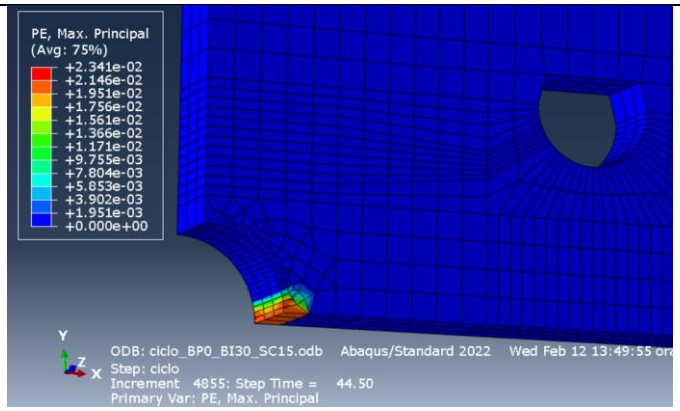
[36] Y. Murase, "Friction of Wood Sliding on Various Materials," *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, vol. 28, no. 4, pp. 147–160, Mar. 1984, doi: 10.5109/23785.

[37] "Norme tecniche per le costruzioni 2018," 2018.

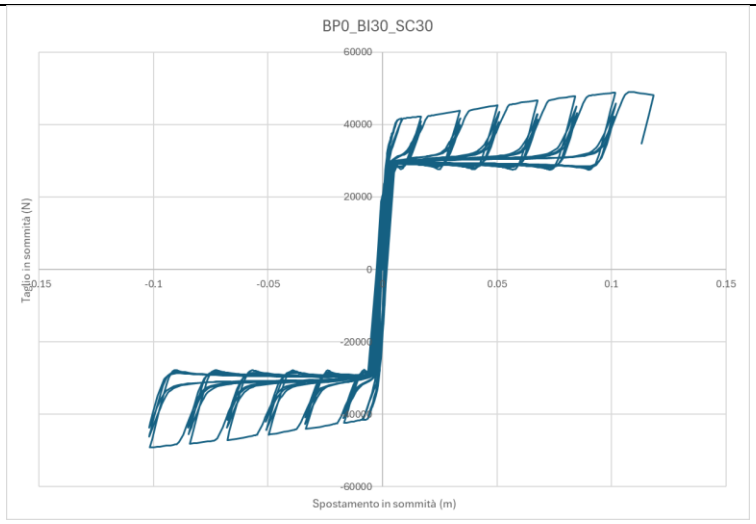
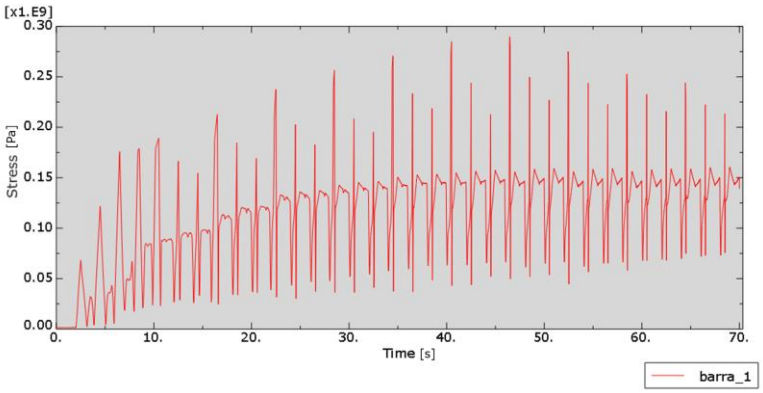
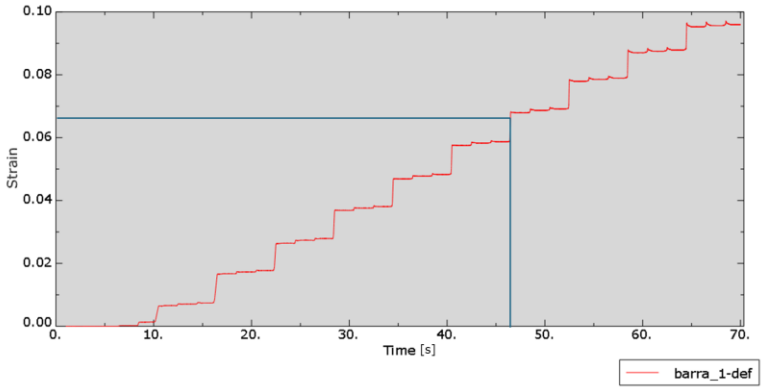
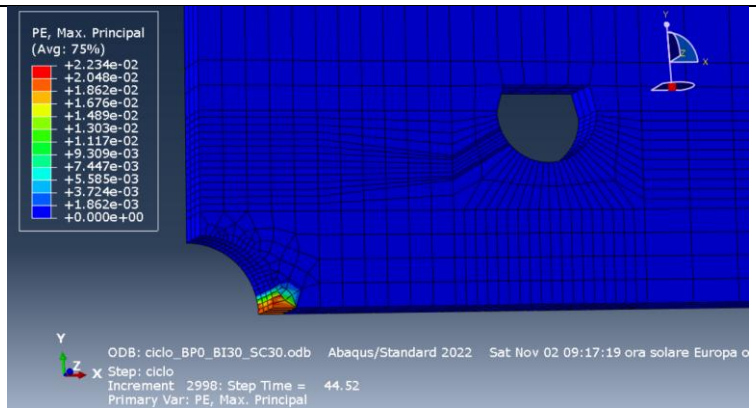
[38] "Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Steel Elements under Cyclic Loads FREE Download Publications www.eccspublications.eu." [Online]. Available: www.eccspublications.eu

8 ALLEGATO A: Risultati prototipo a semplice curvatura

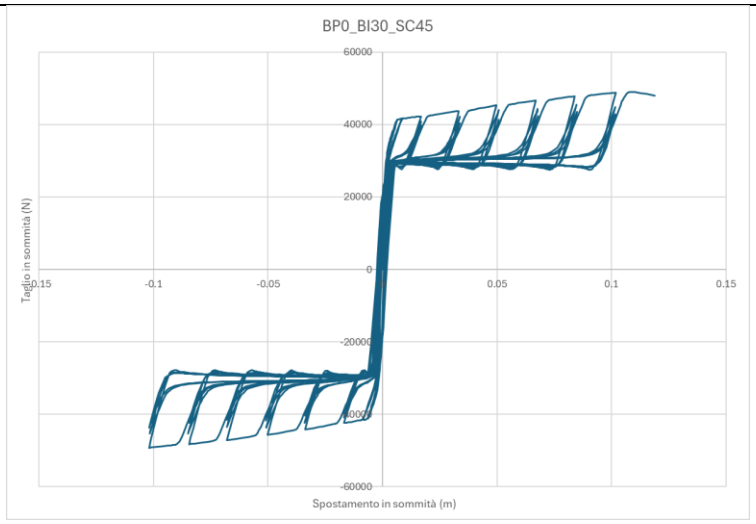
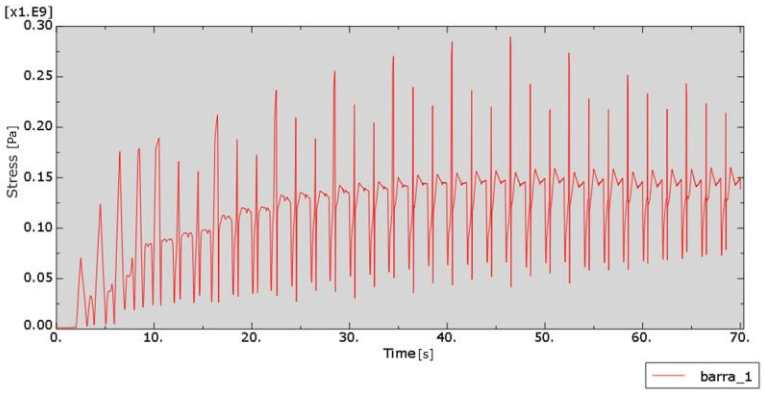
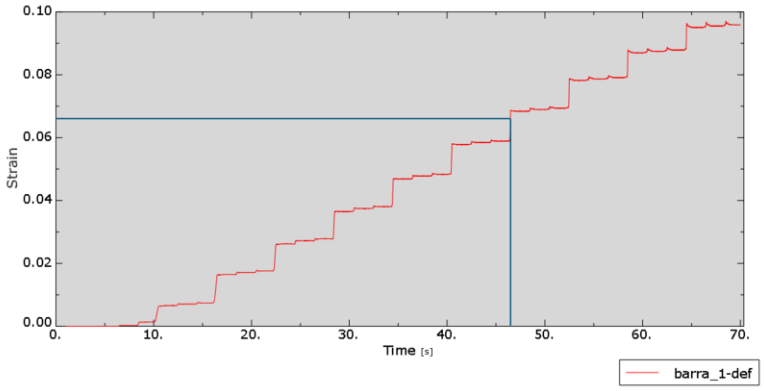
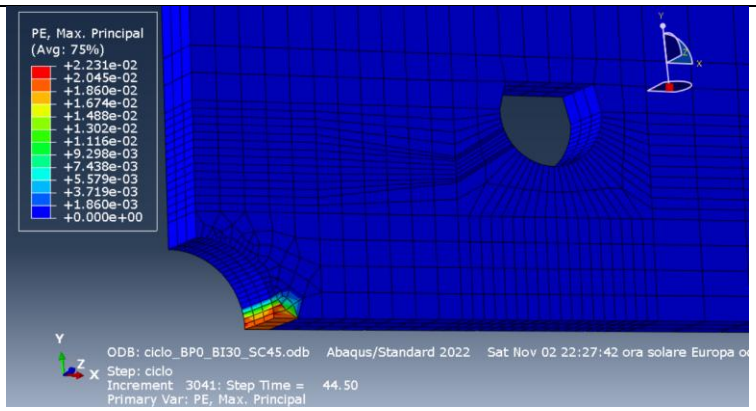
BP0_BI30_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

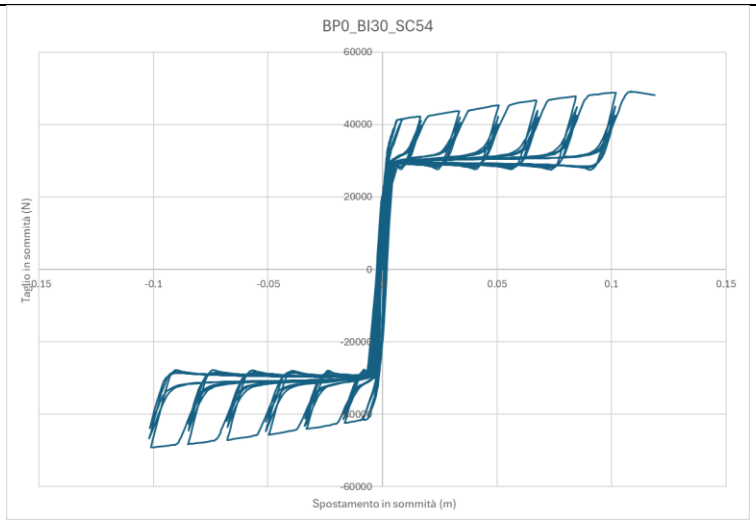
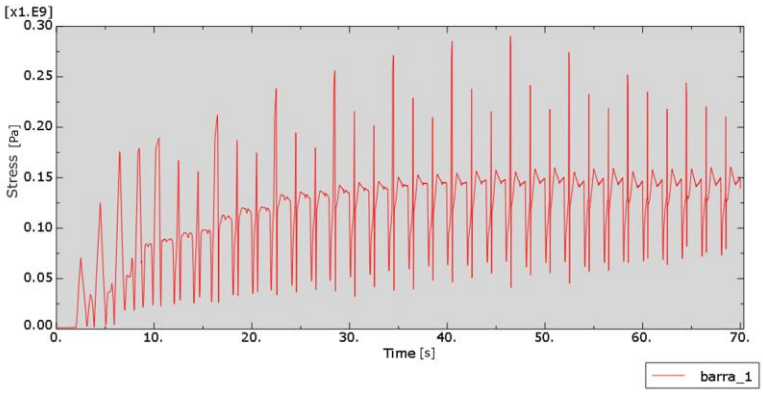
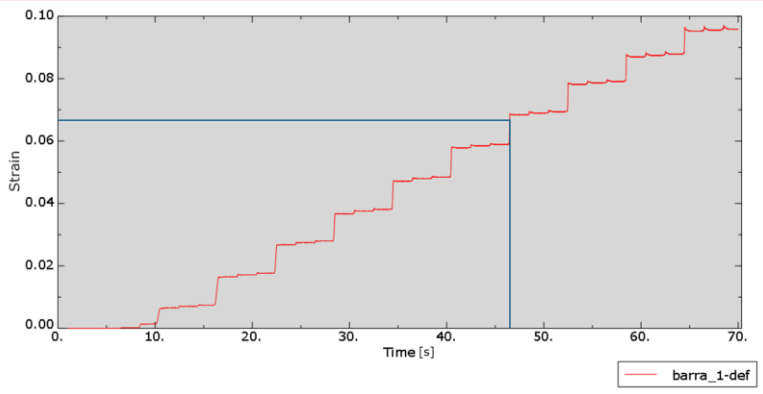
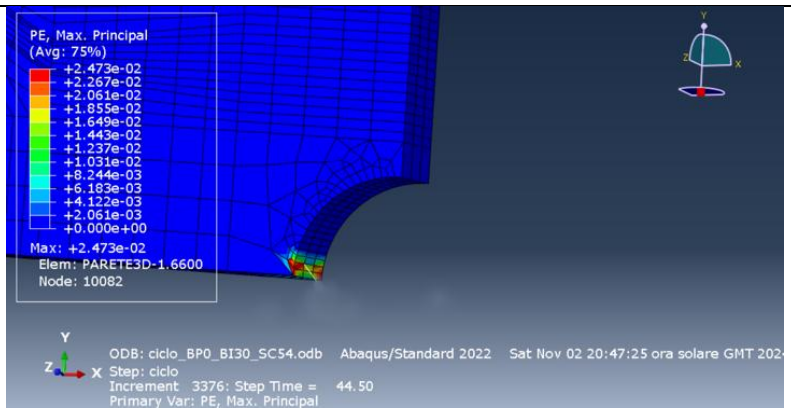
BP0_BI30_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

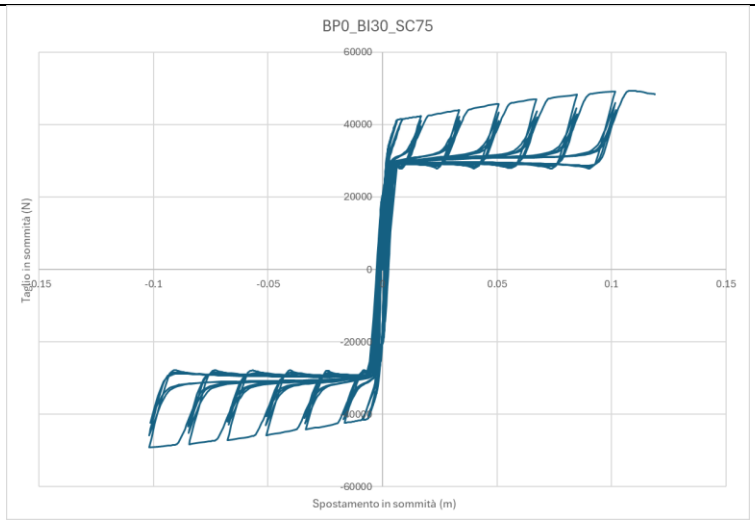
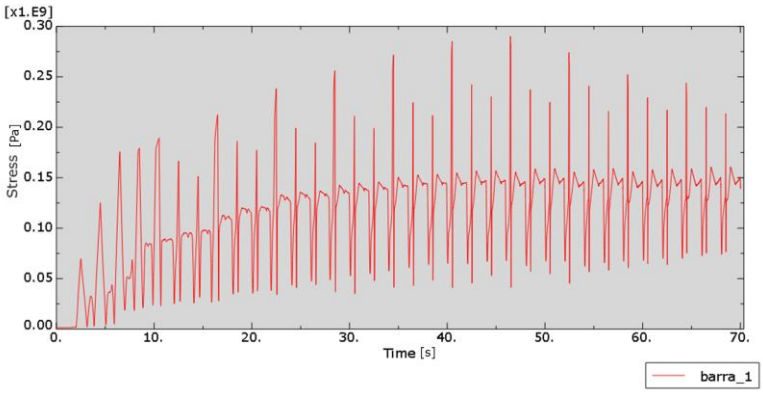
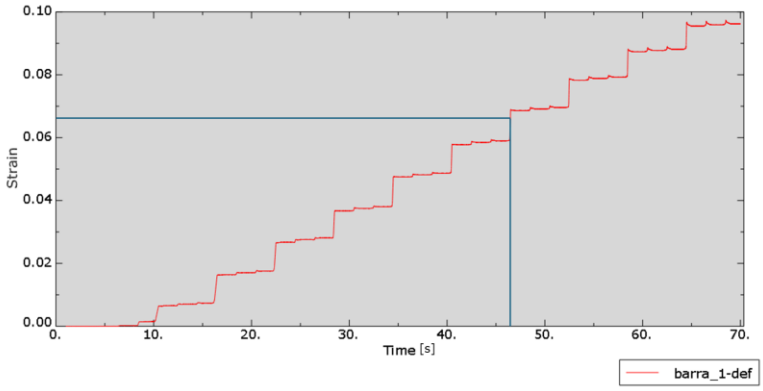
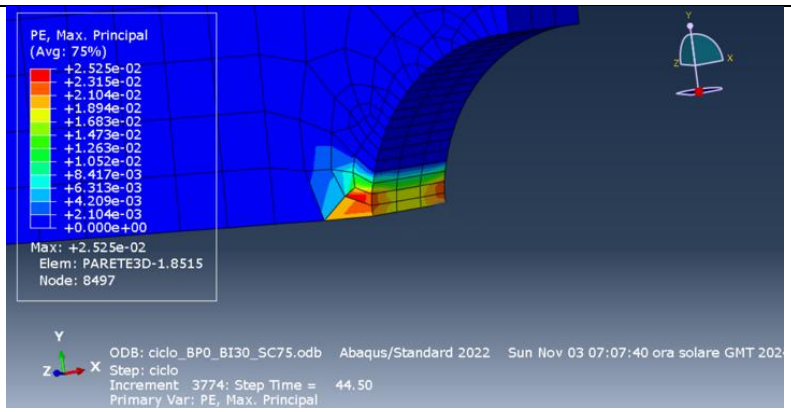
BP0_BI30_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

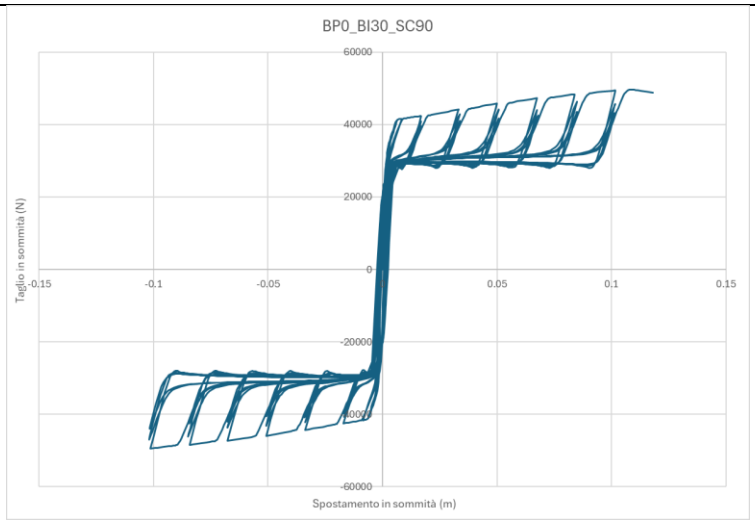
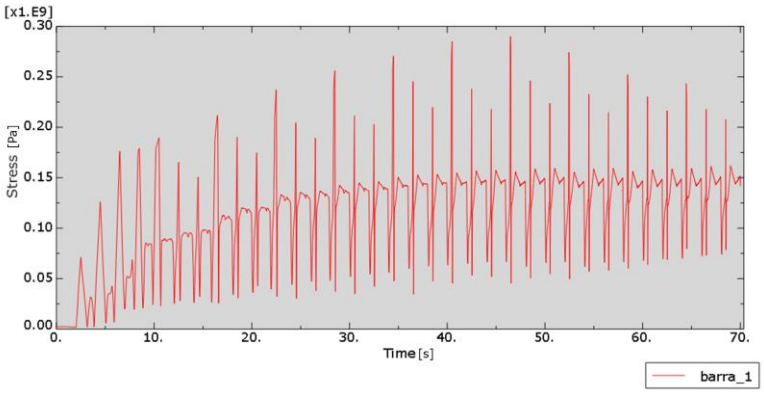
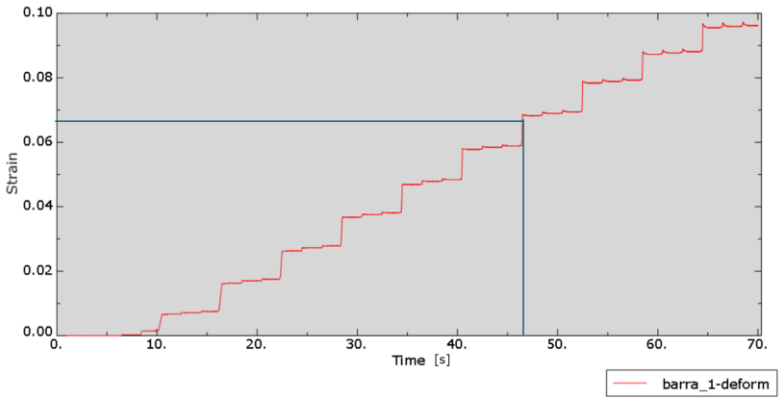
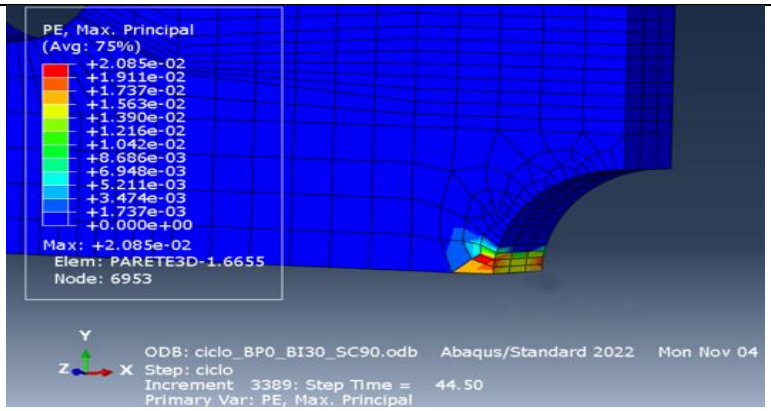
BP0_BI30_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

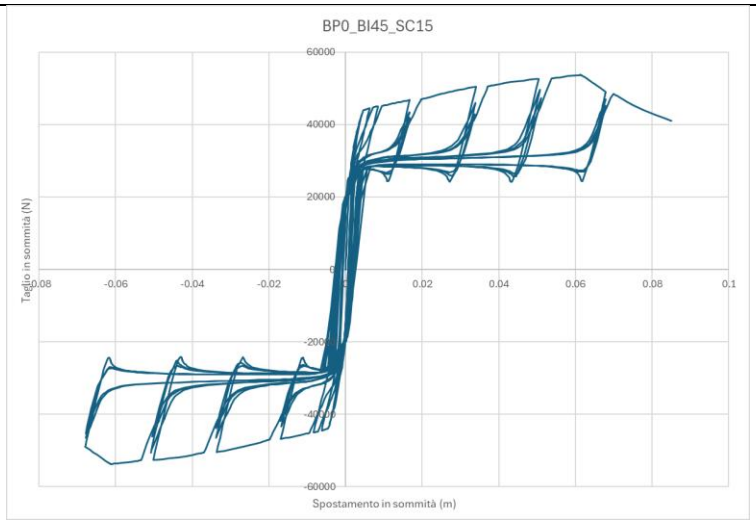
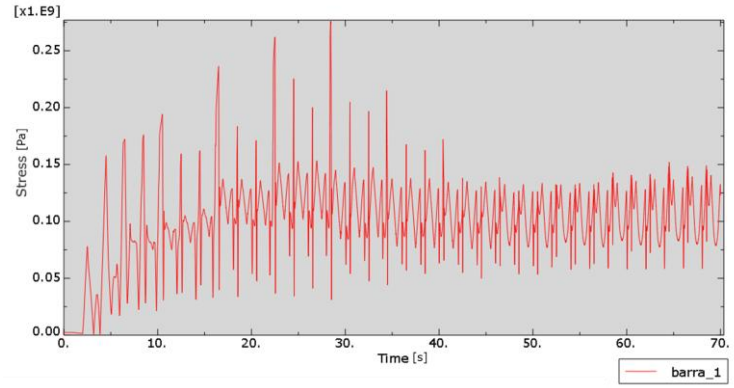
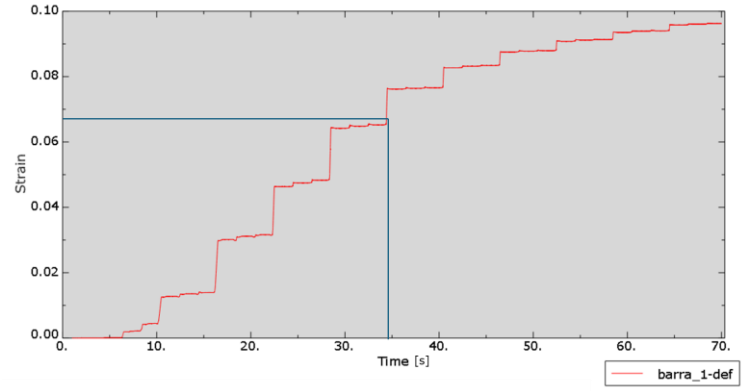
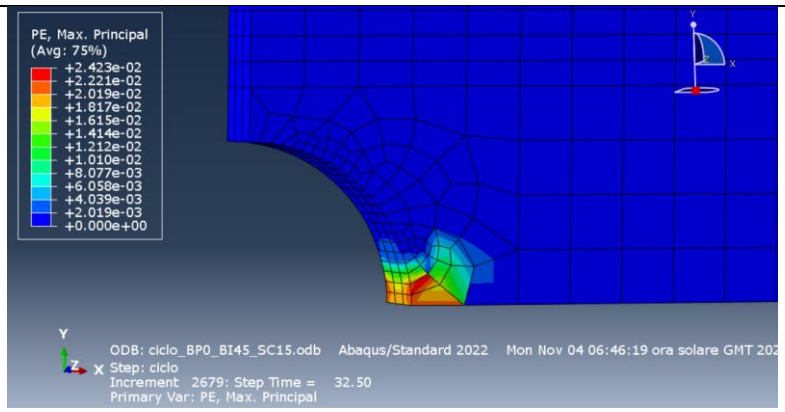
BP0_BI30_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

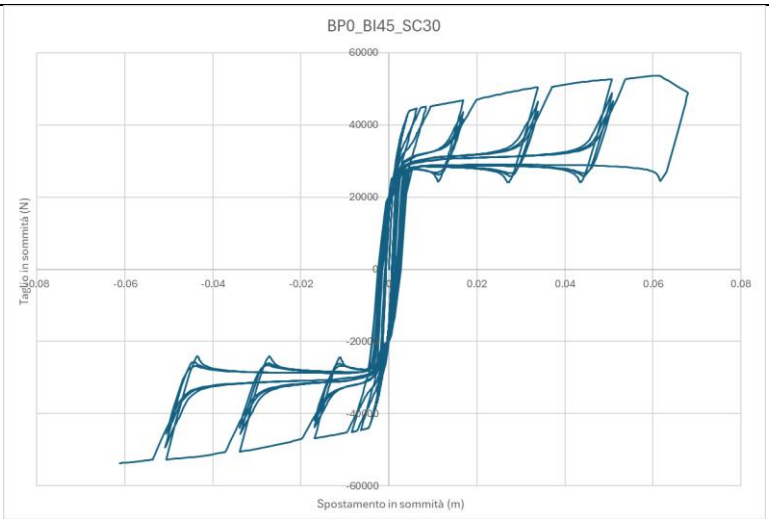
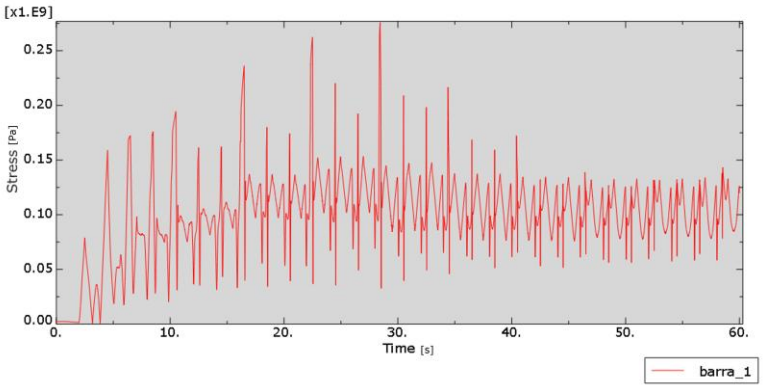
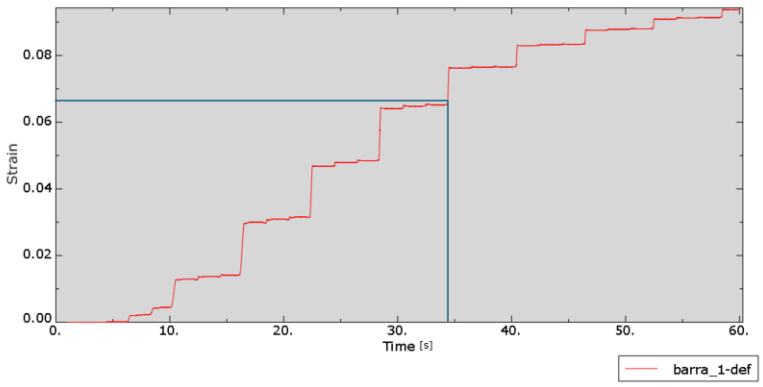
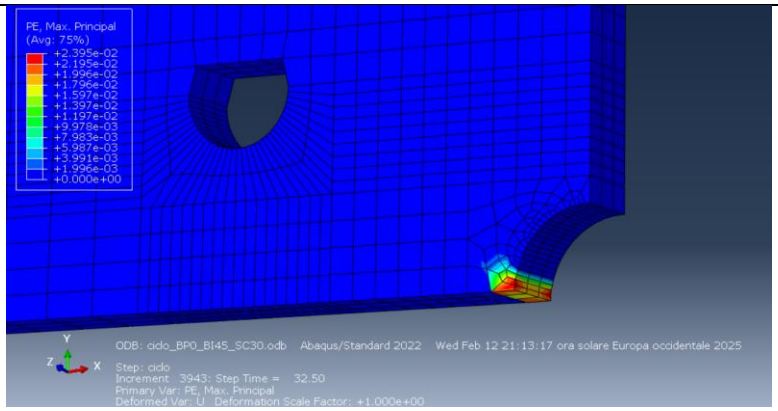
BP0_BI30_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

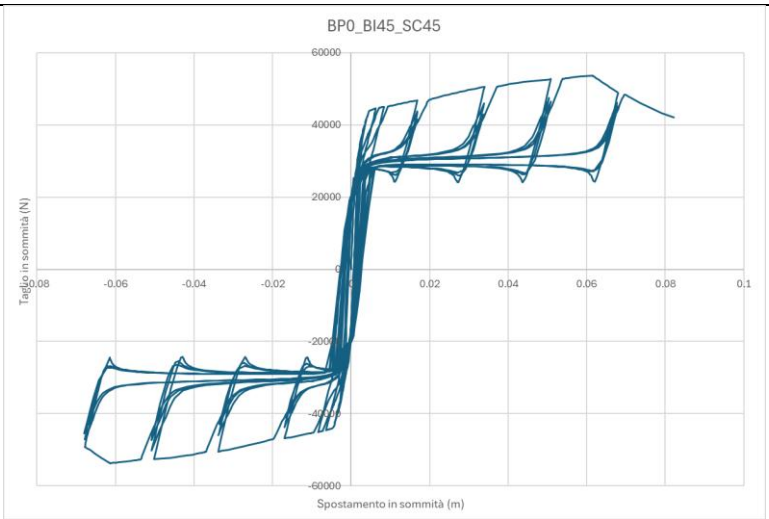
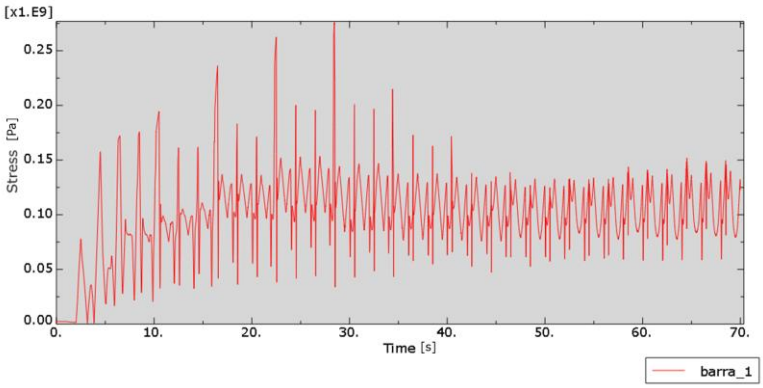
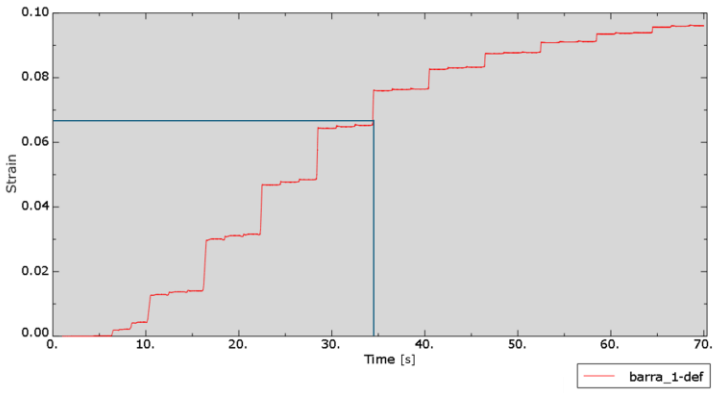
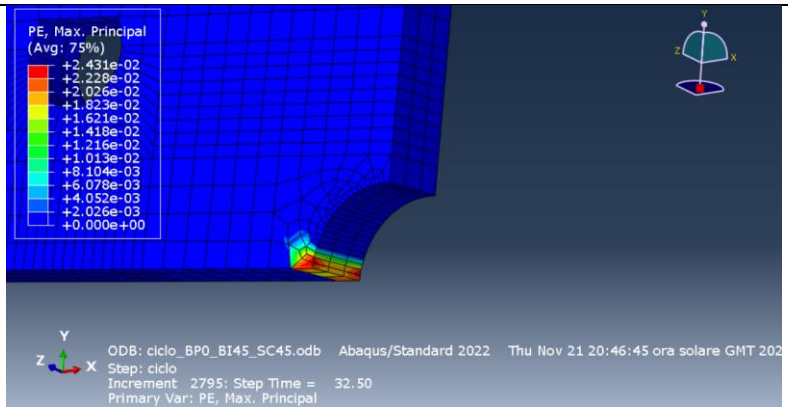
BP0_BI45_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

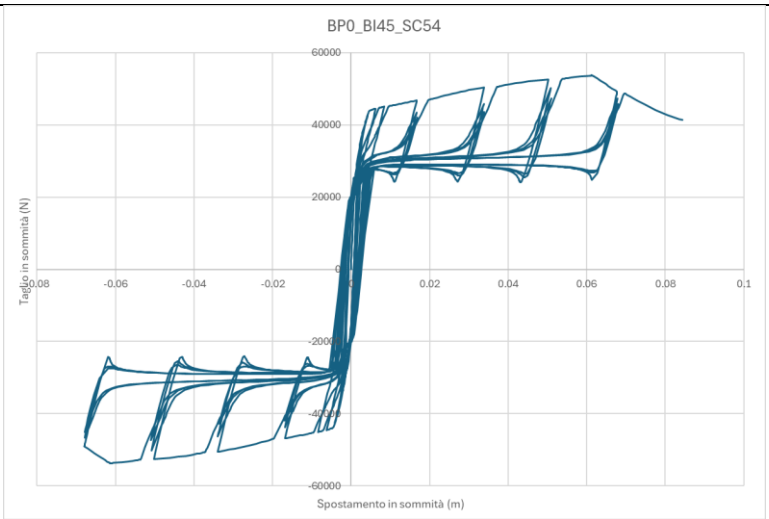
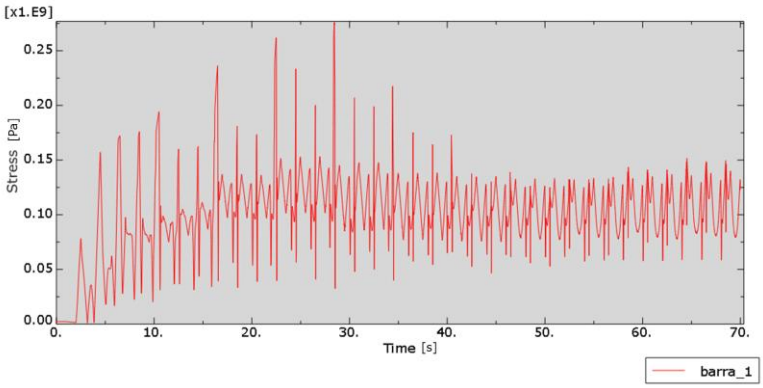
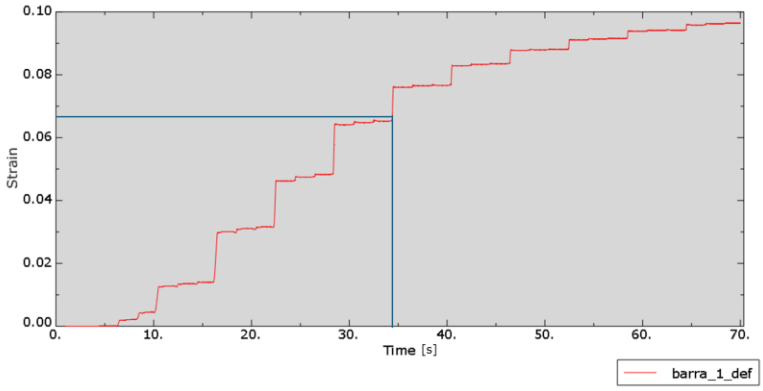
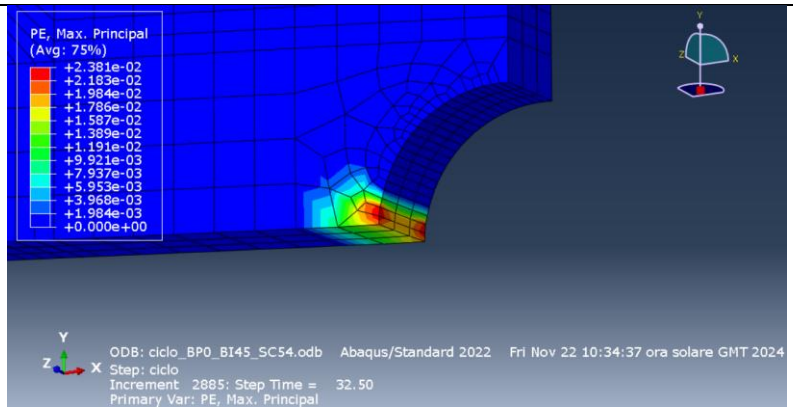
BP0_BI45_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

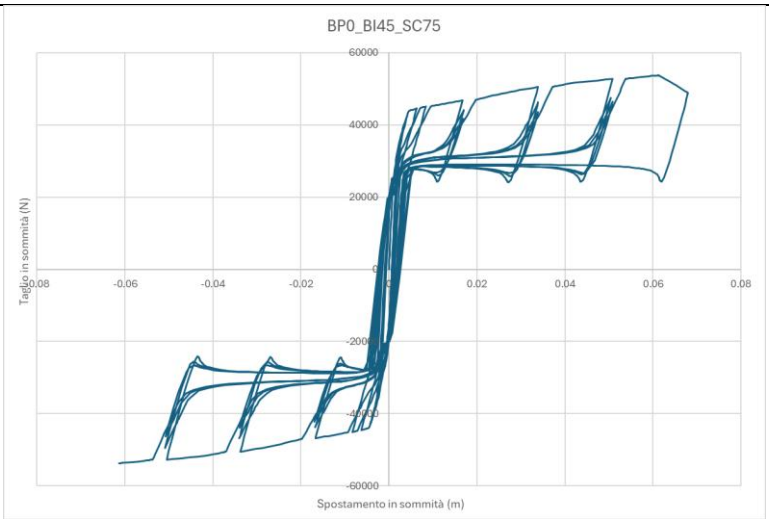
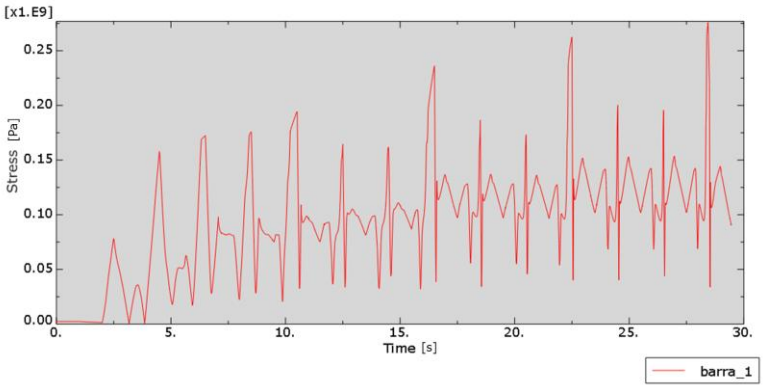
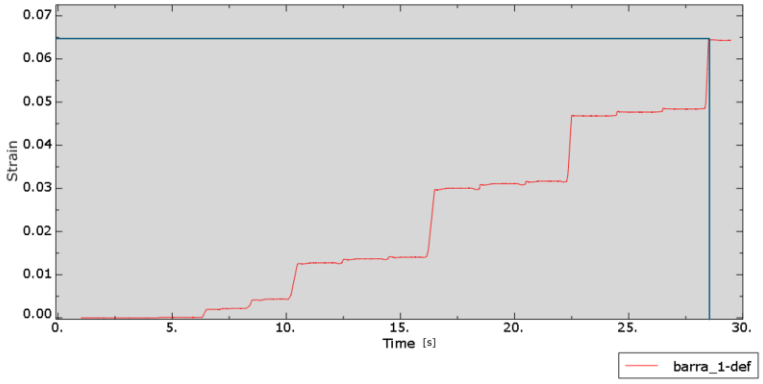
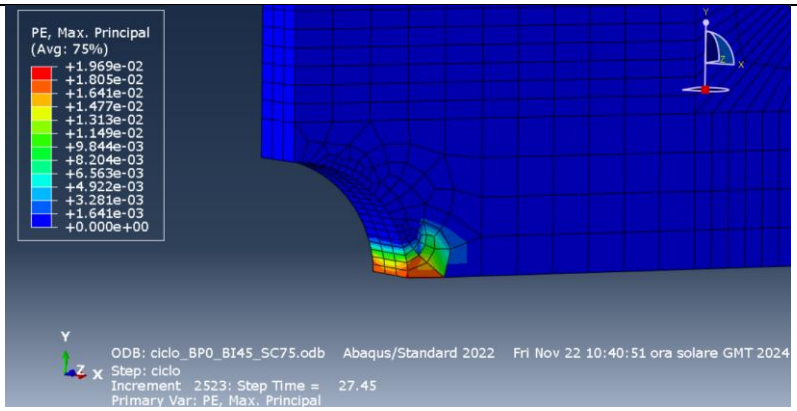
BP0_BI45_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

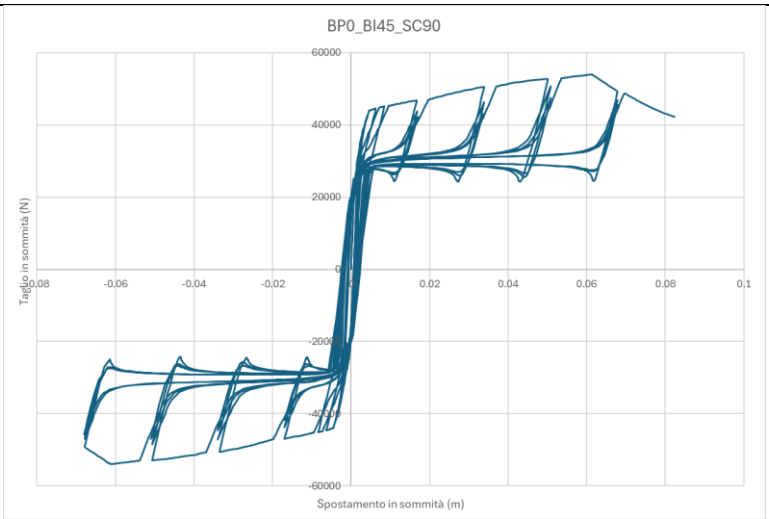
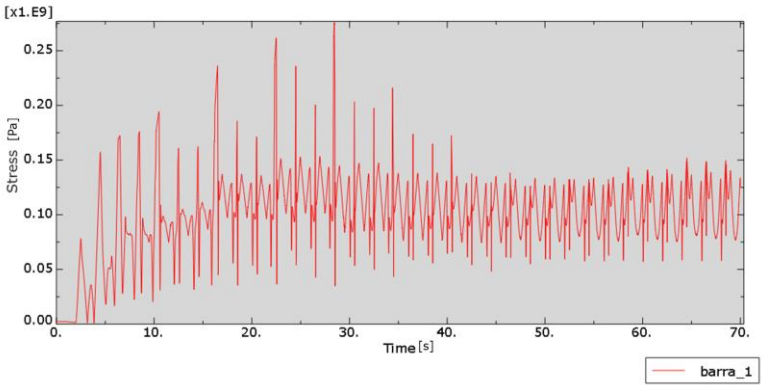
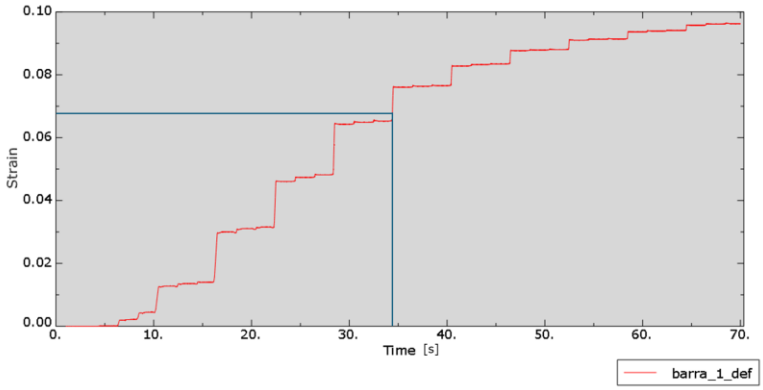
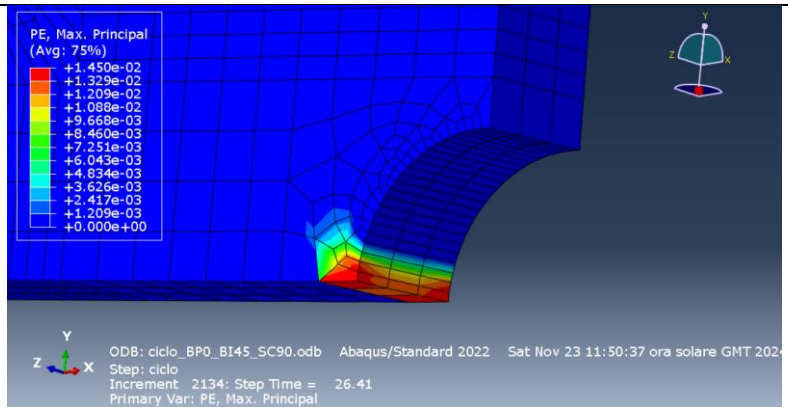
BP0_BI45_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

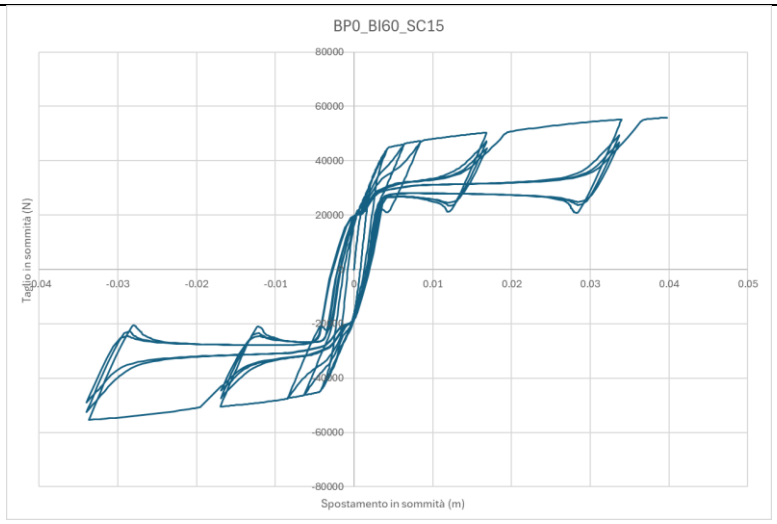
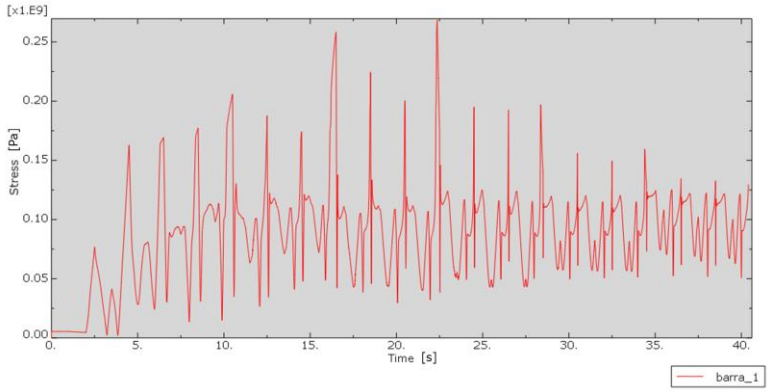
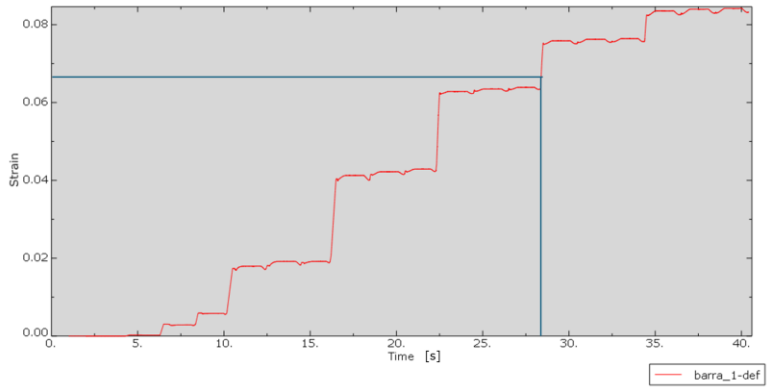
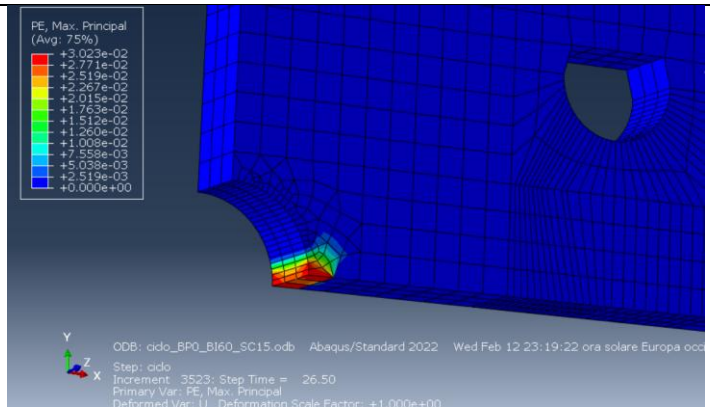
BP0_BI45_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

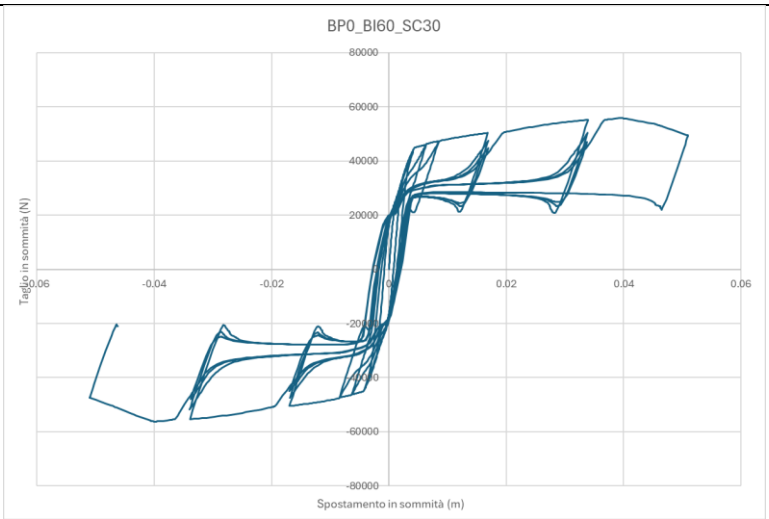
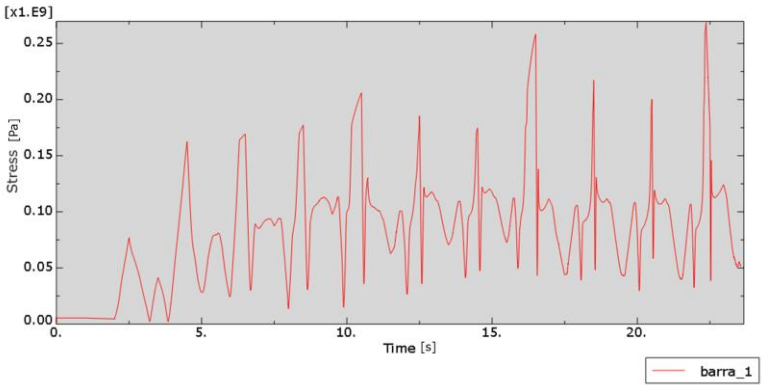
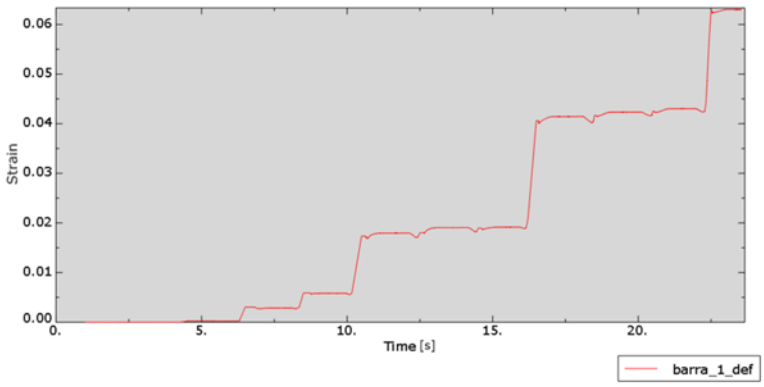
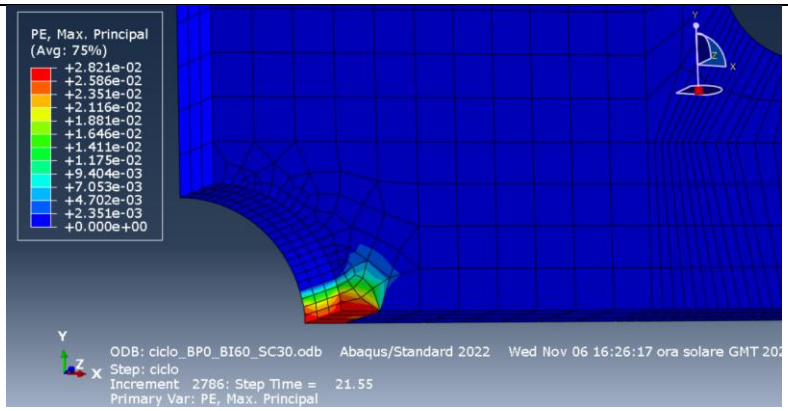
BP0_BI45_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

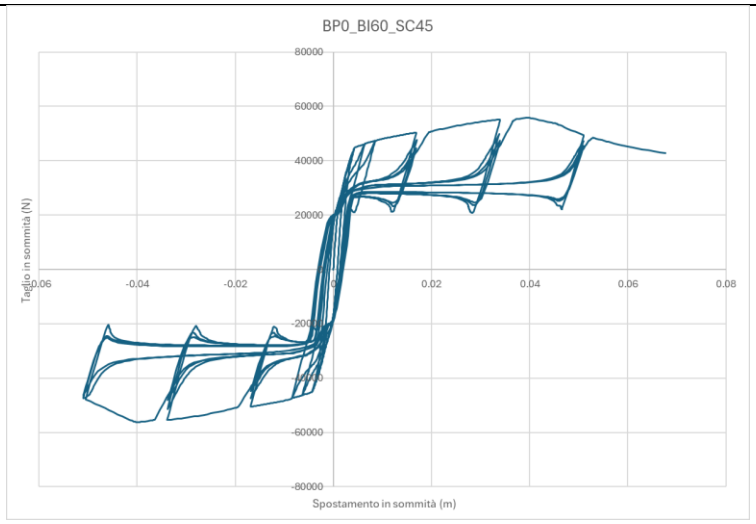
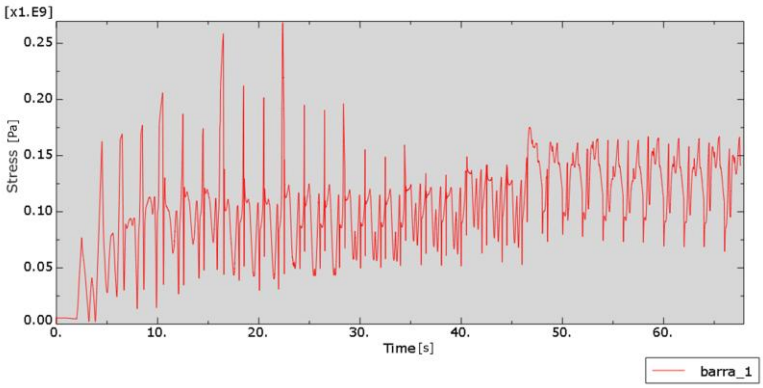
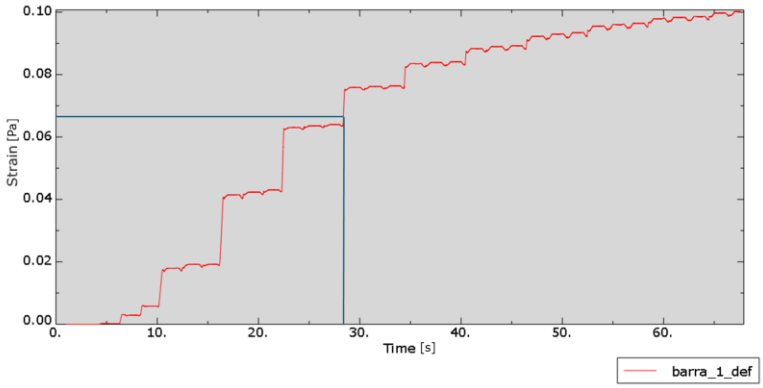
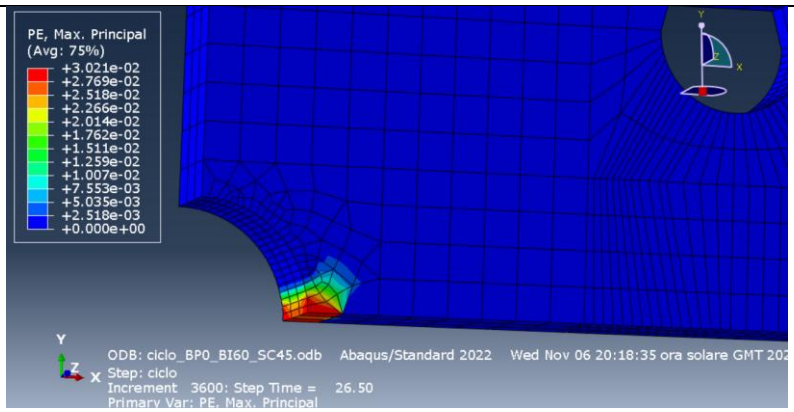
BP0_BI60_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

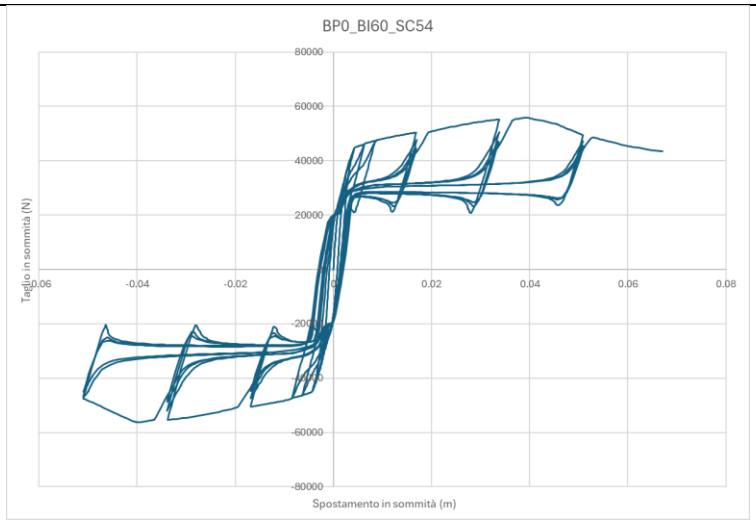
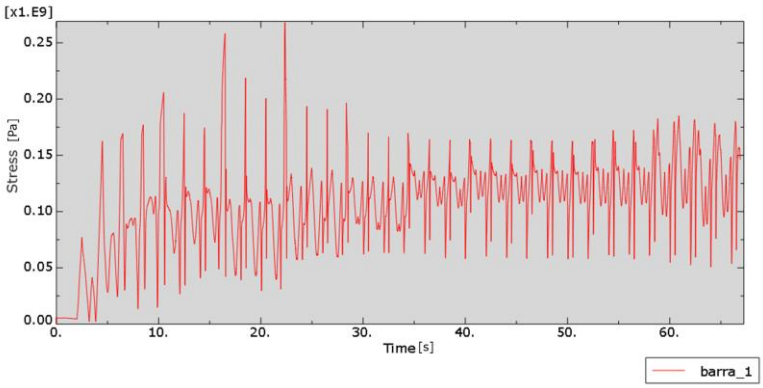
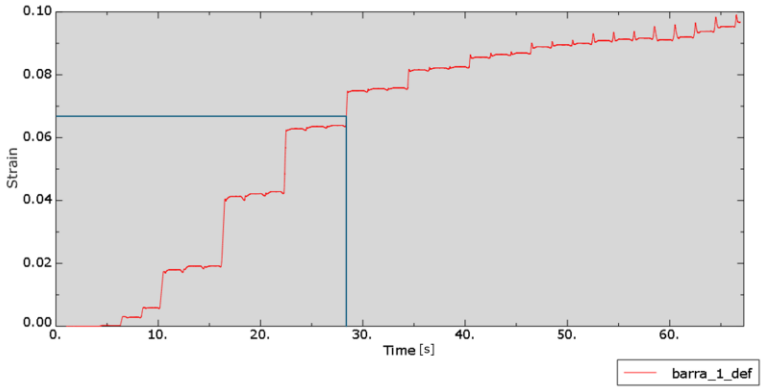
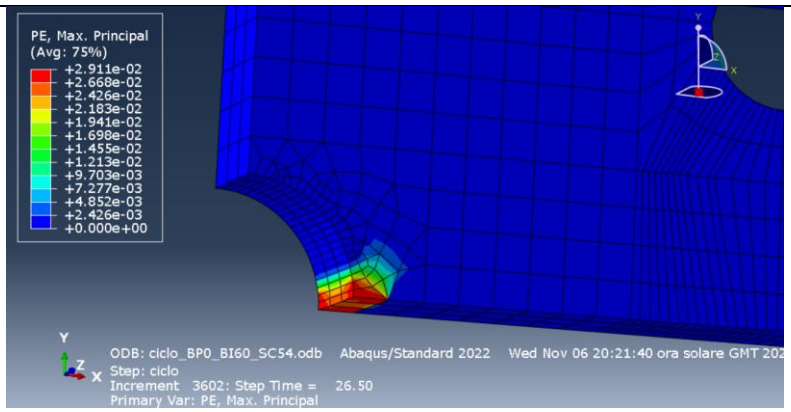
BP0_BI60_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

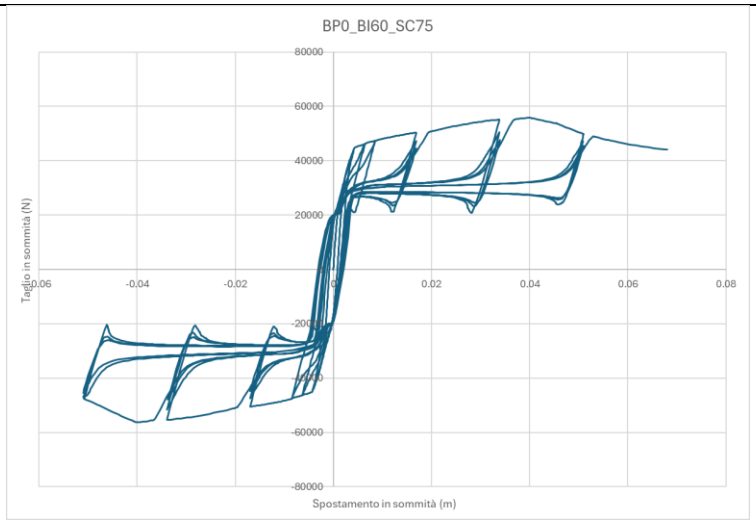
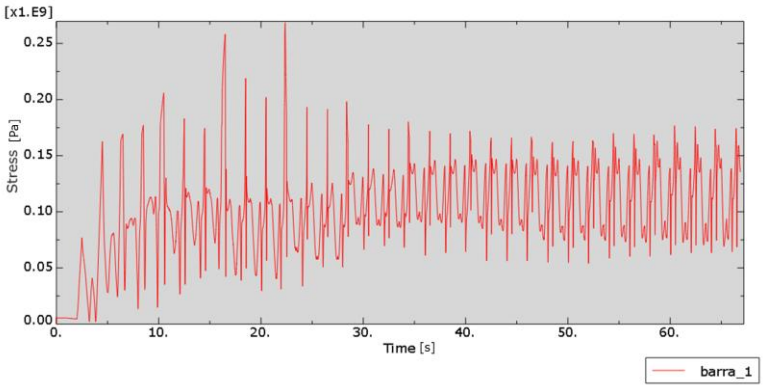
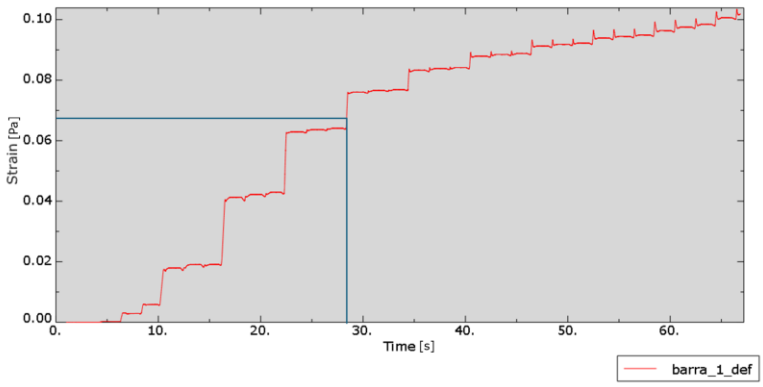
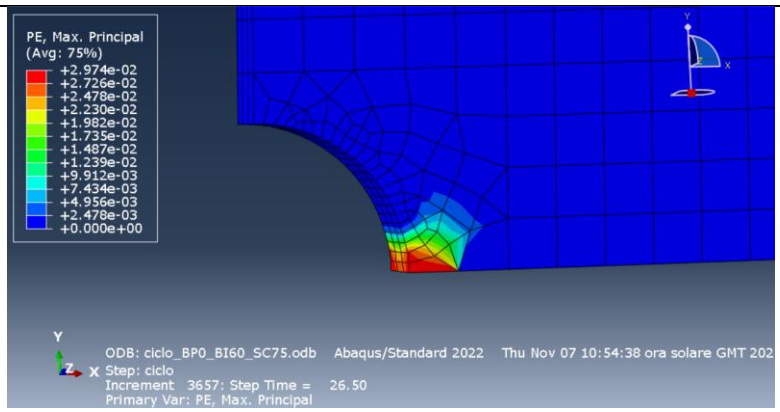
BP0_BI60_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

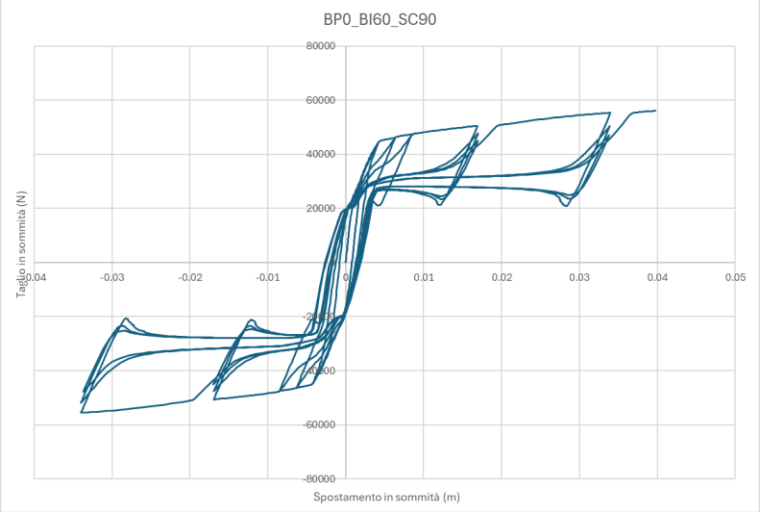
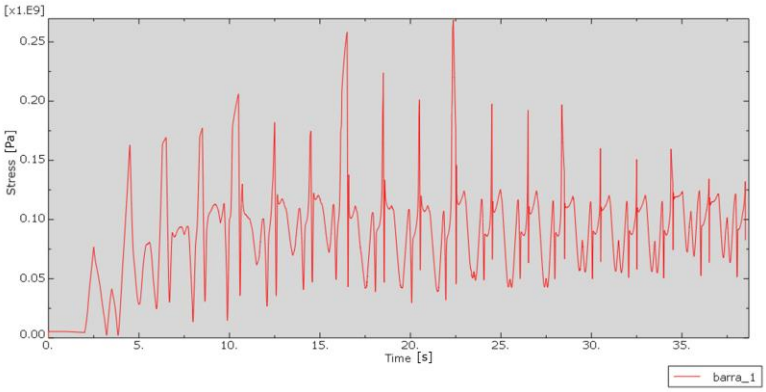
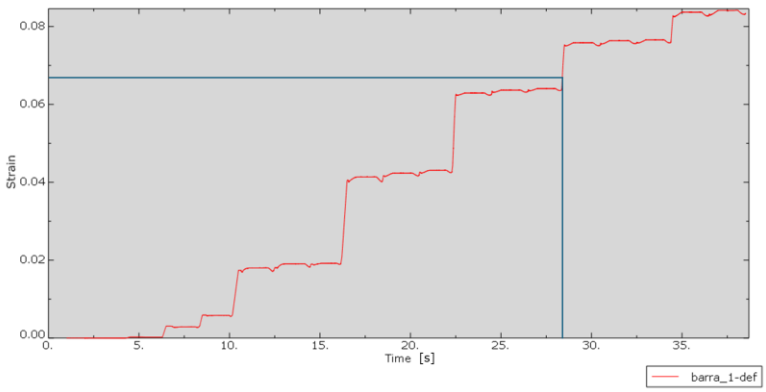
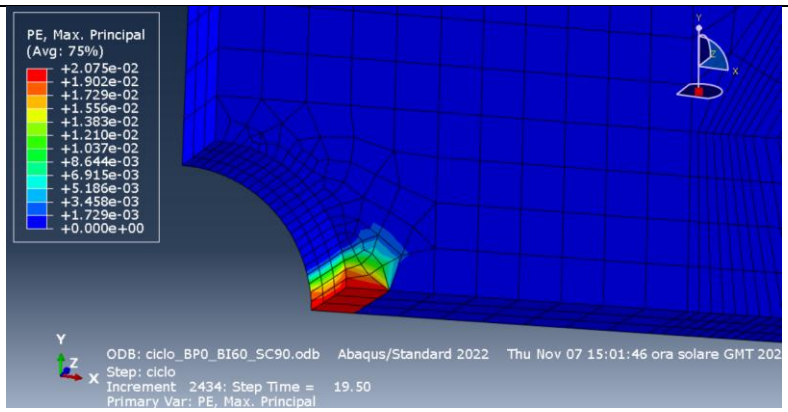
BP0_BI60_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

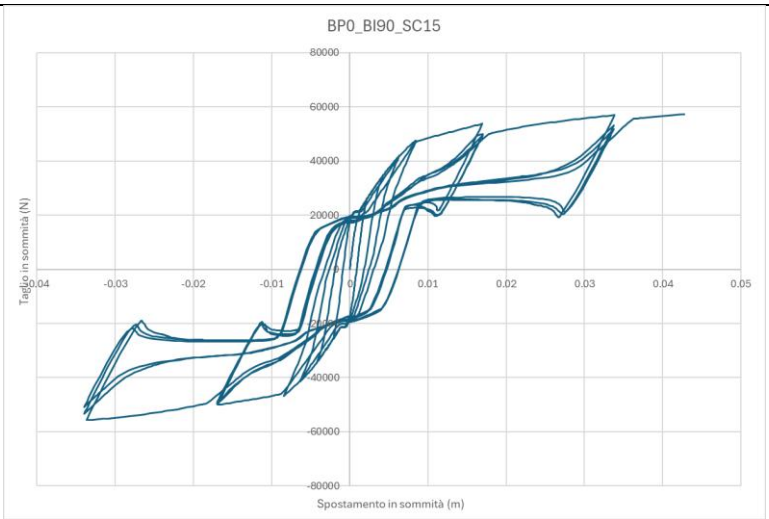
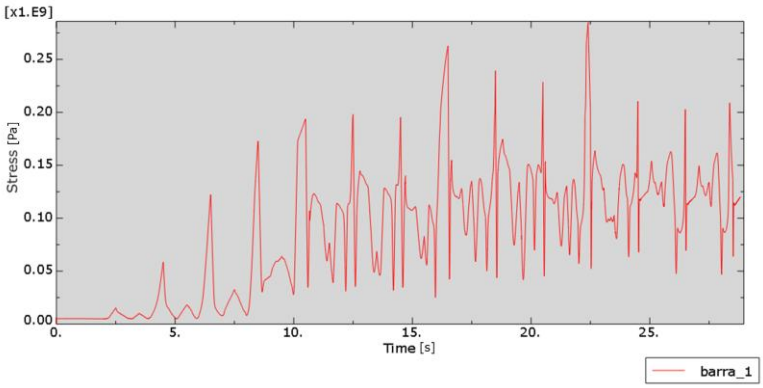
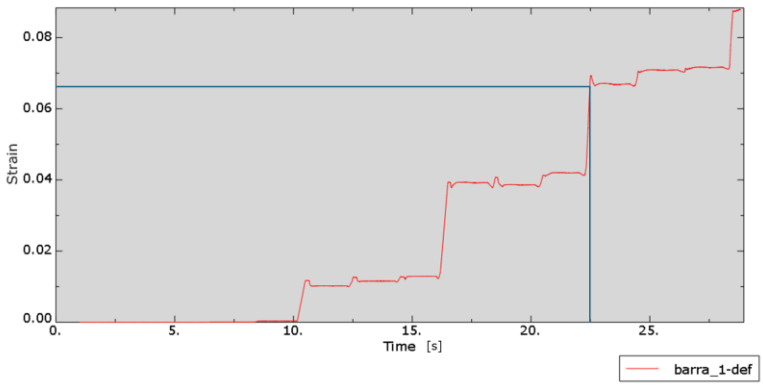
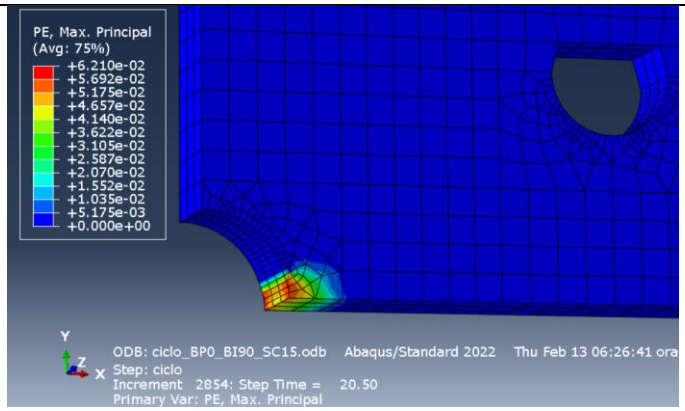
BP0_BI60_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

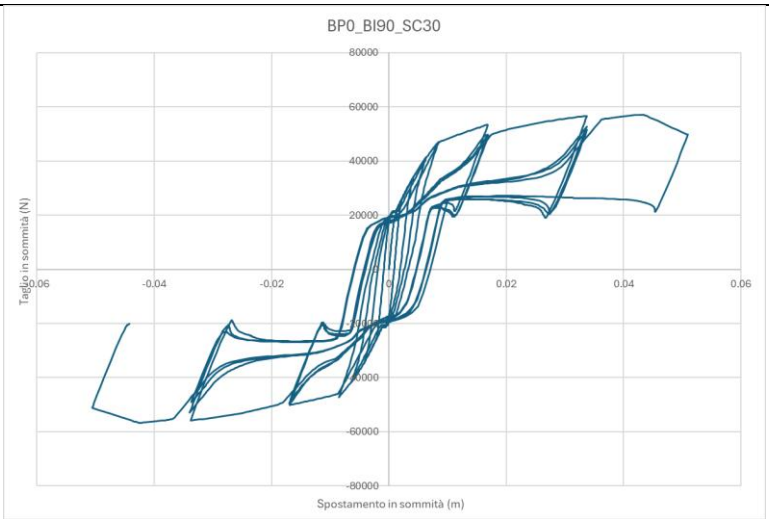
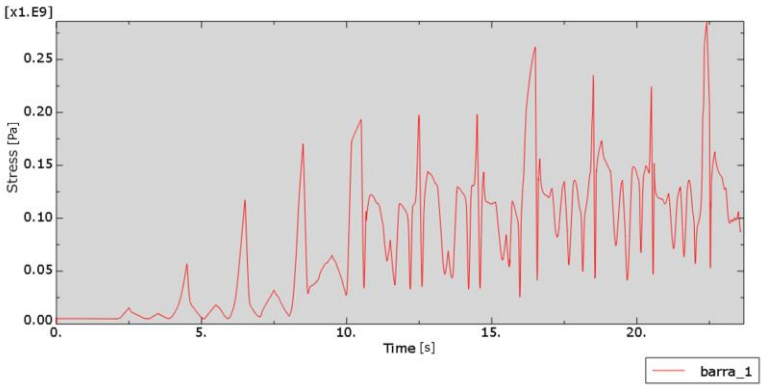
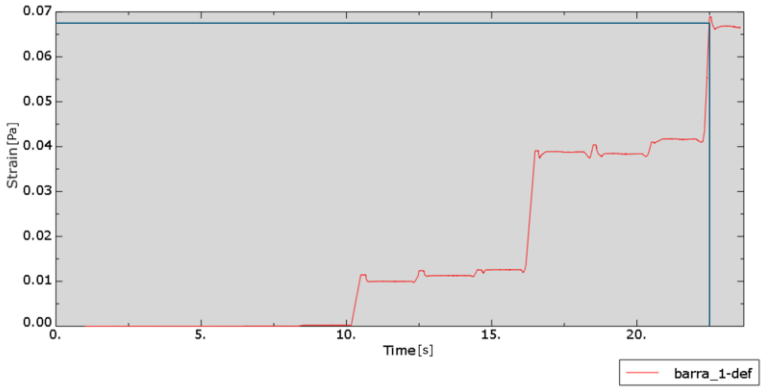
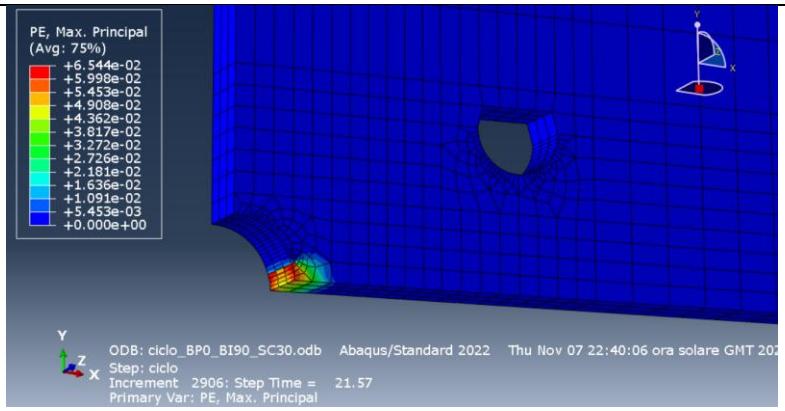
BP0_BI60_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

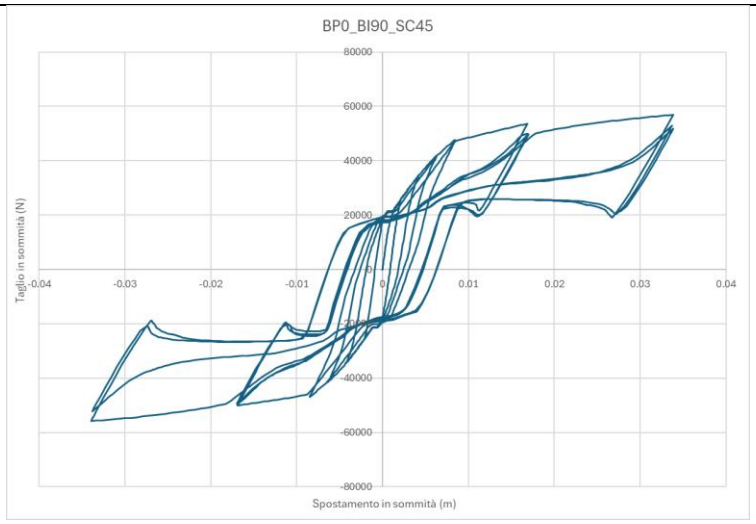
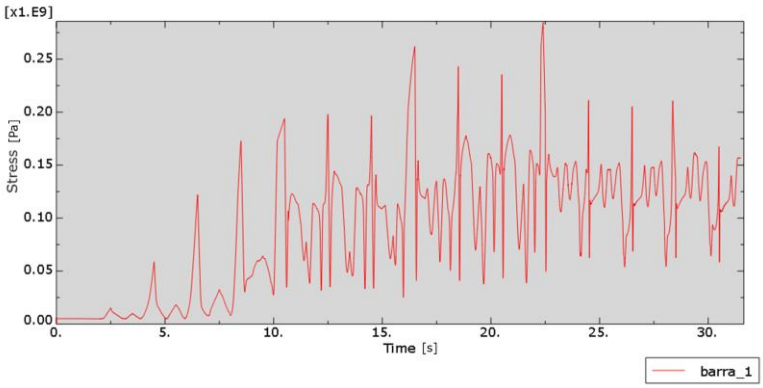
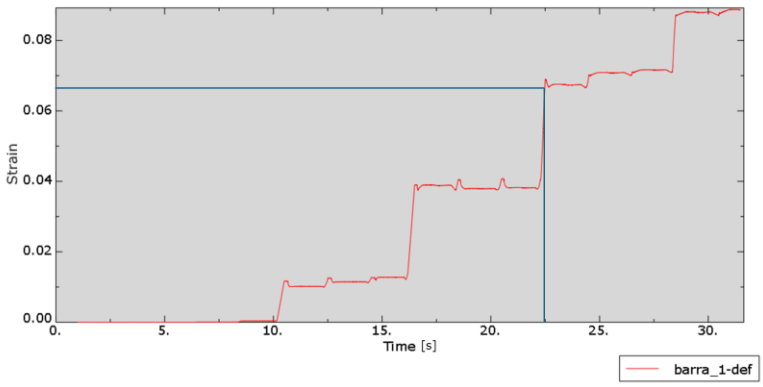
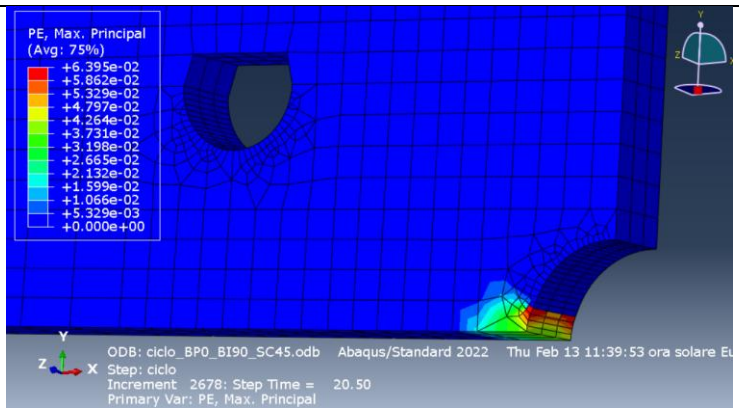
BP0_BI90_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

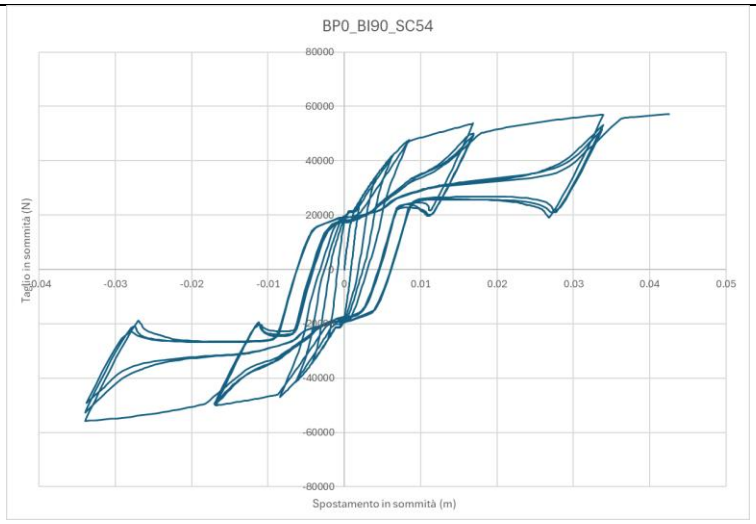
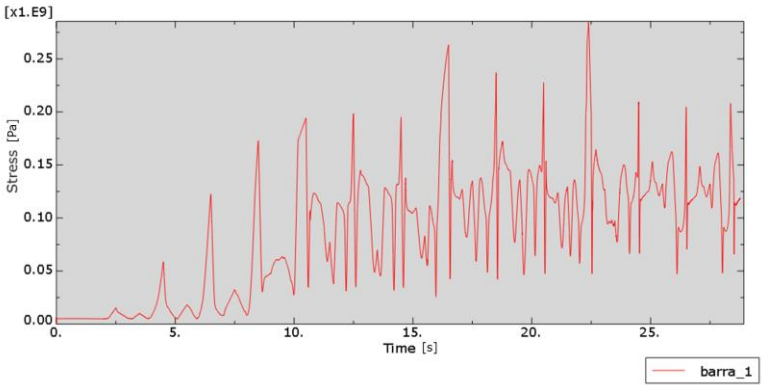
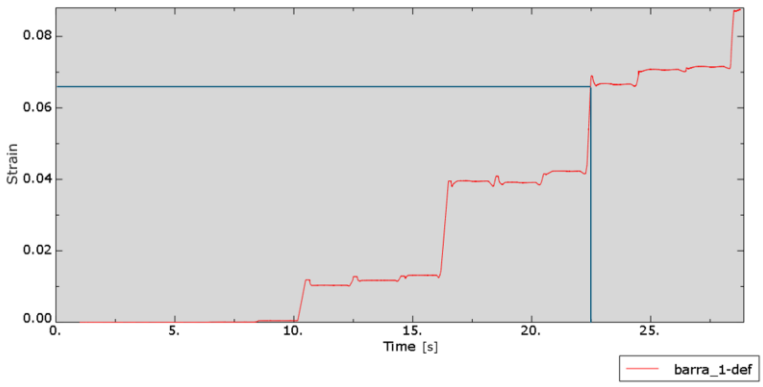
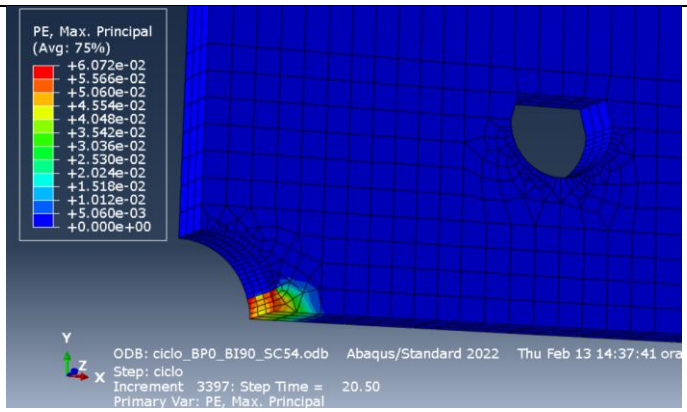
BP0_BI90_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

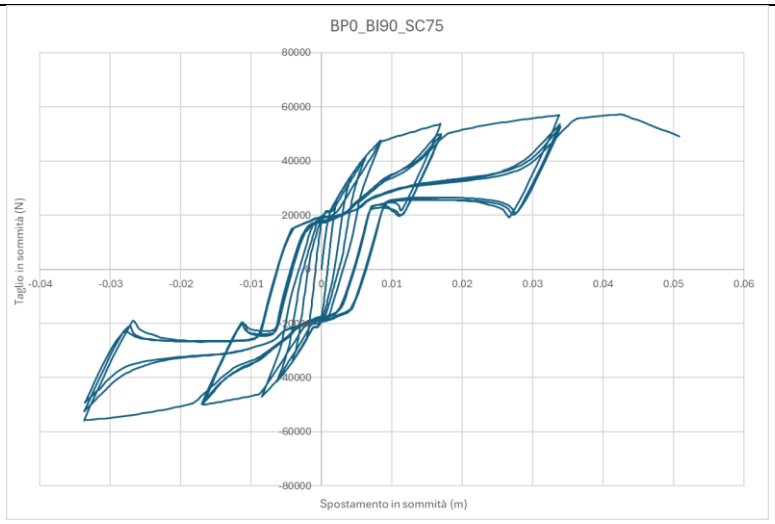
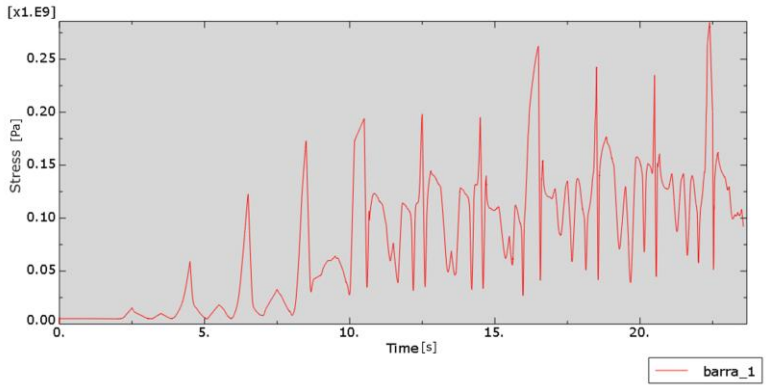
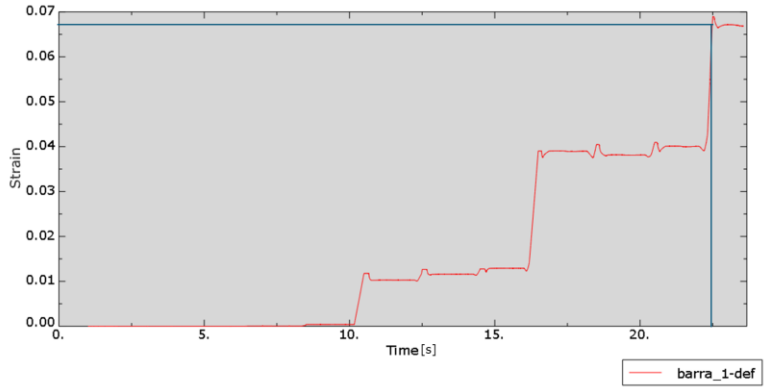
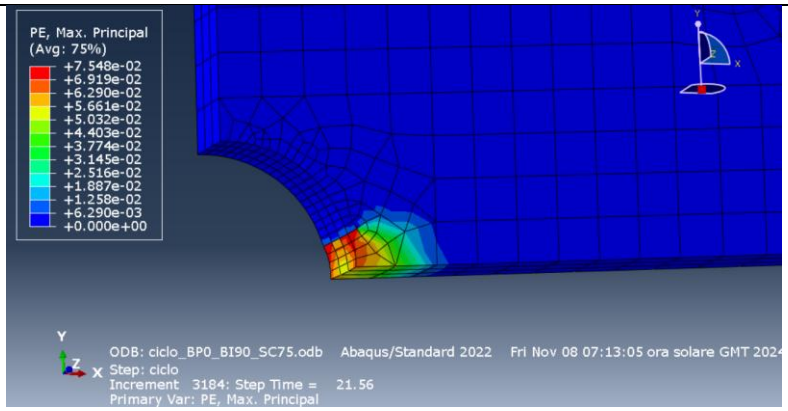
BP0_BI90_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

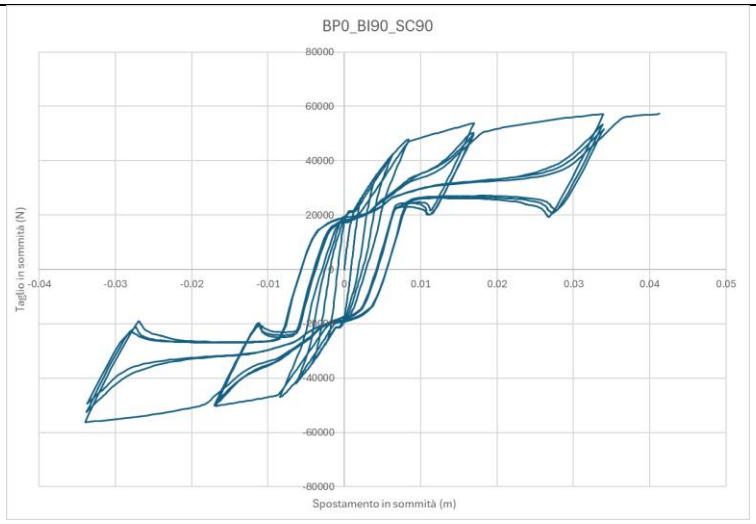
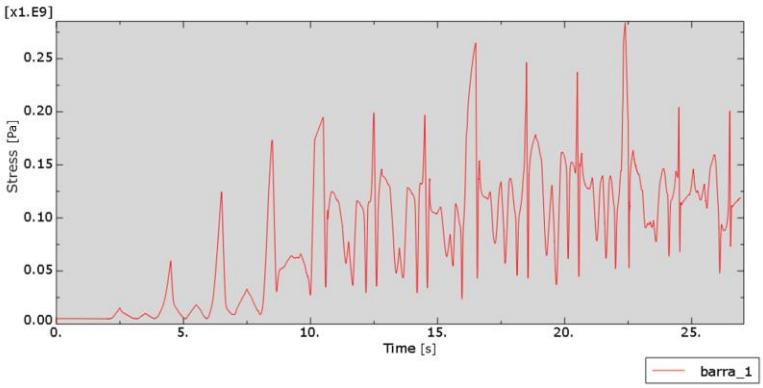
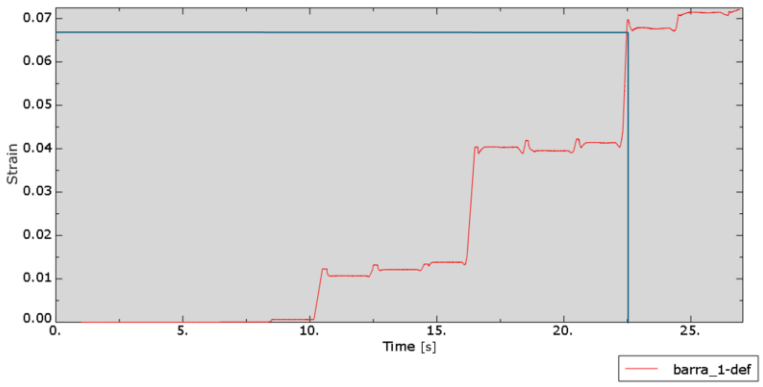
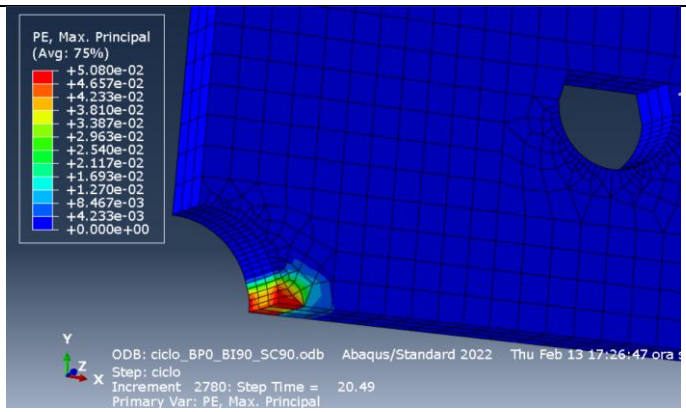
BP0_BI90_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

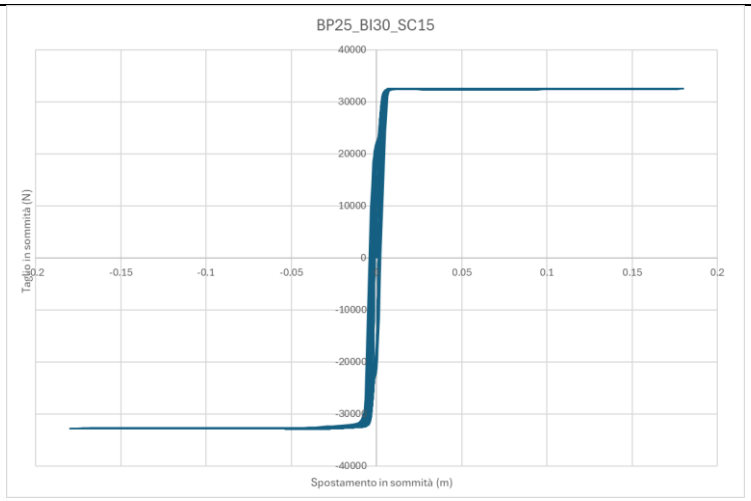
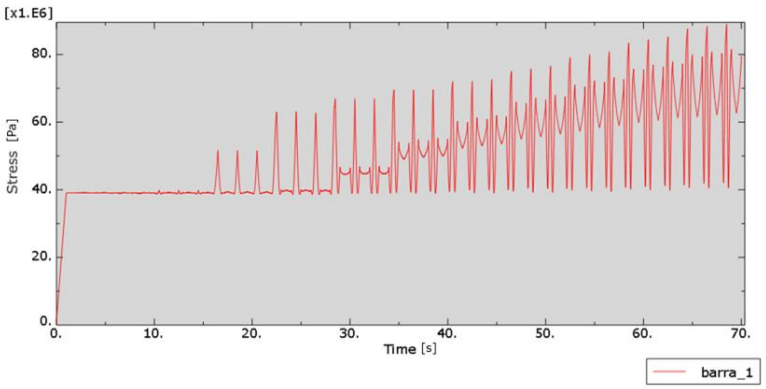
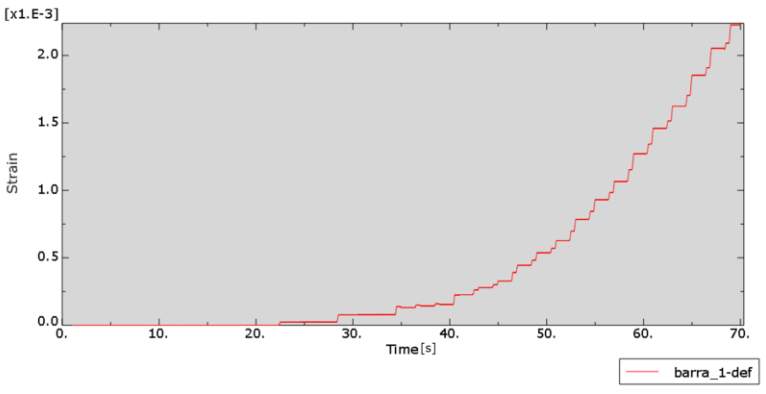
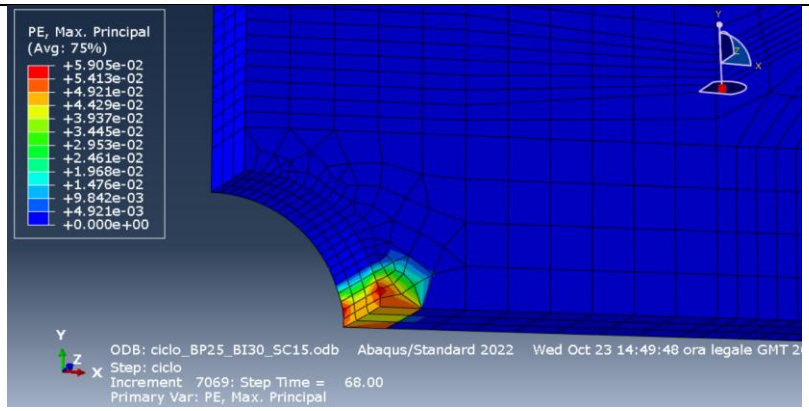
BP0_BI90_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

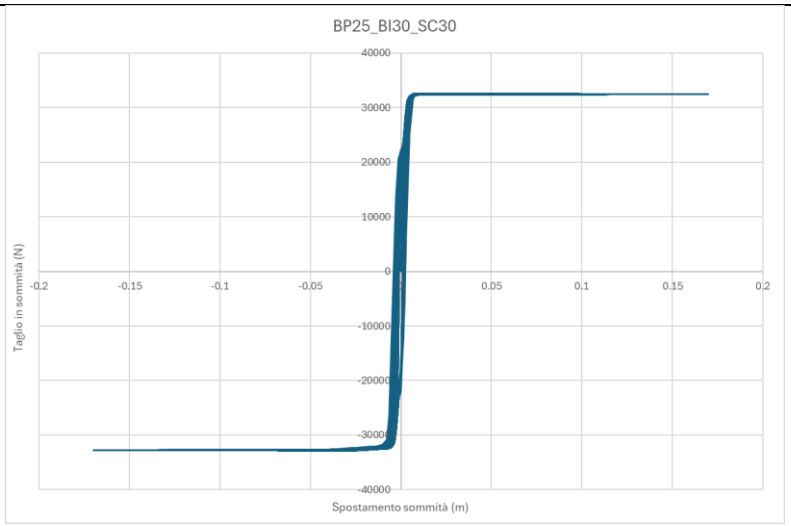
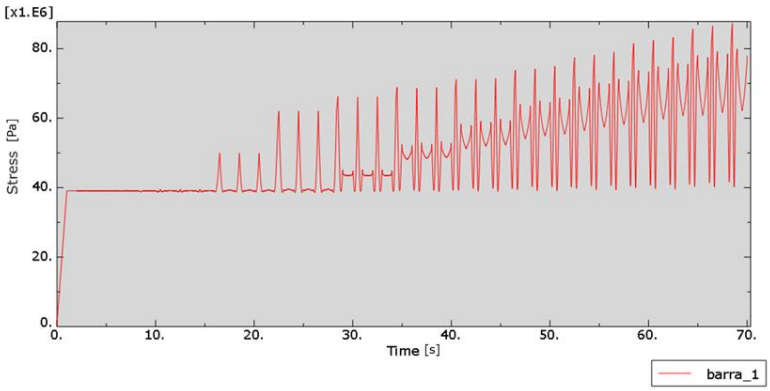
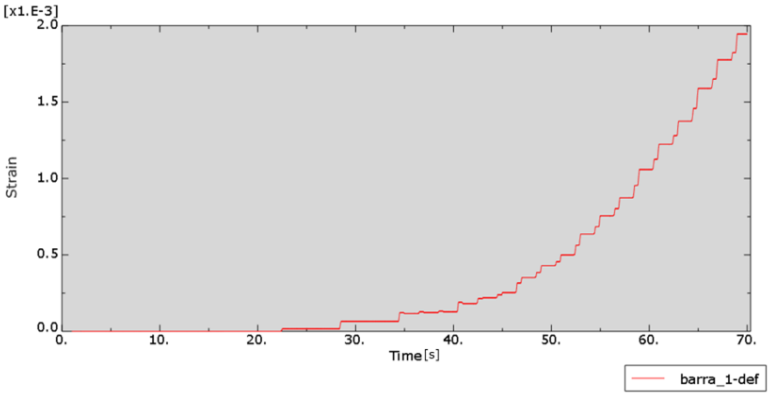
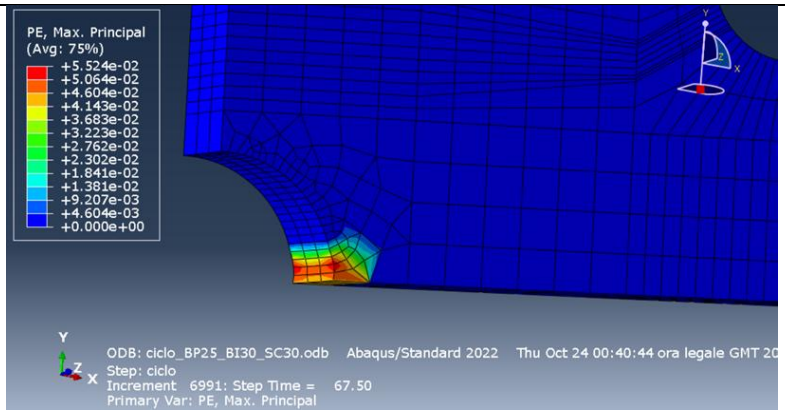
BP0_BI90_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

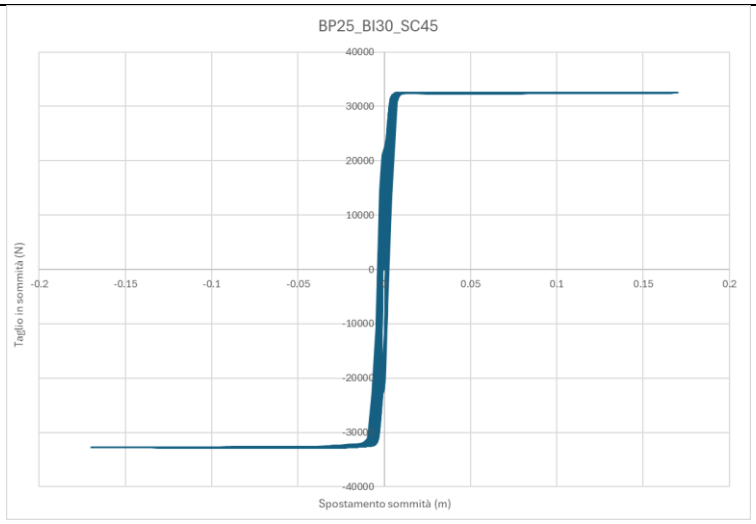
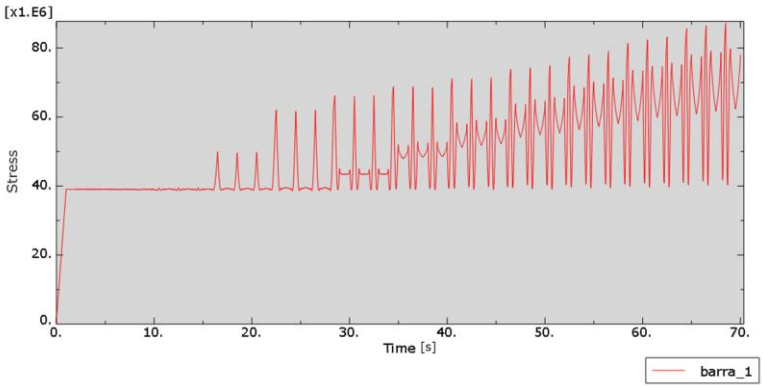
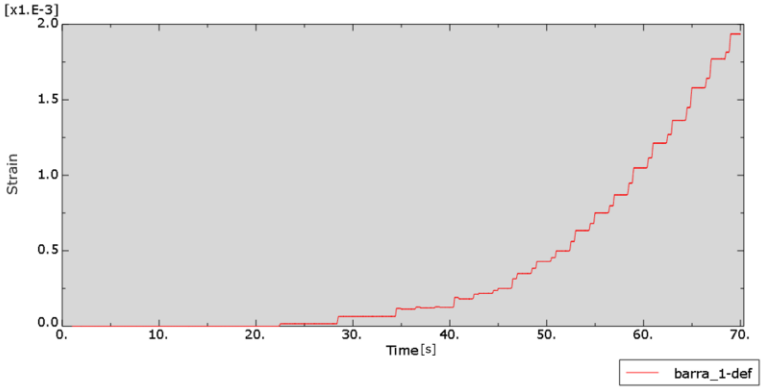
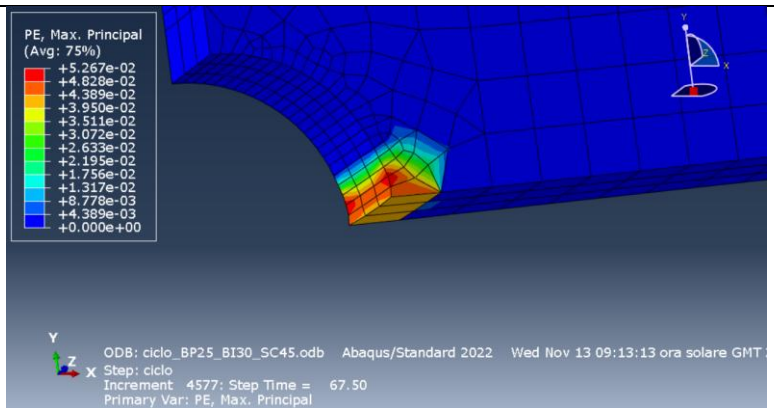
BP25_BI30_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

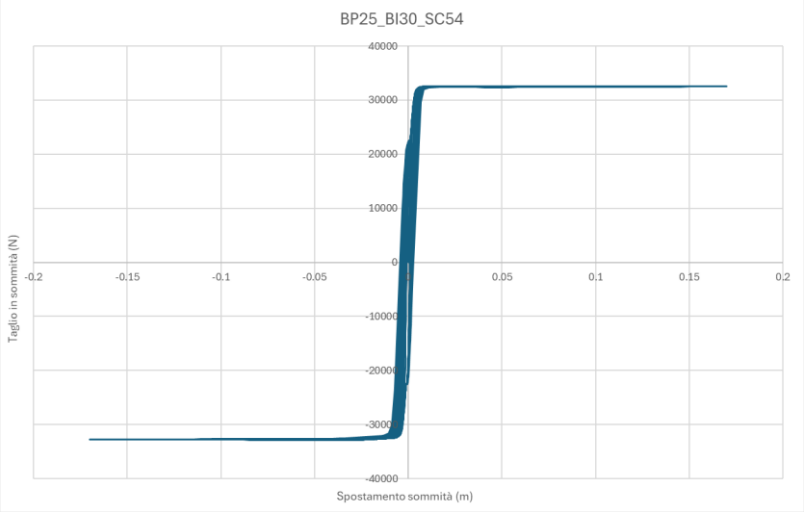
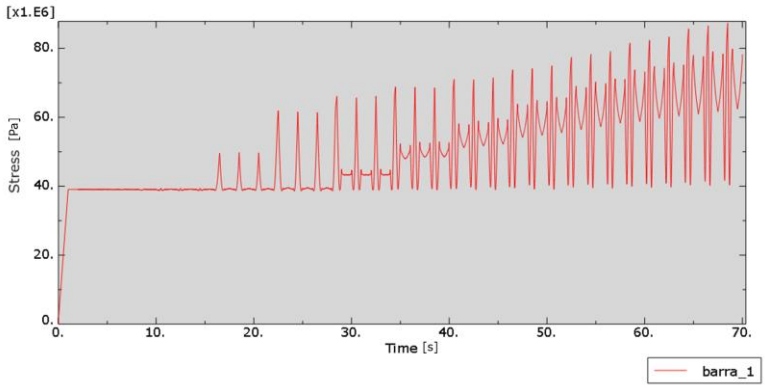
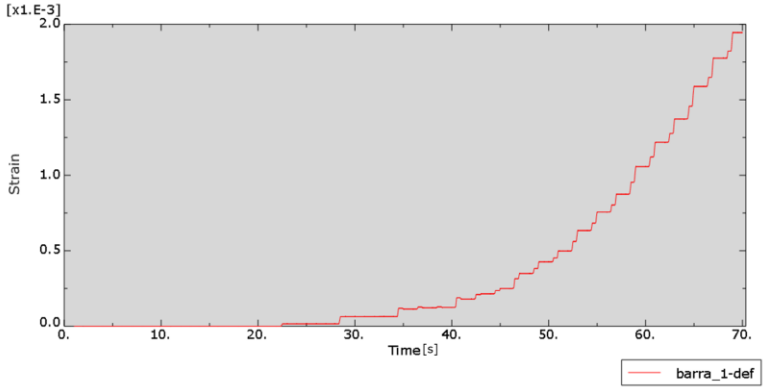
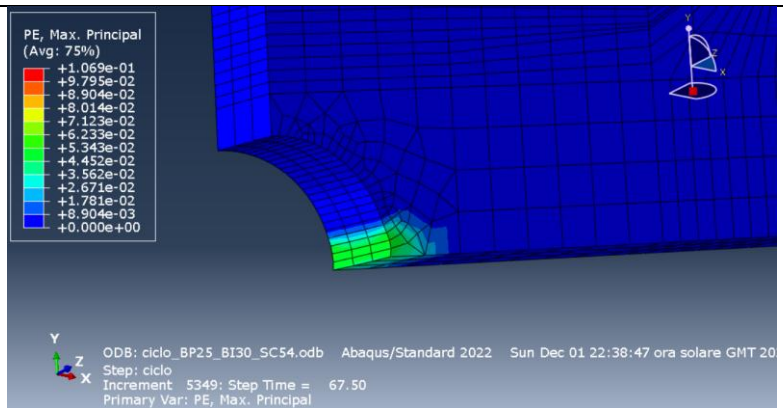
BP25_BI30_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

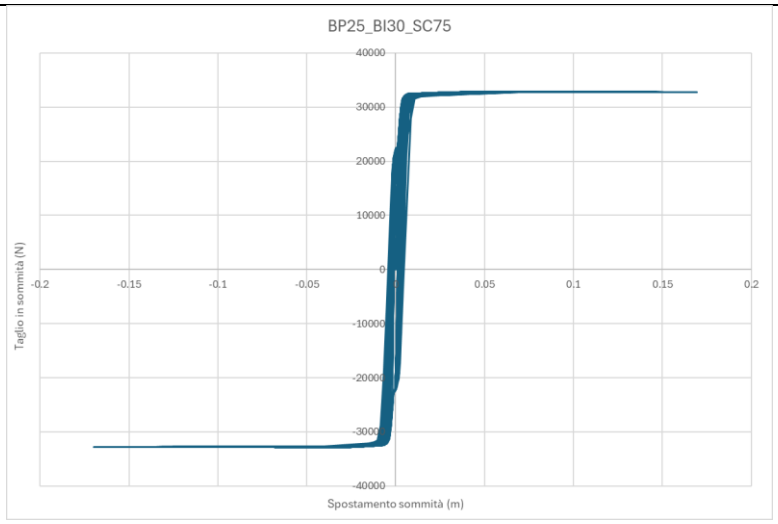
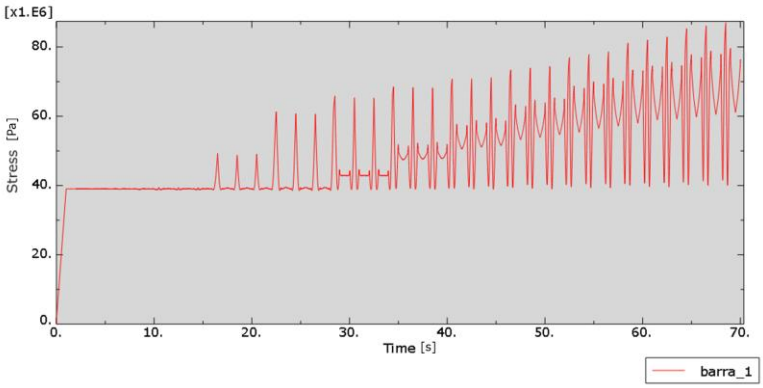
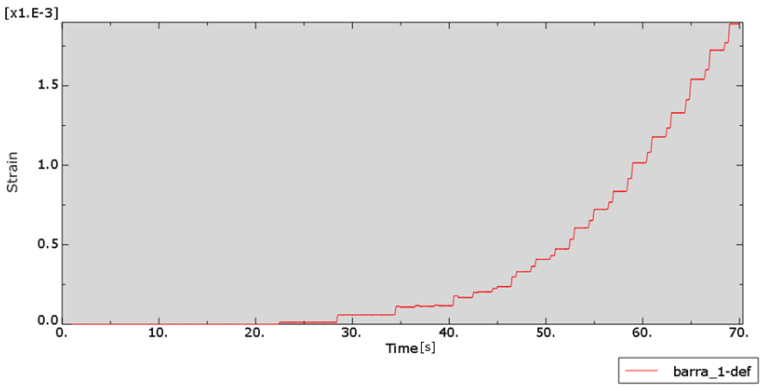
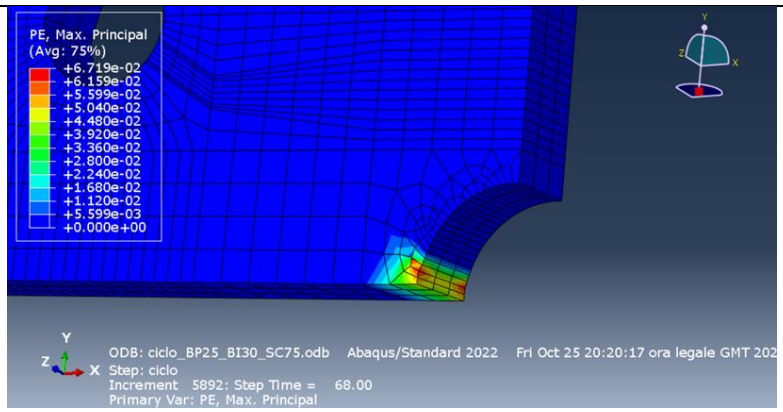
BP25_BI30_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

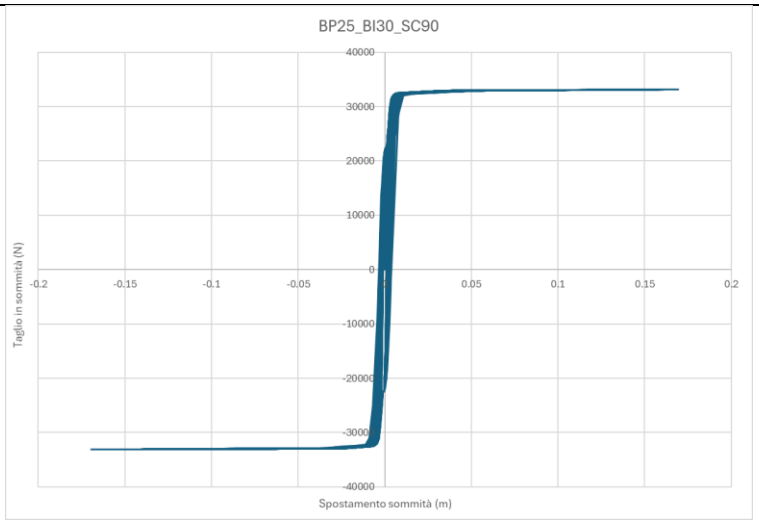
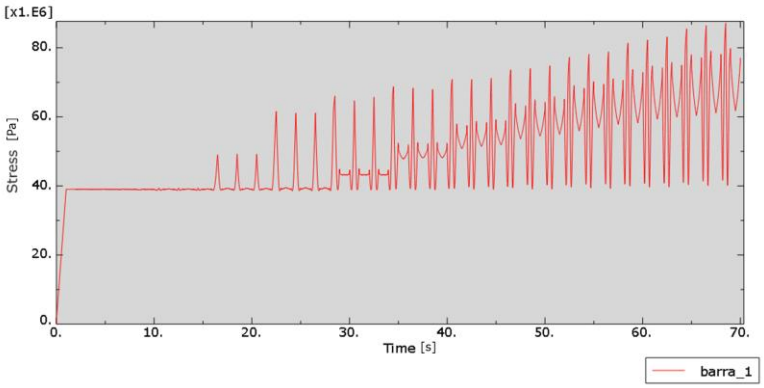
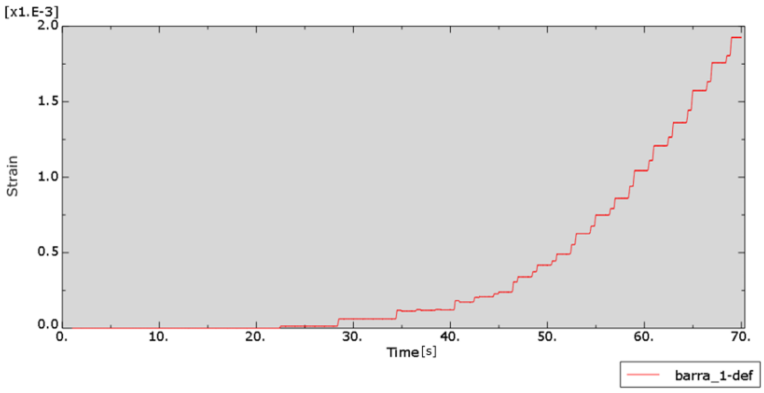
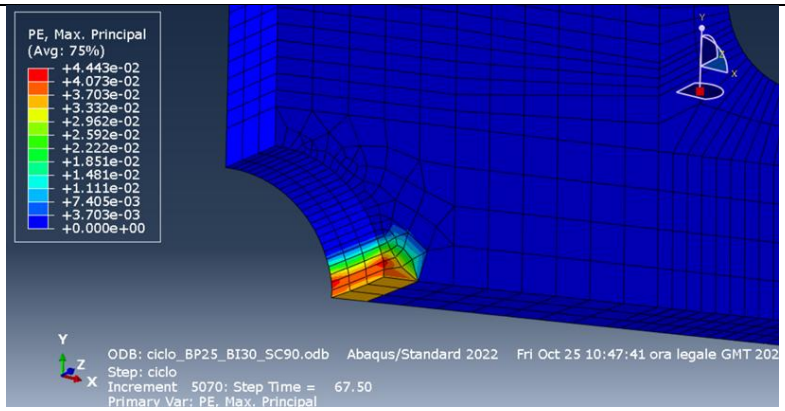
BP25_BI30_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

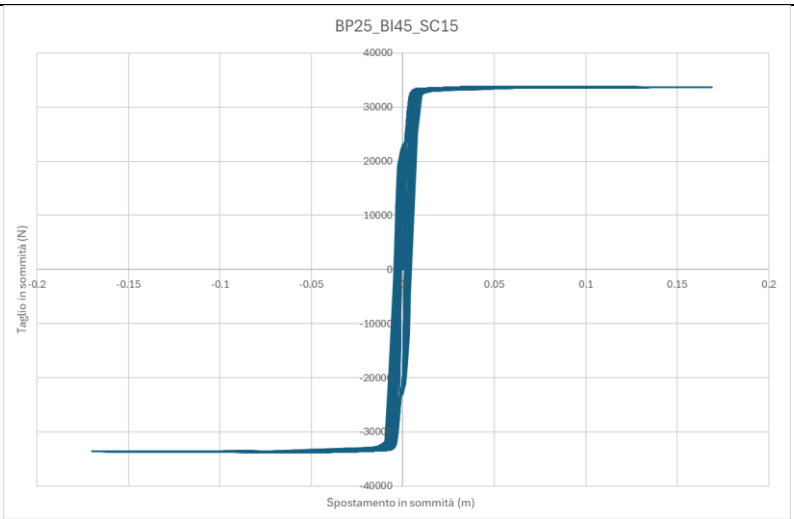
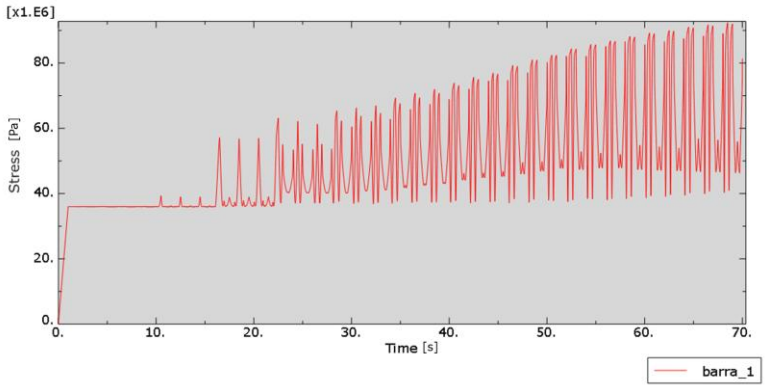
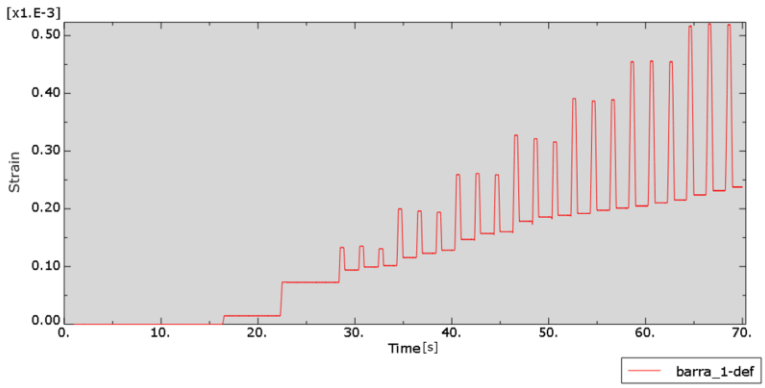
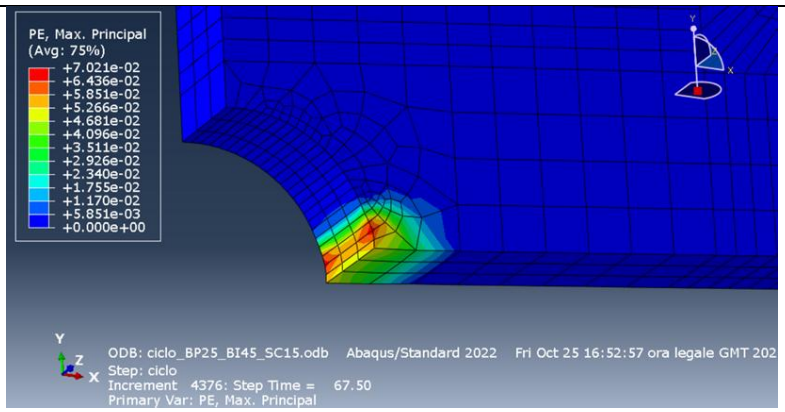
BP25_BI30_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

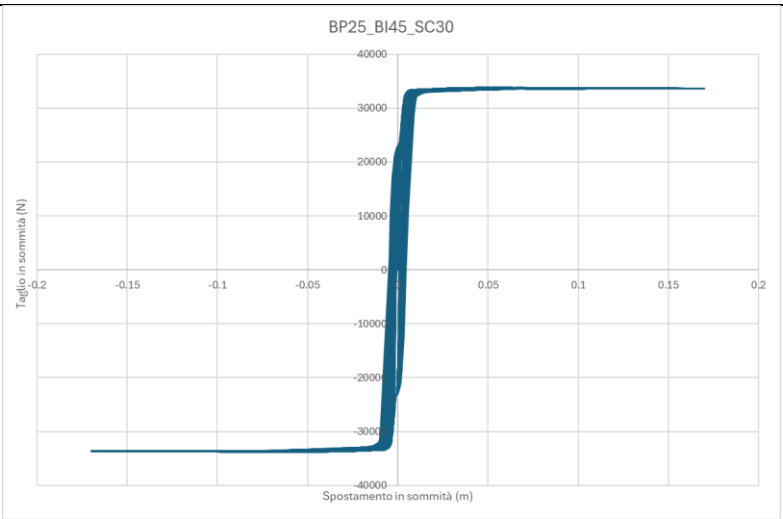
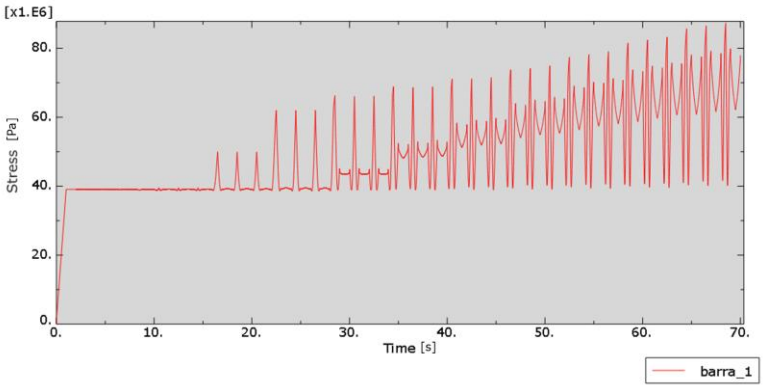
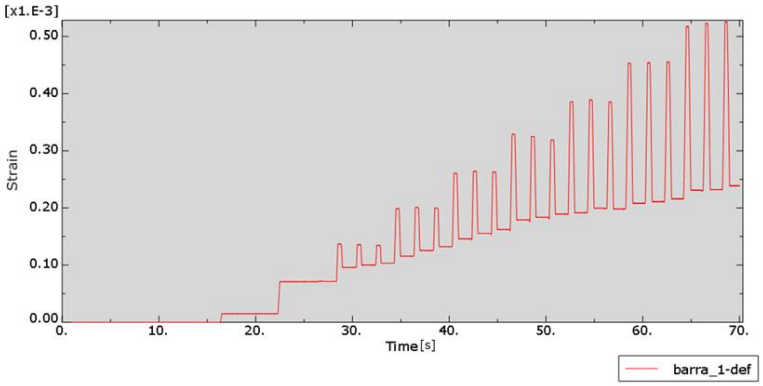
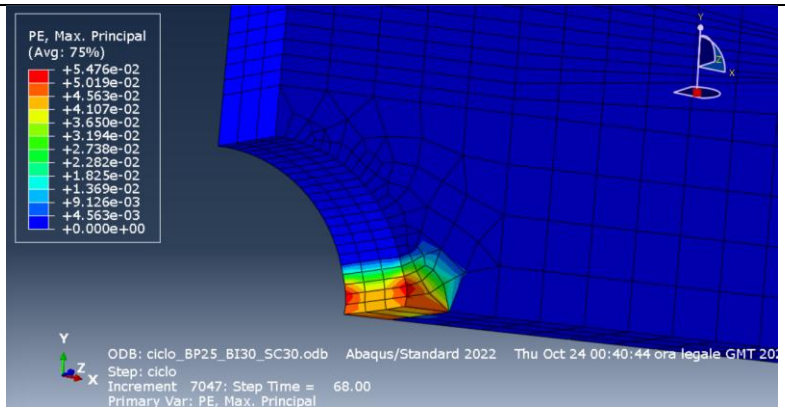
BP25_BI30_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

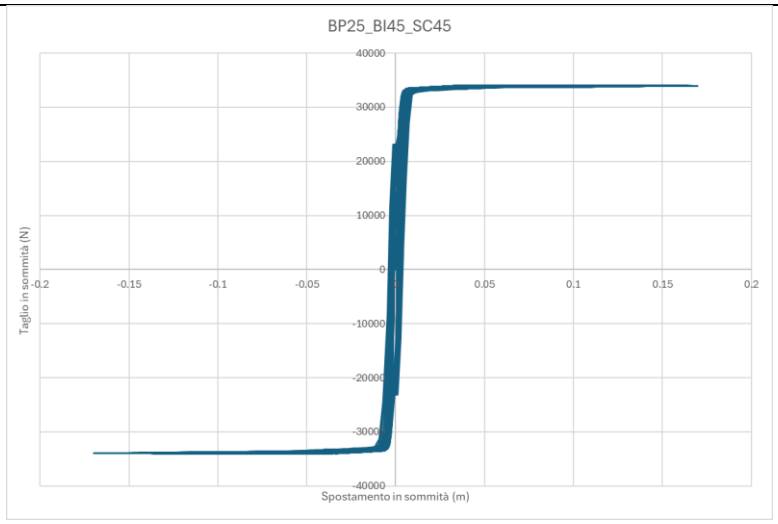
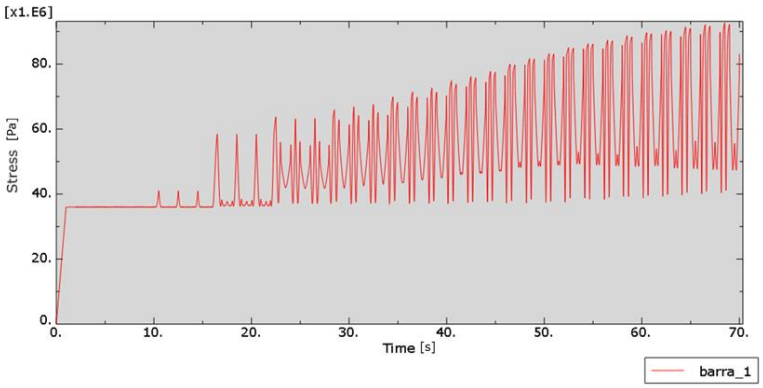
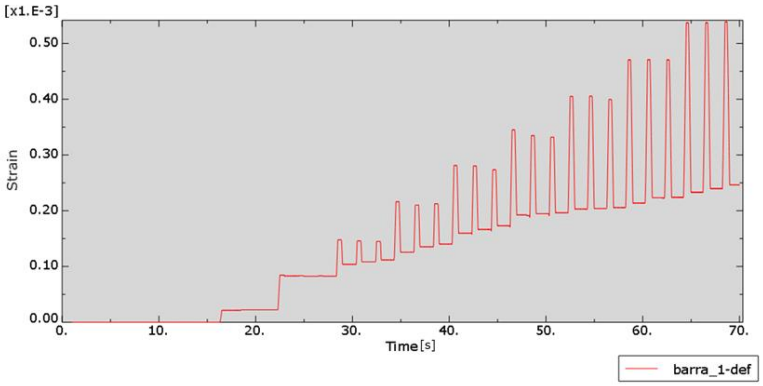
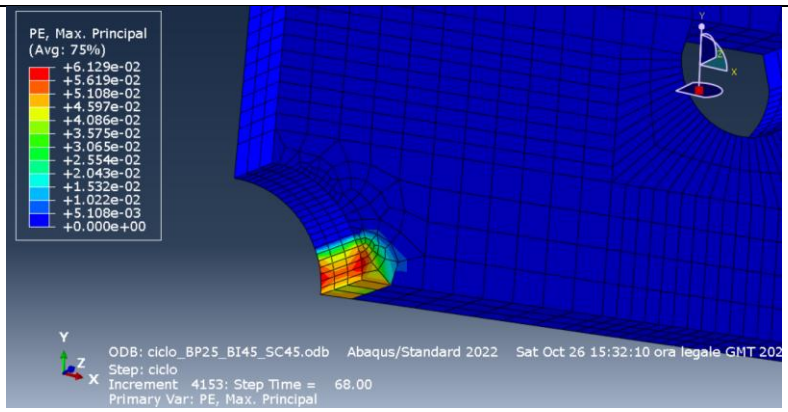
BP25_BI45_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

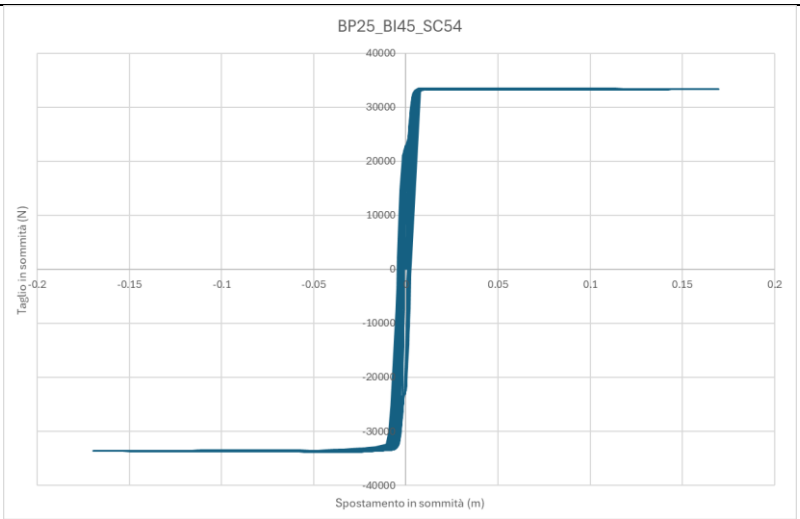
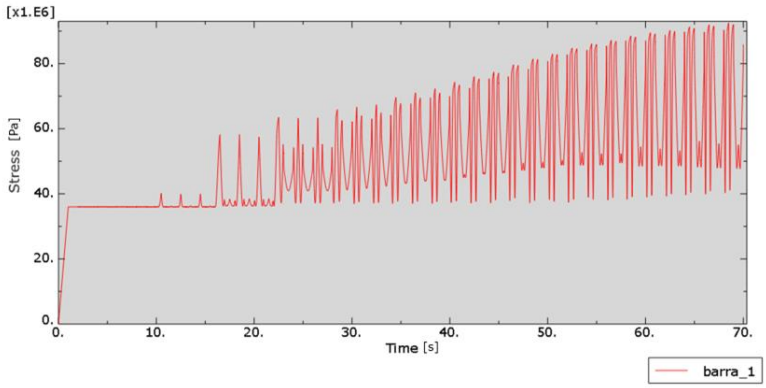
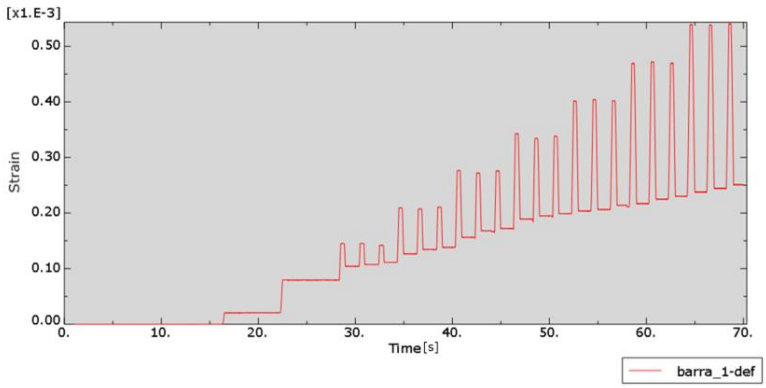
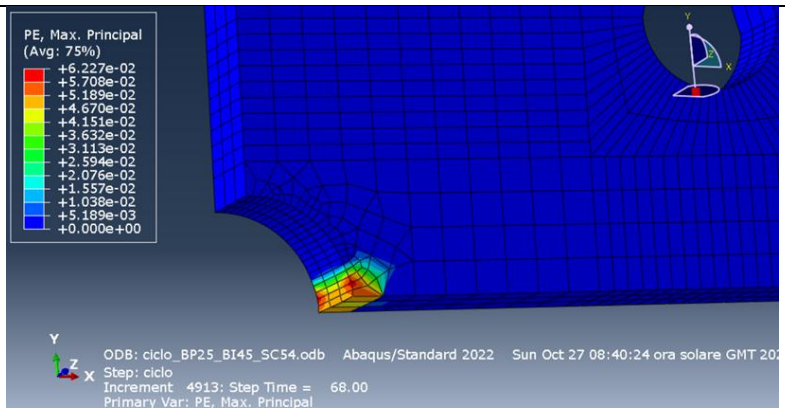
BP25_BI45_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

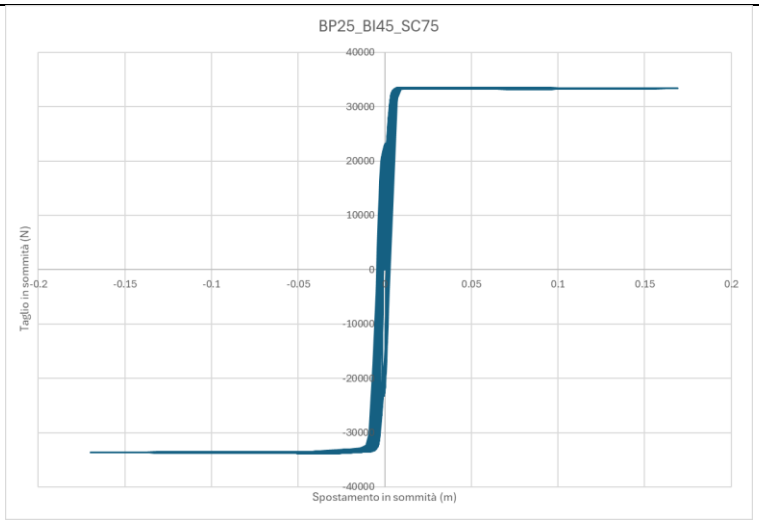
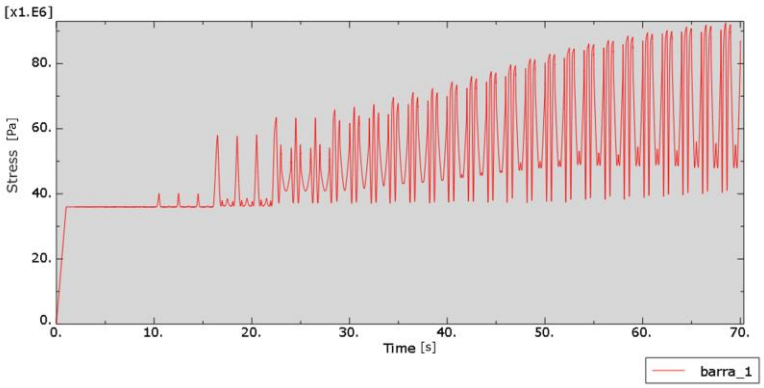
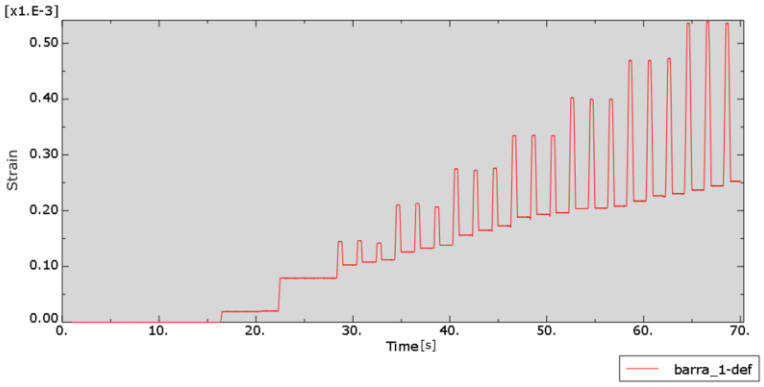
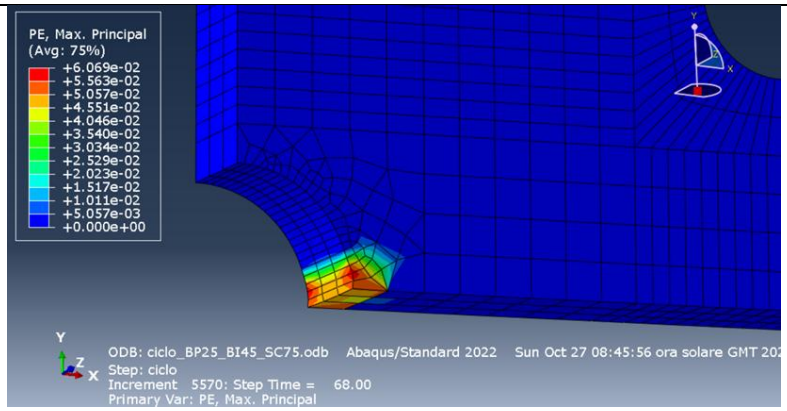
BP25_BI45_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

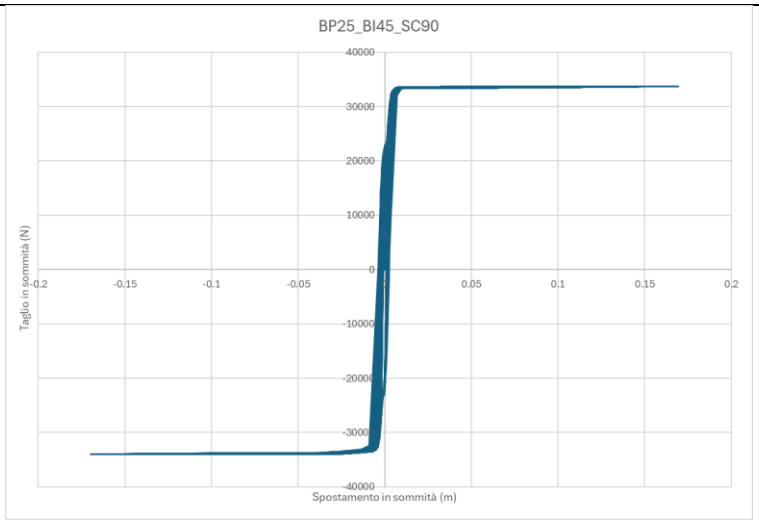
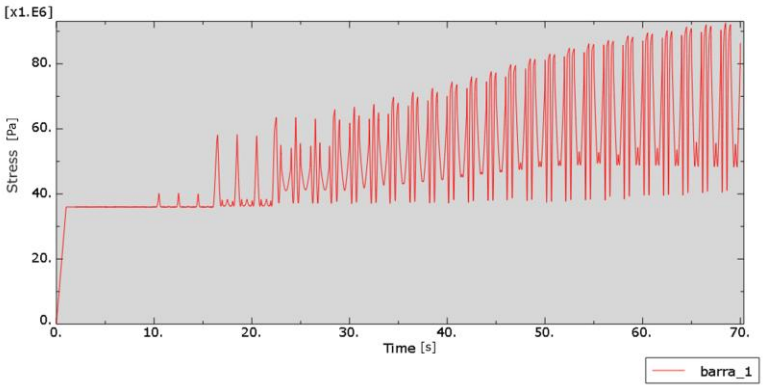
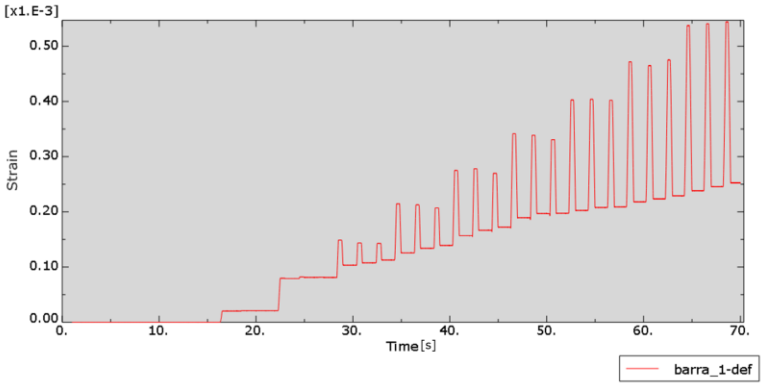
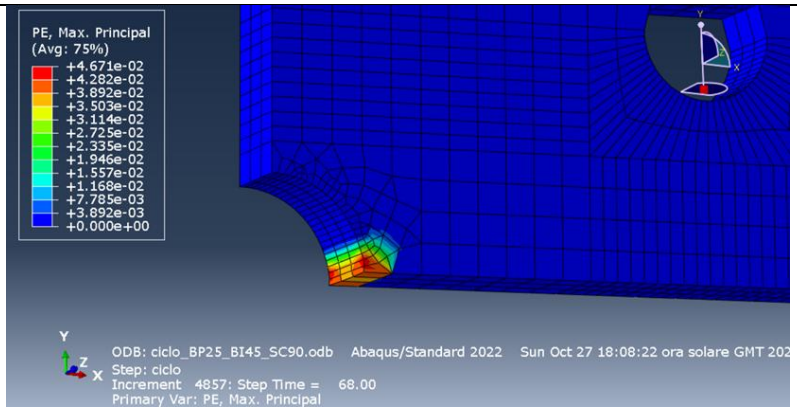
BP25_BI45_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

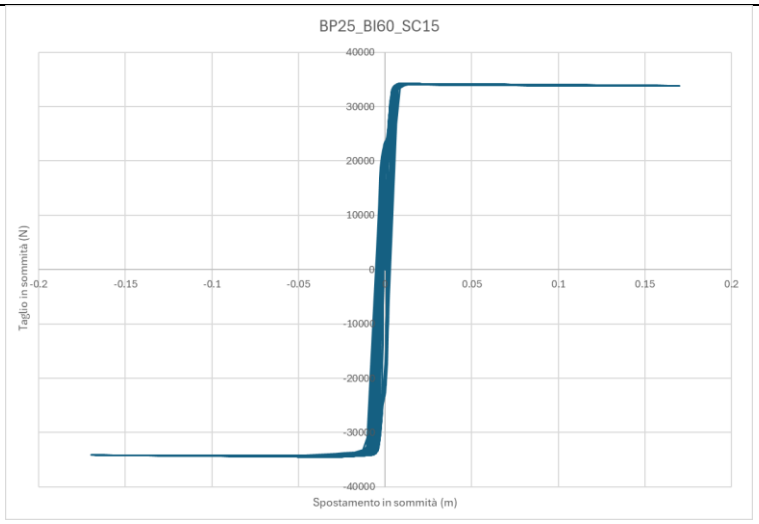
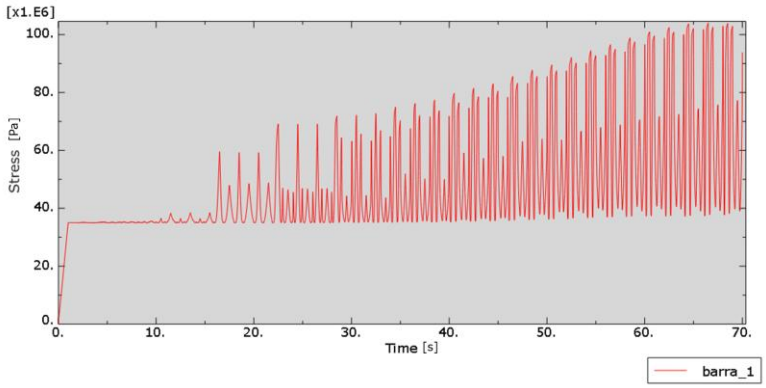
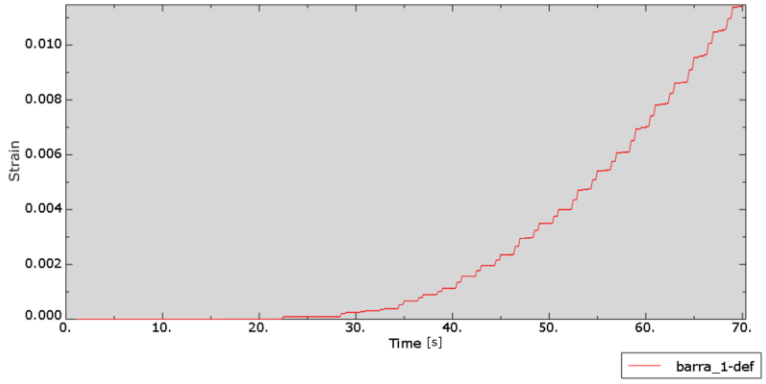
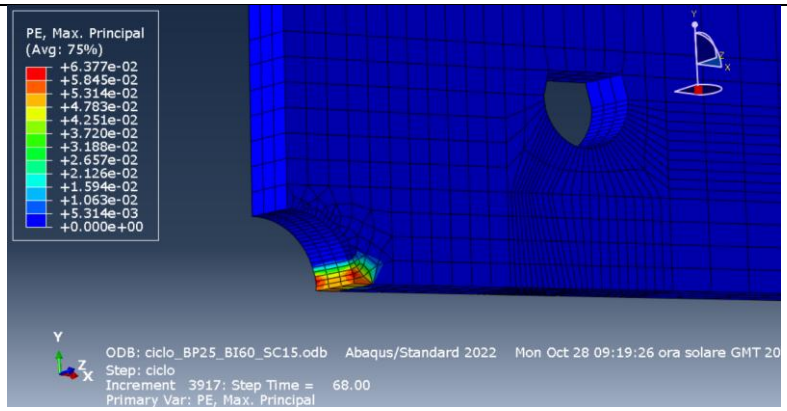
BP25_BI45_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

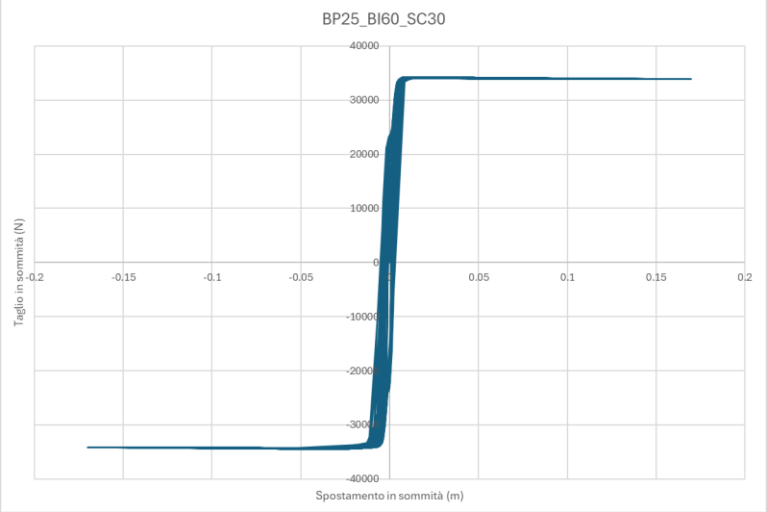
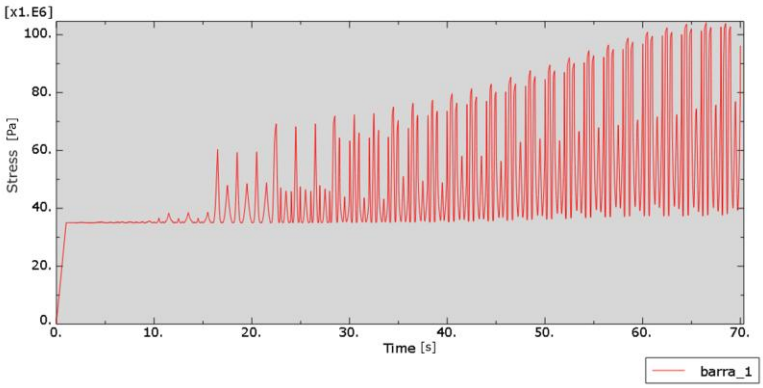
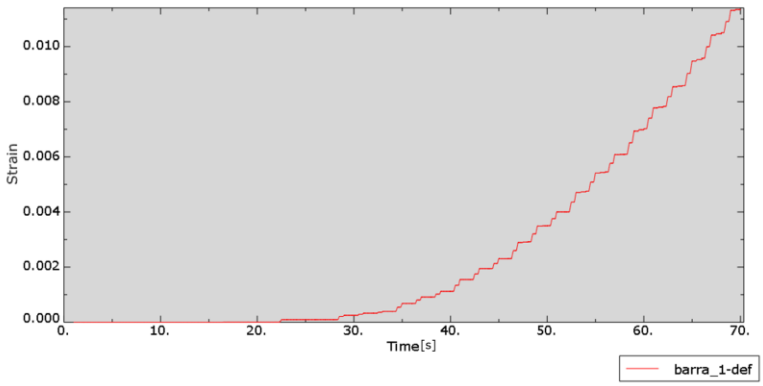
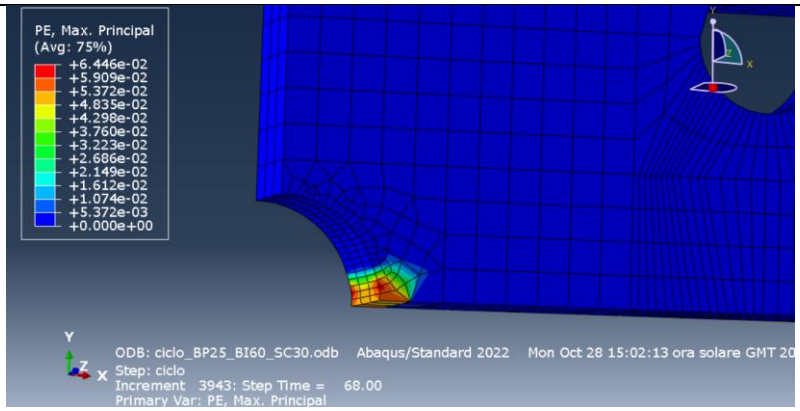
BP25_BI45_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

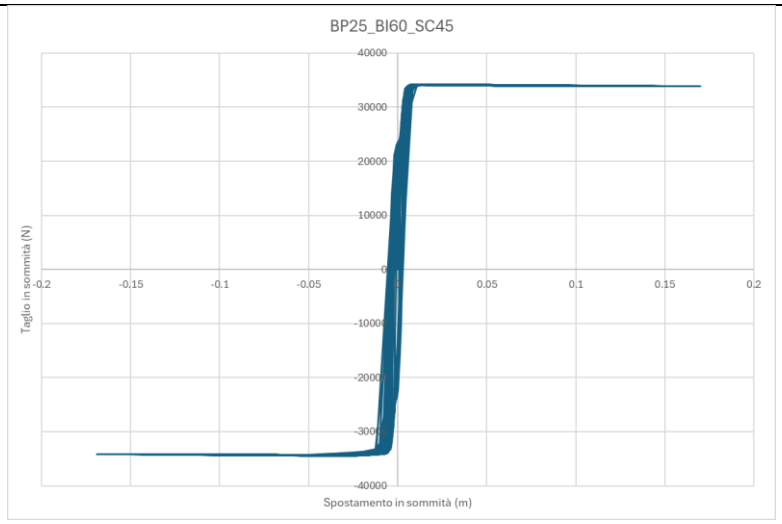
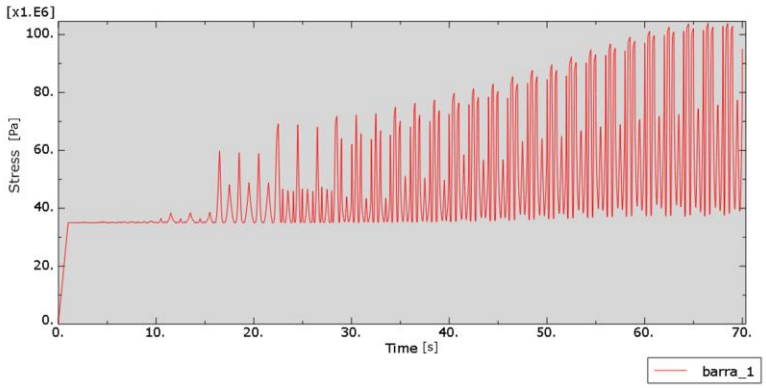
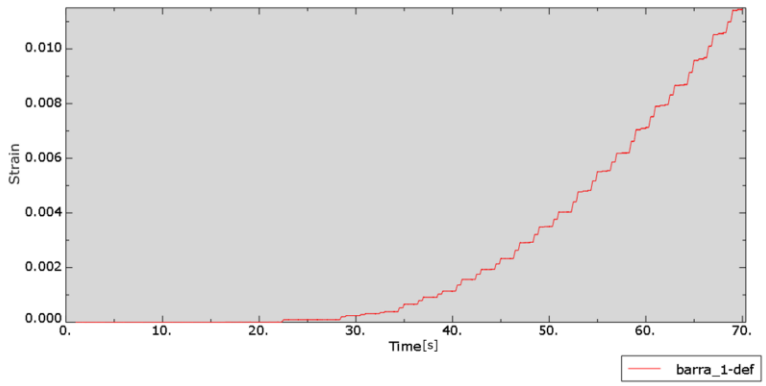
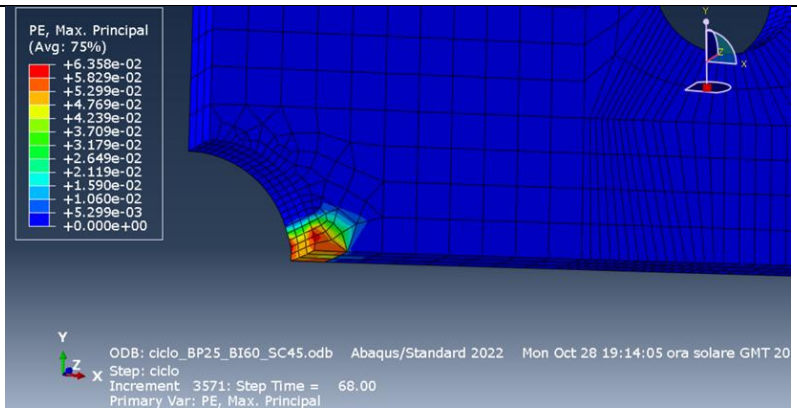
BP25_BI60_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

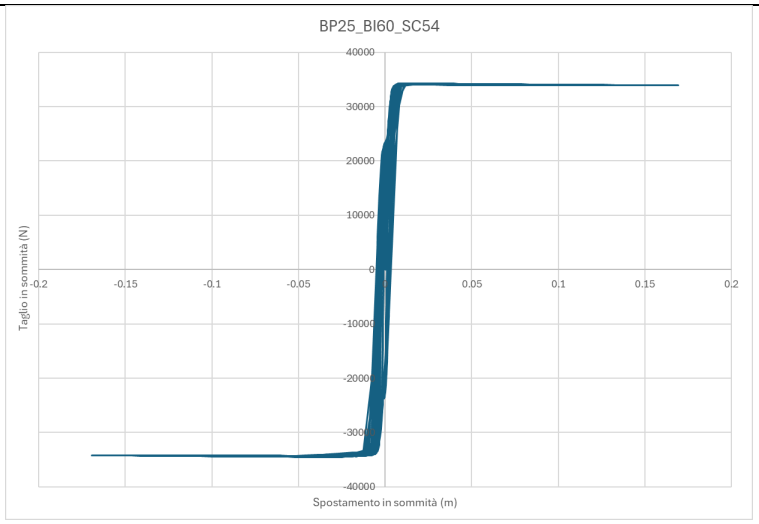
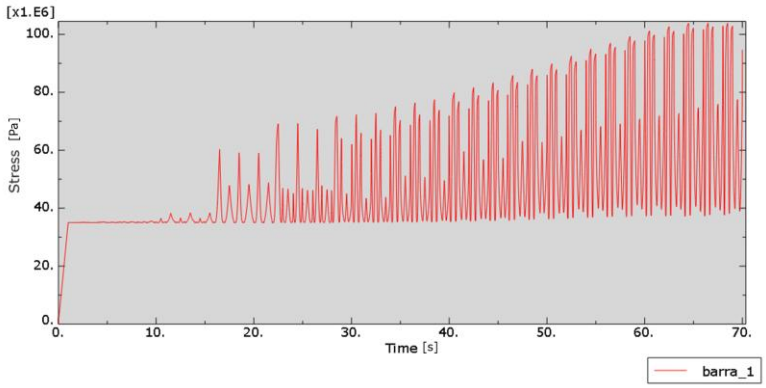
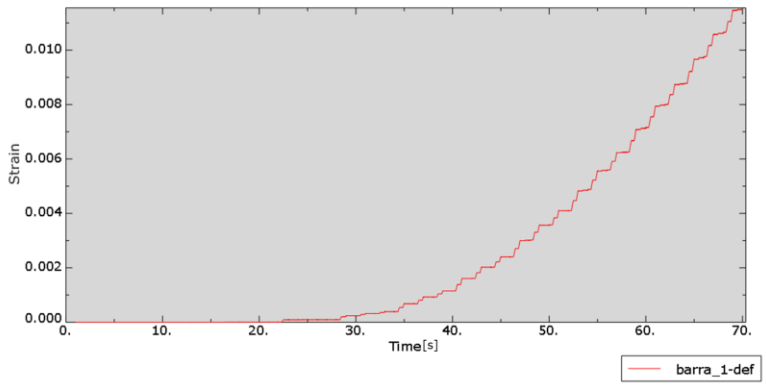
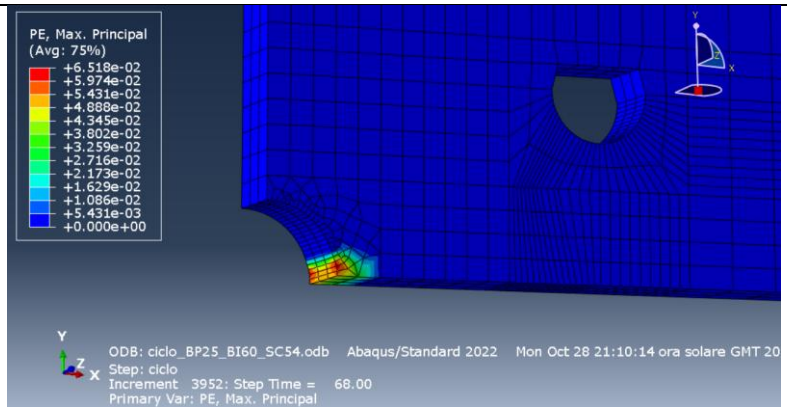
BP25_BI60_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

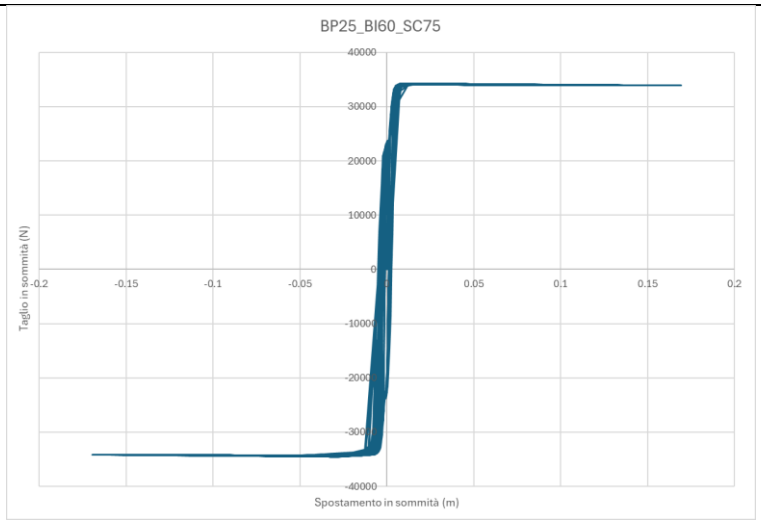
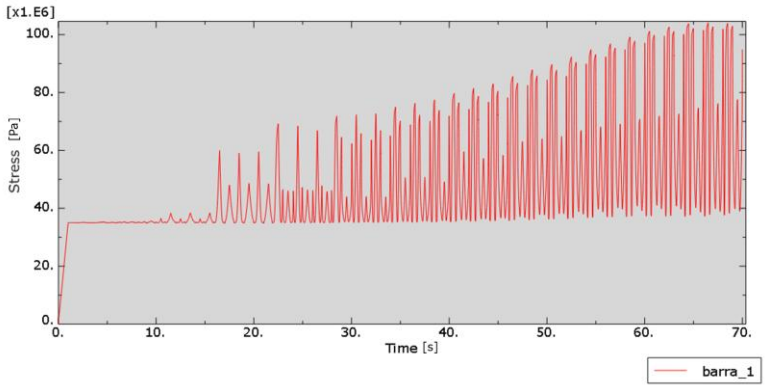
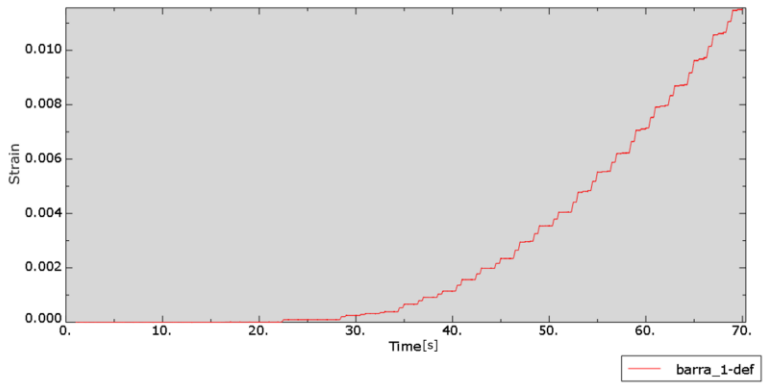
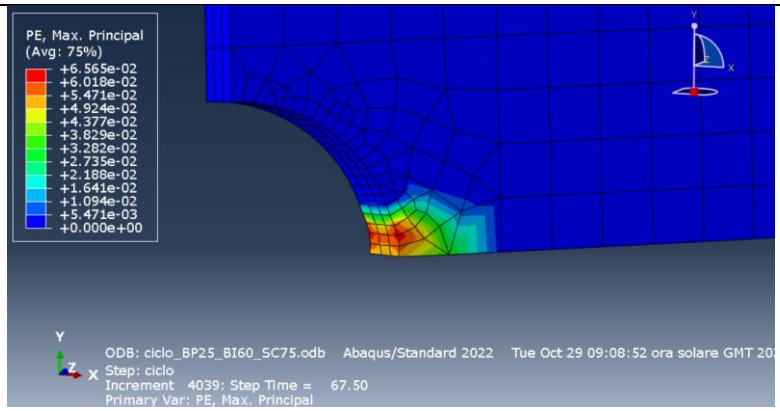
BP25_BI60_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

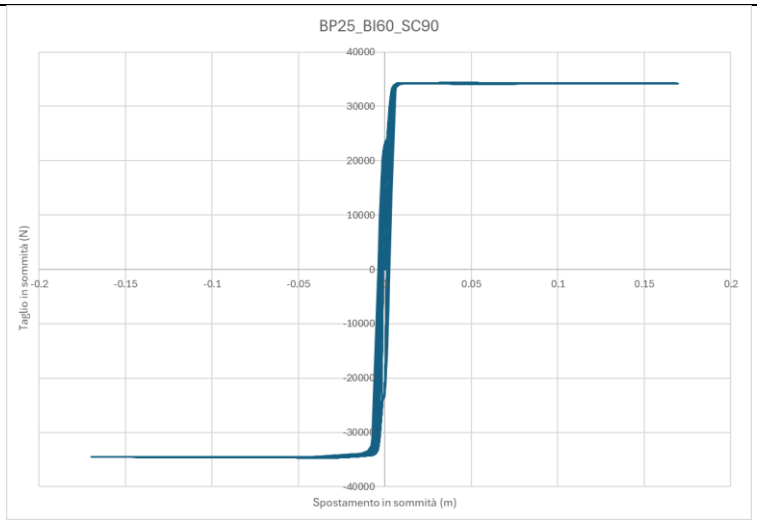
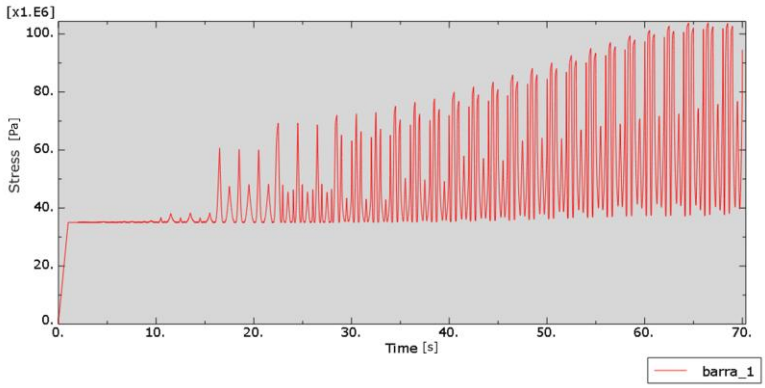
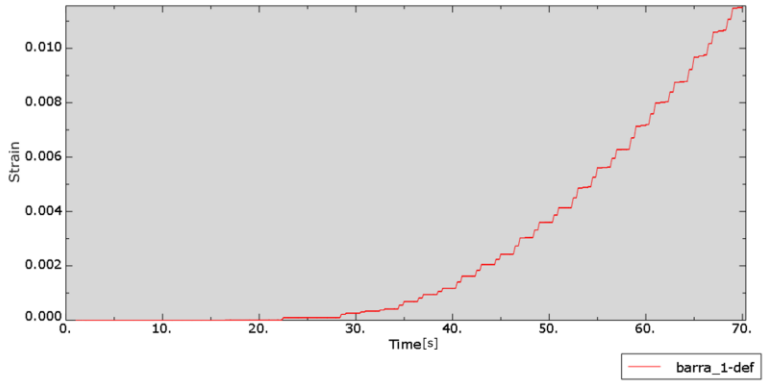
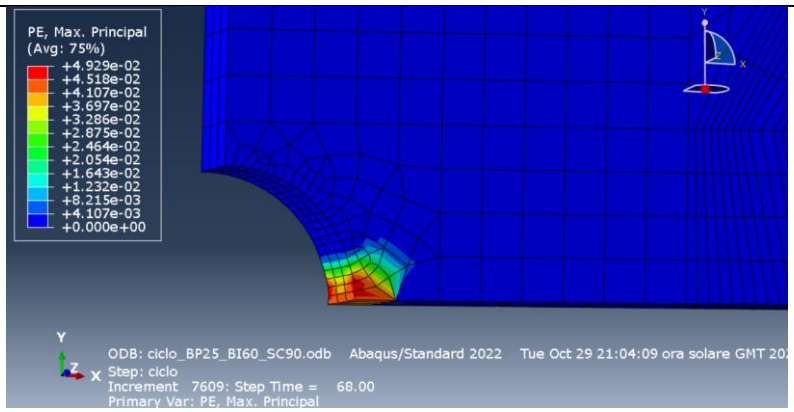
BP25_BI60_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

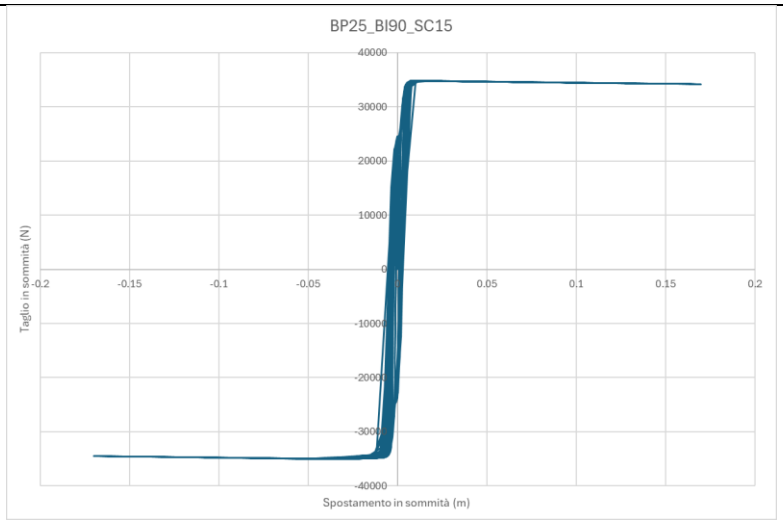
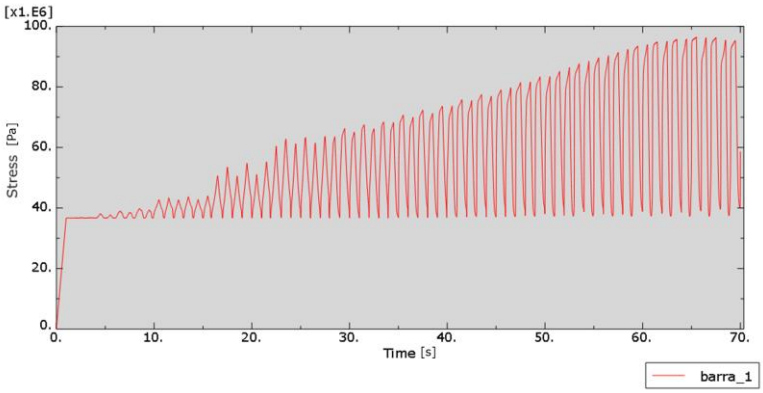
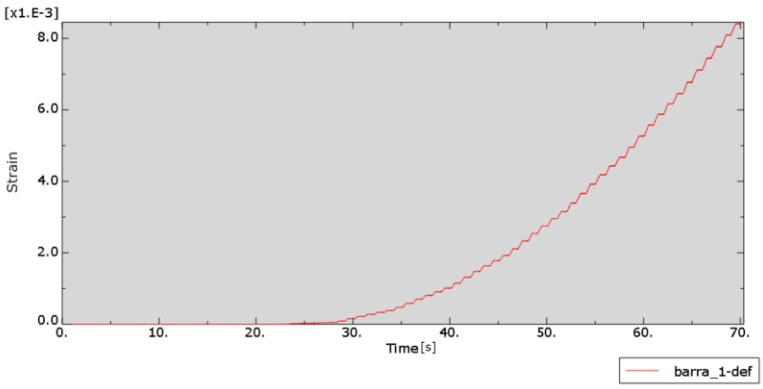
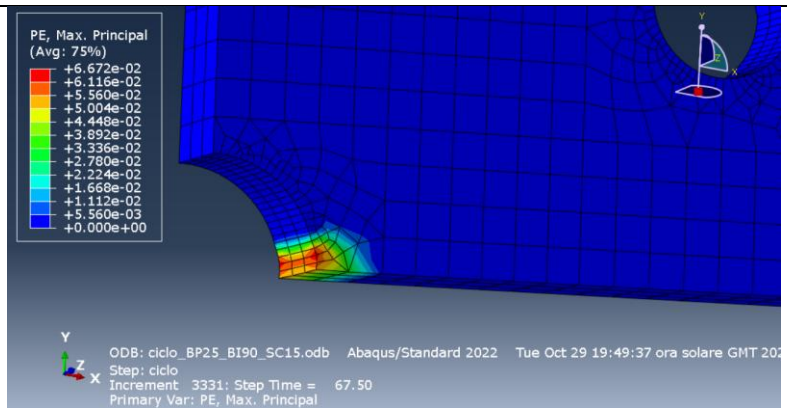
BP25_BI60_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

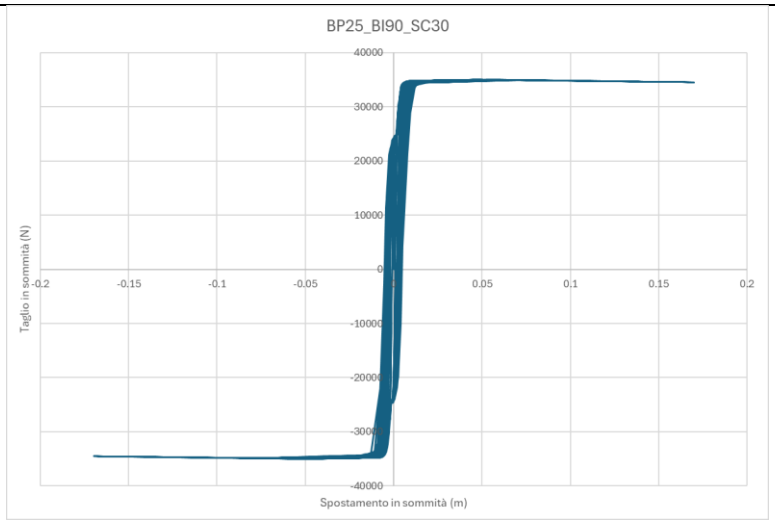
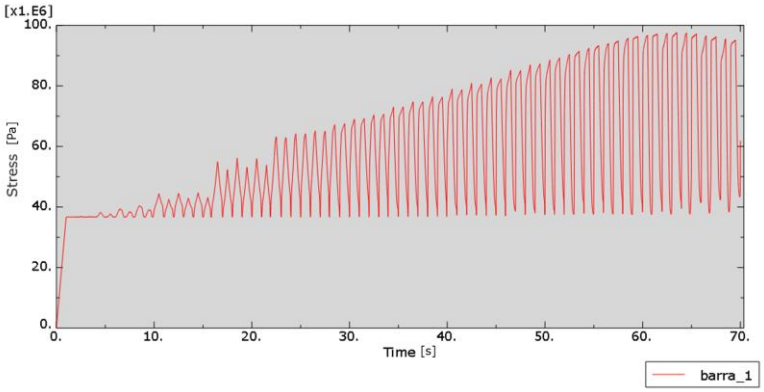
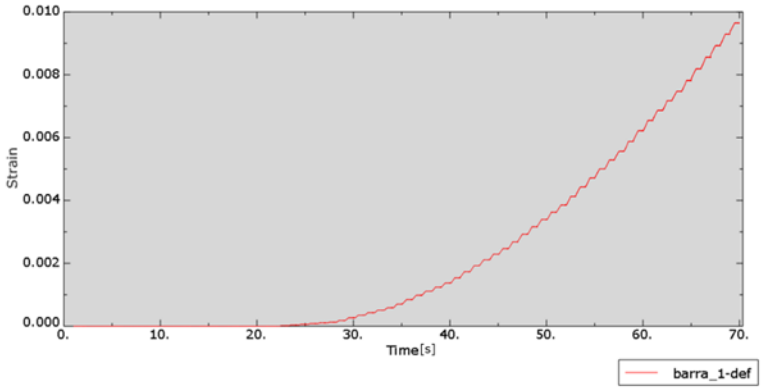
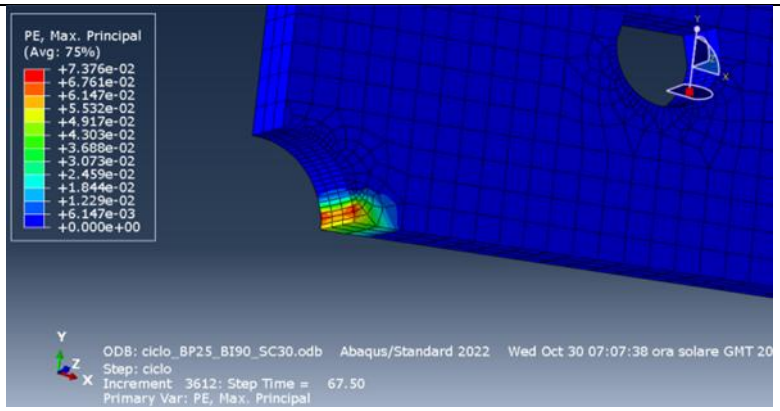
BP25_BI60_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

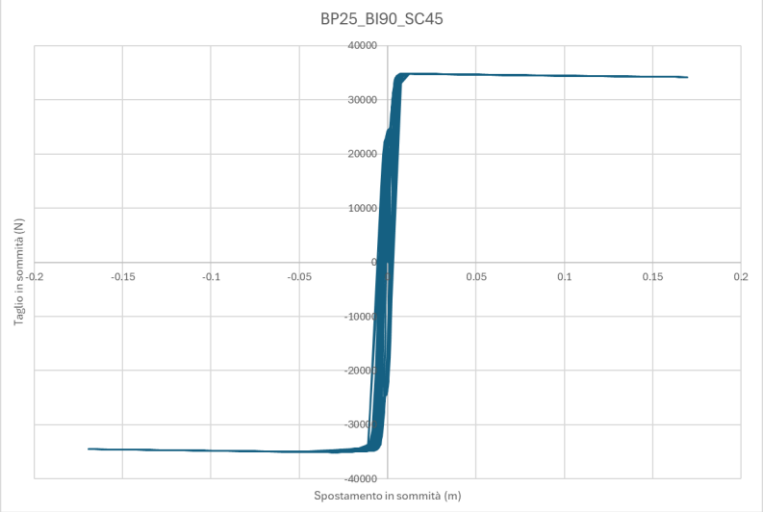
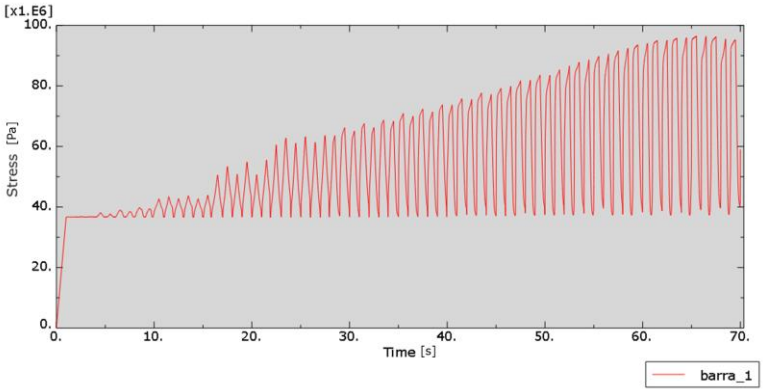
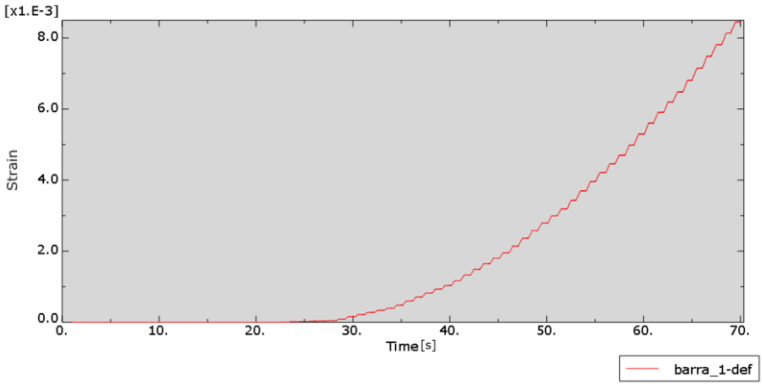
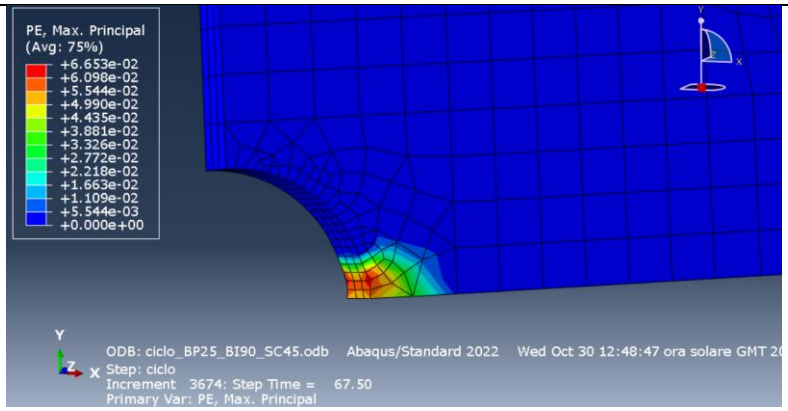
BP25_BI90_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

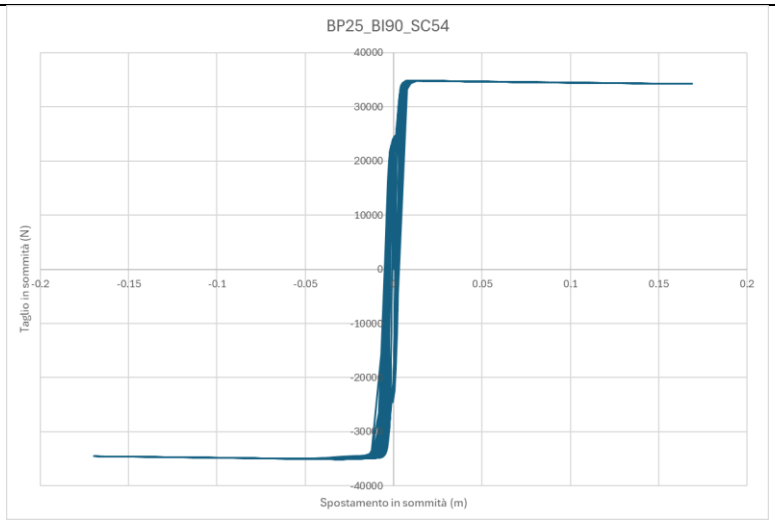
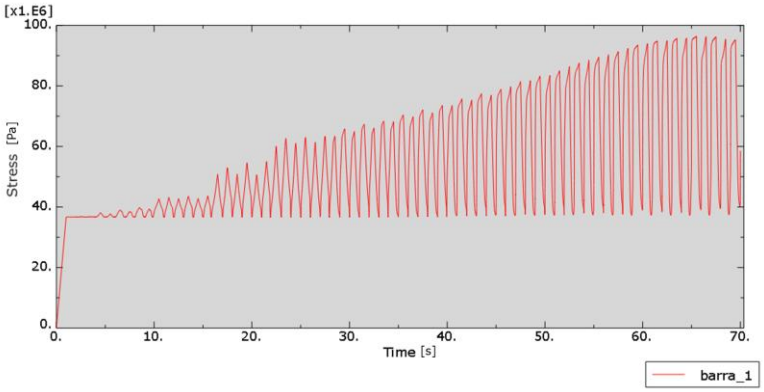
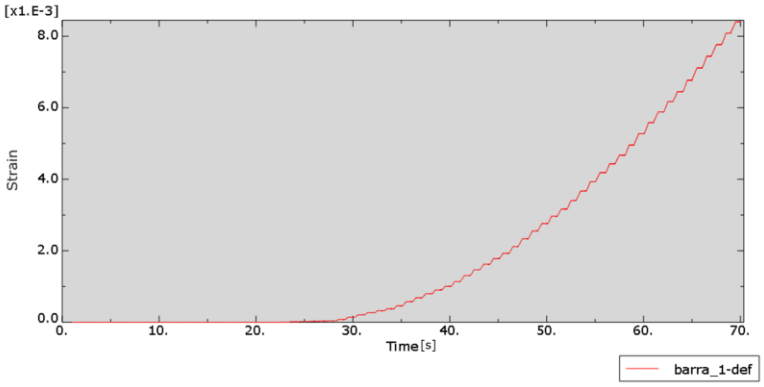
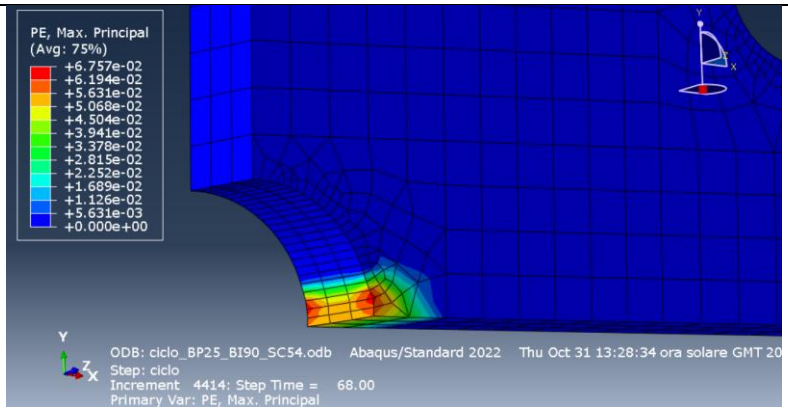
BP25_BI90_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

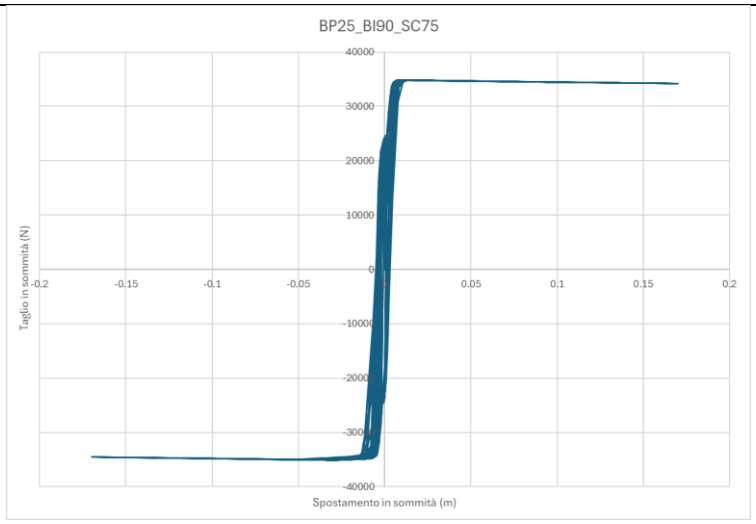
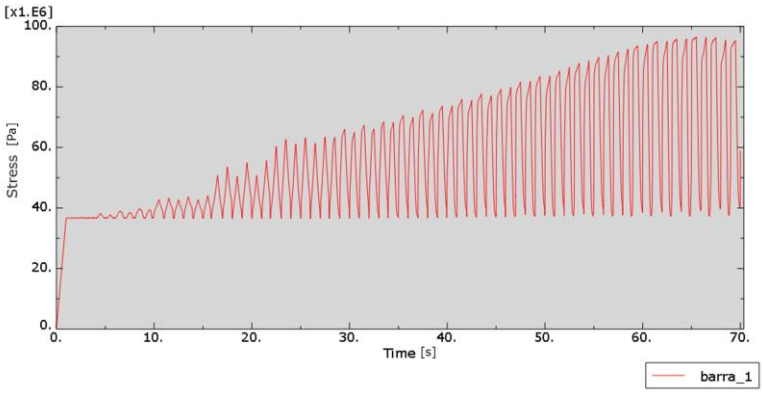
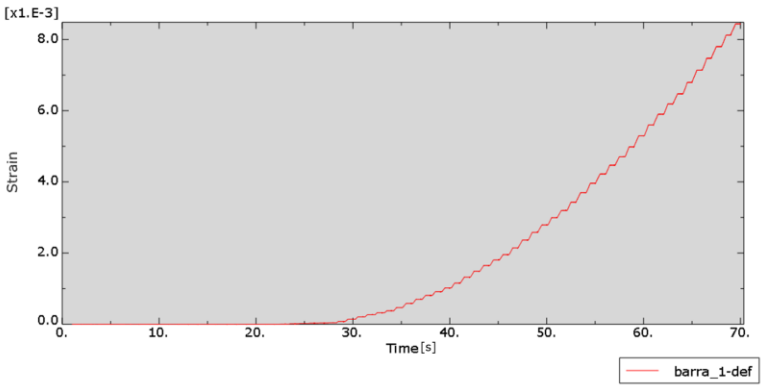
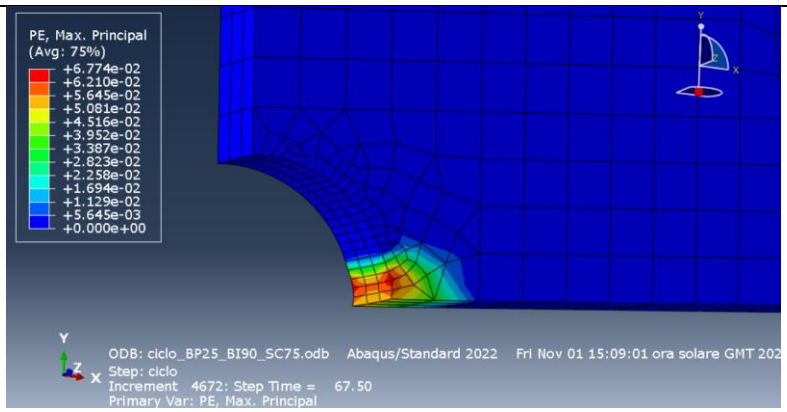
BP25_BI90_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

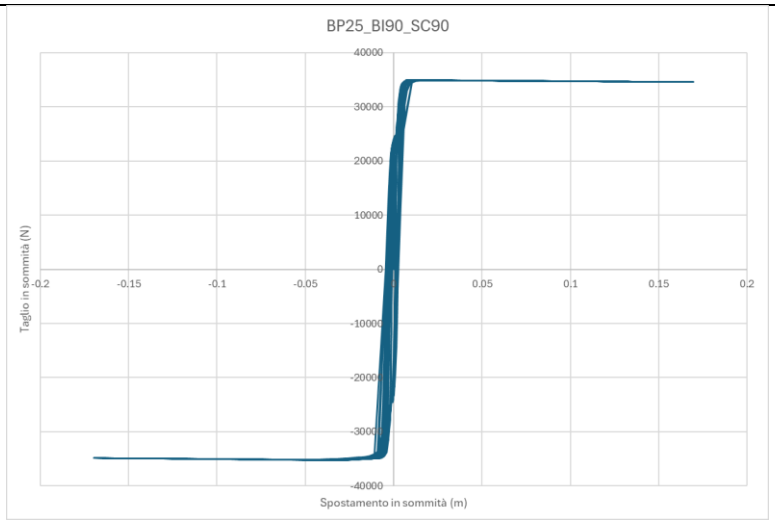
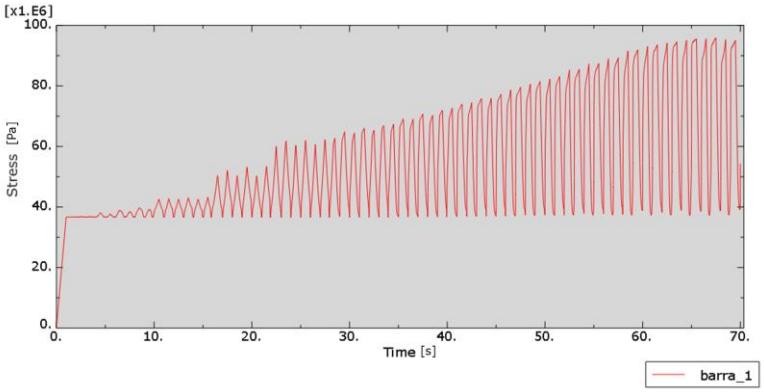
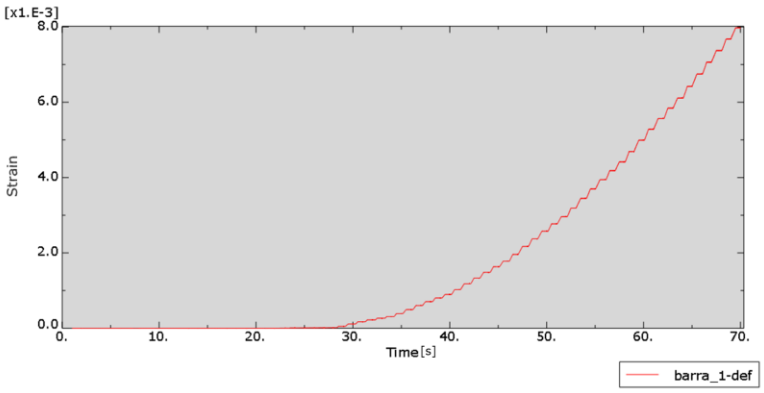
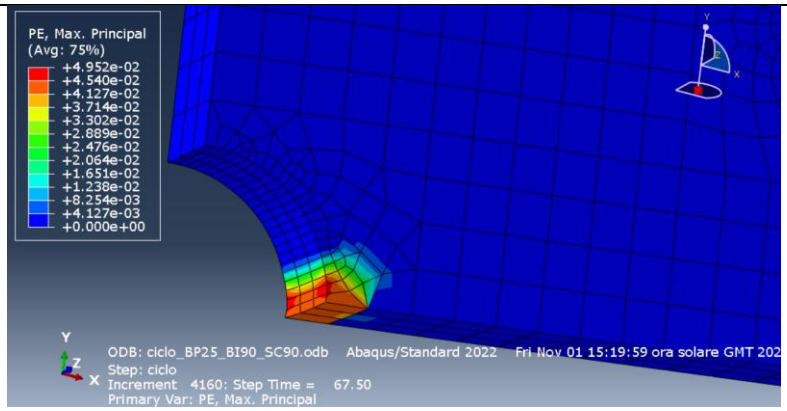
BP25_BI90_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

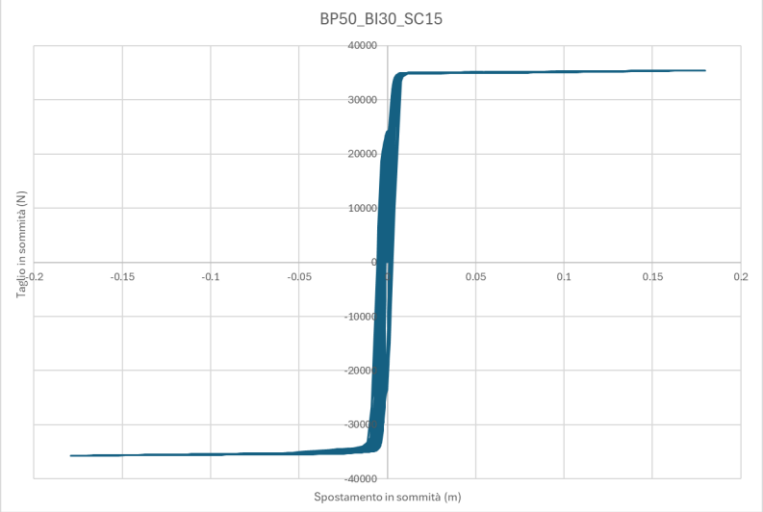
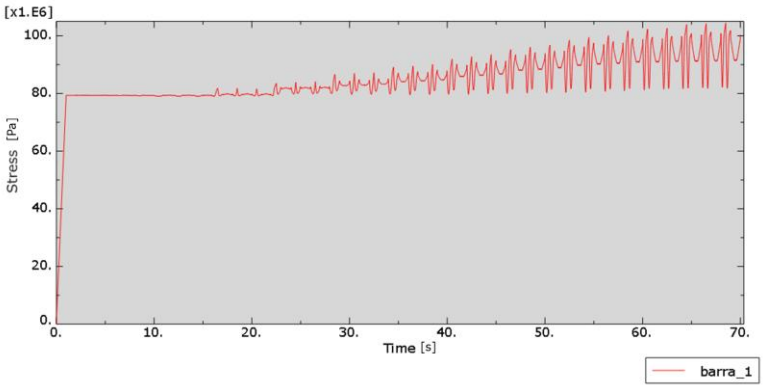
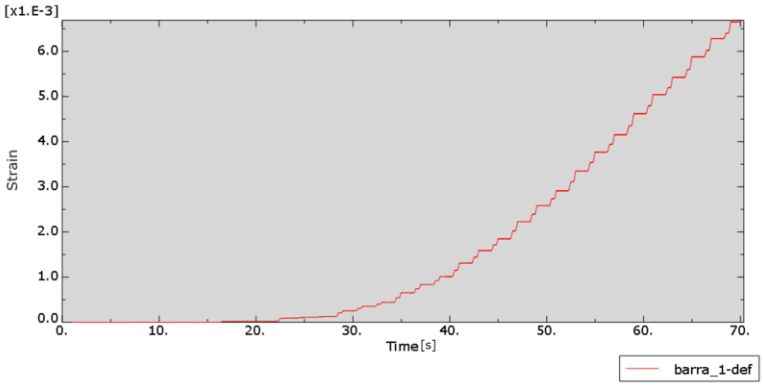
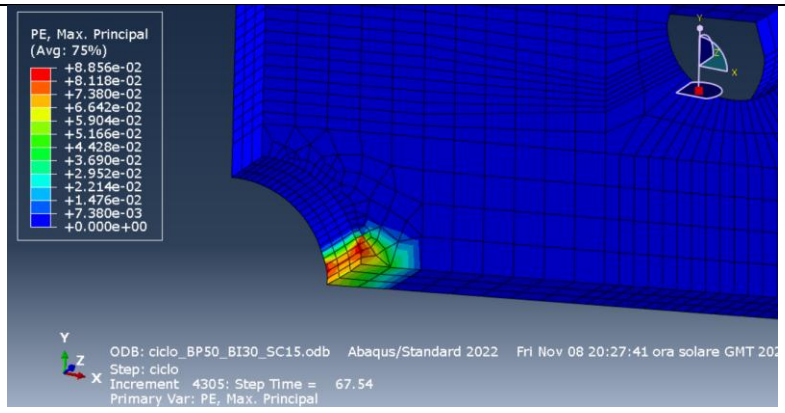
BP25_BI90_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

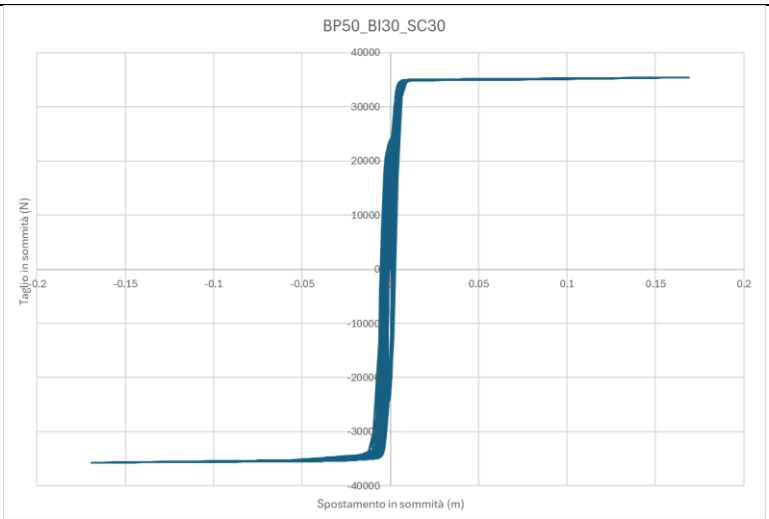
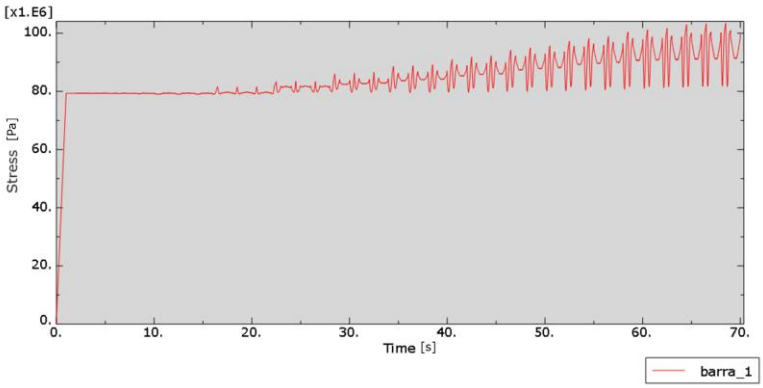
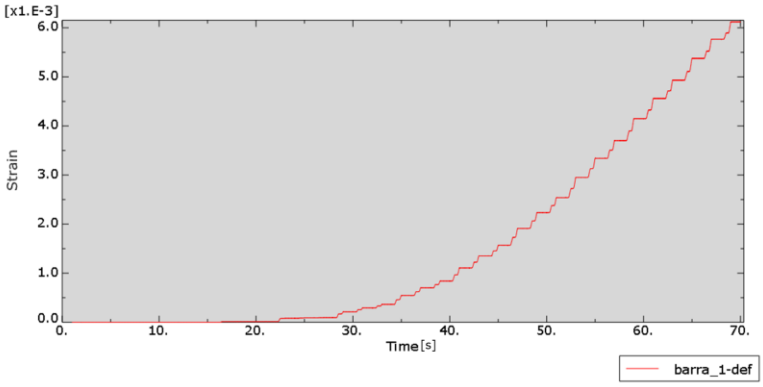
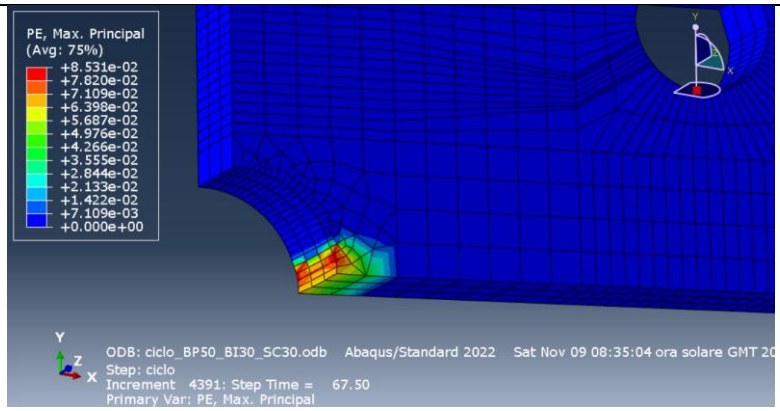
BP25_BI90_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

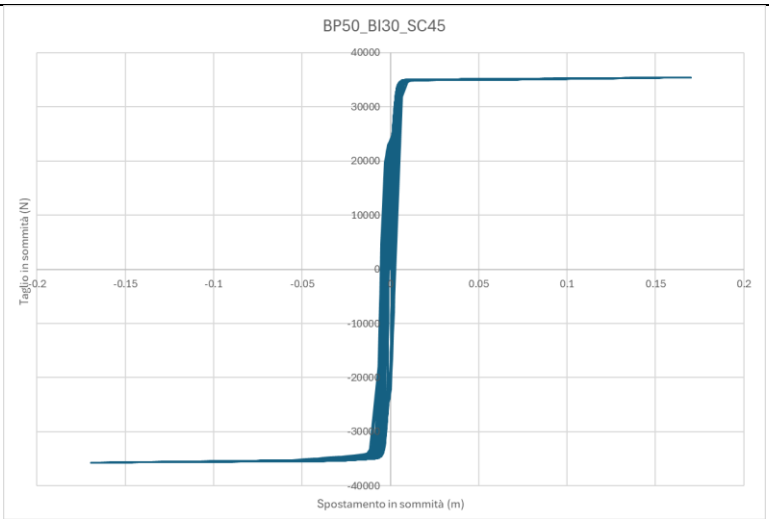
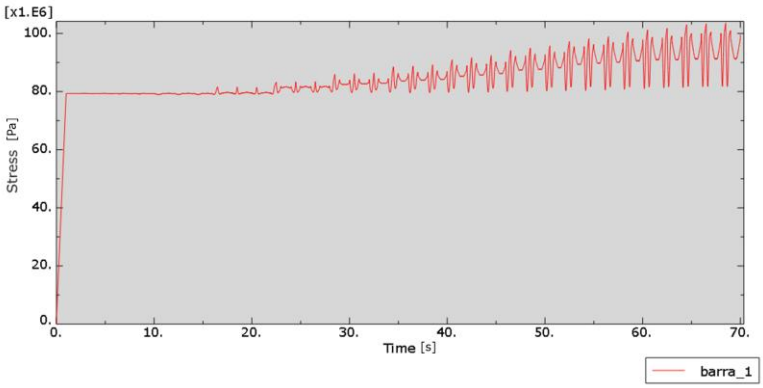
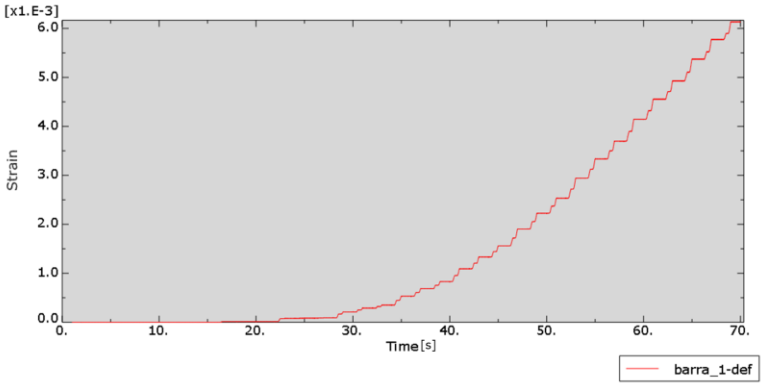
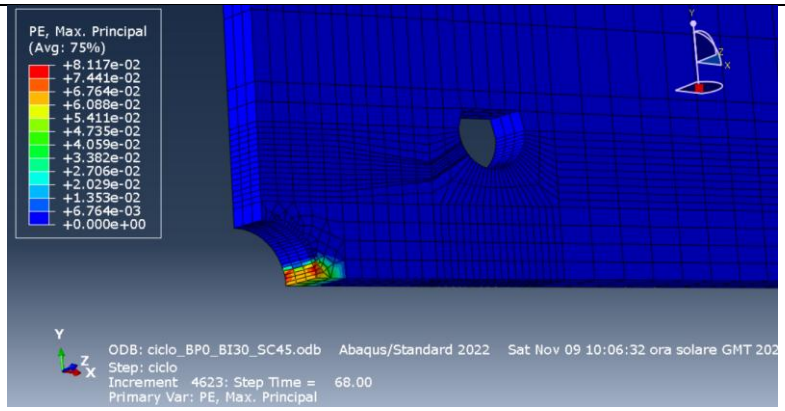
BP50_BI30_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

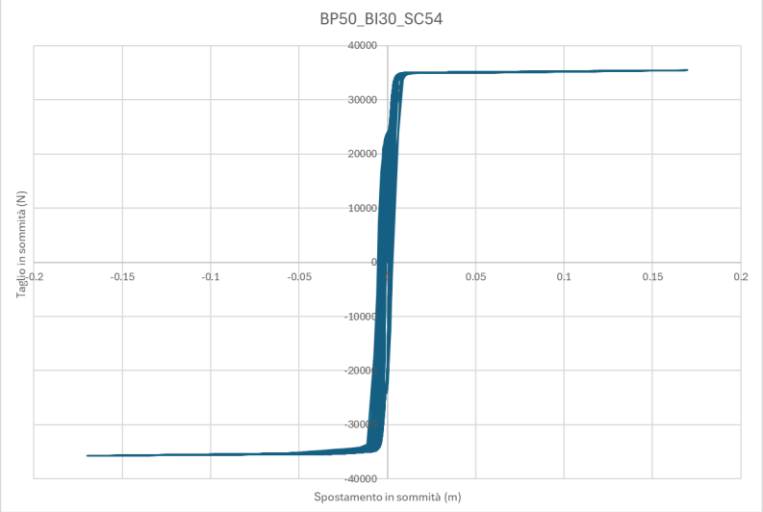
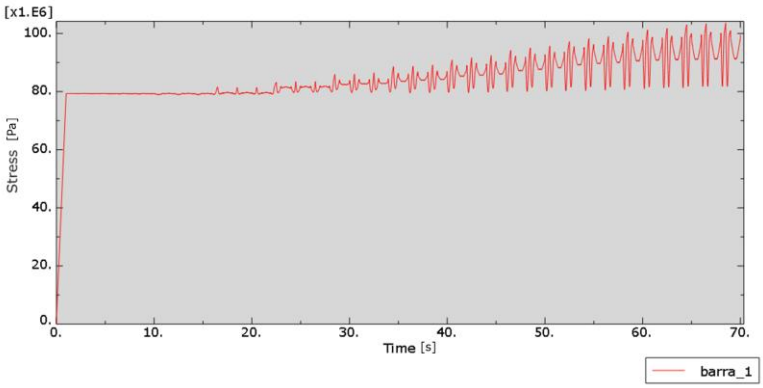
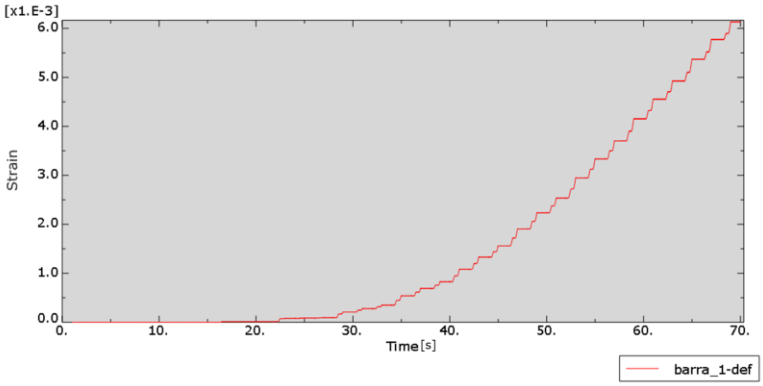
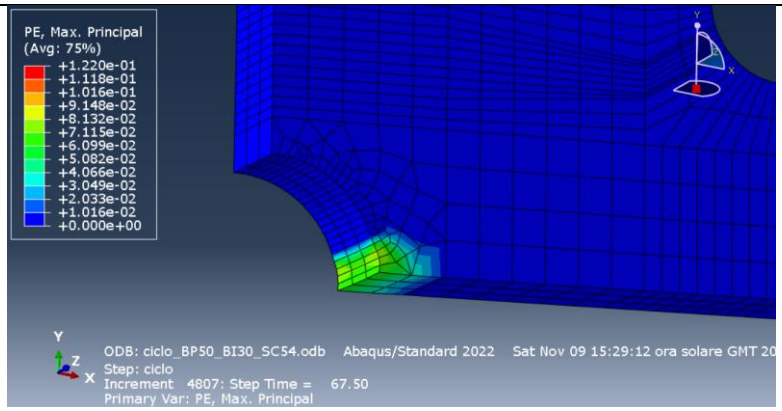
BP50_BI30_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

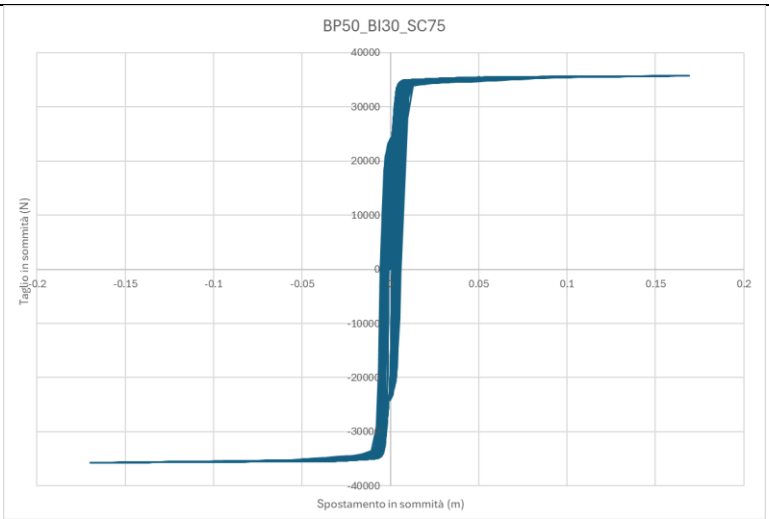
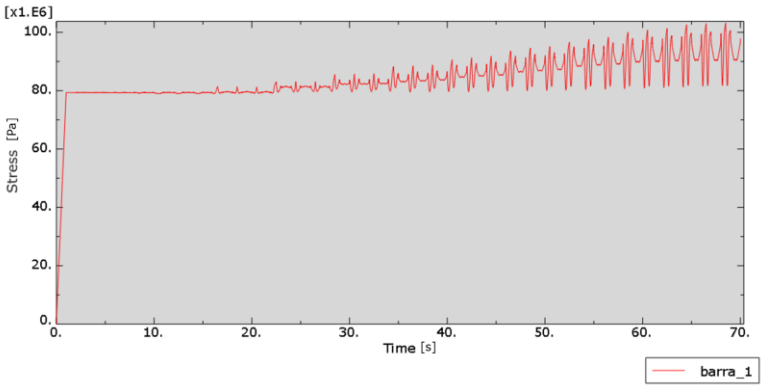
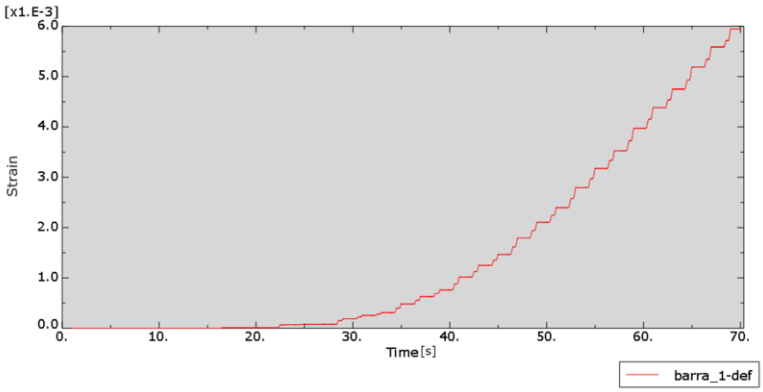
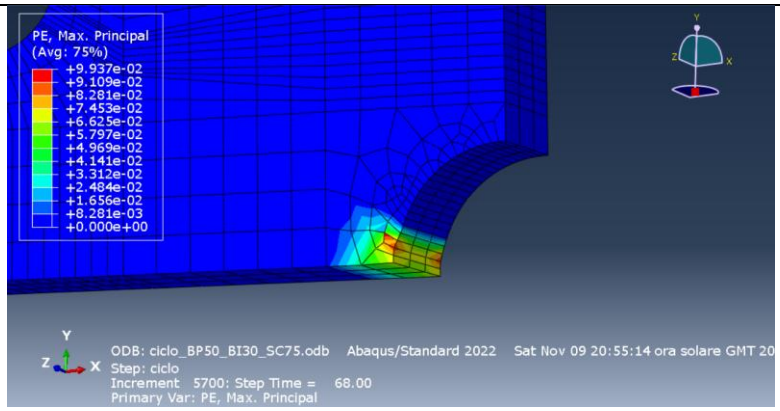
BP50_BI30_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

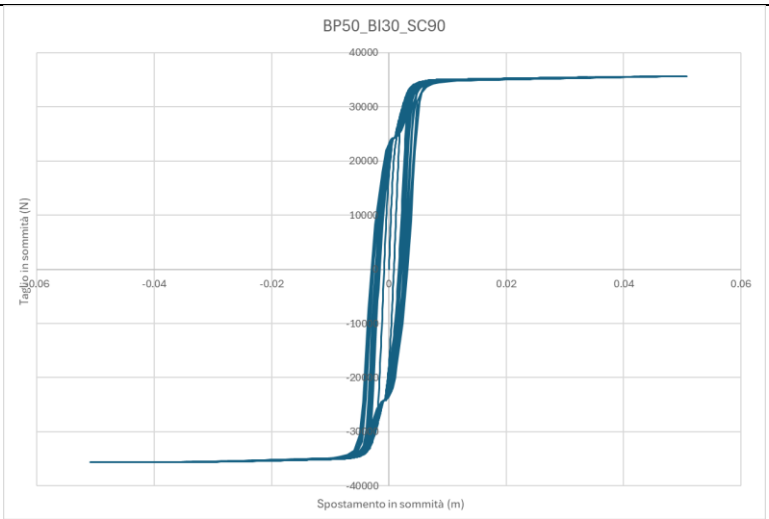
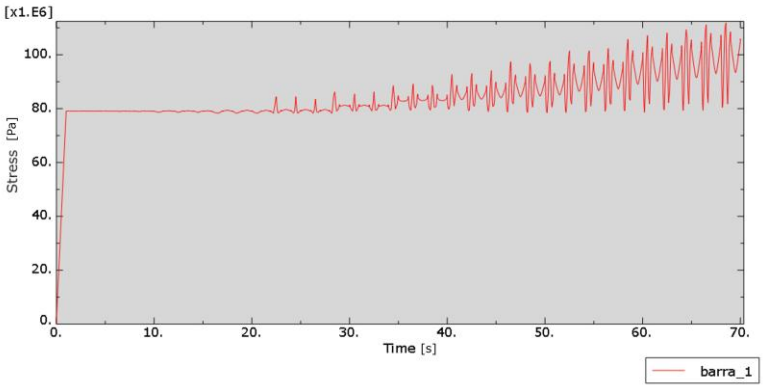
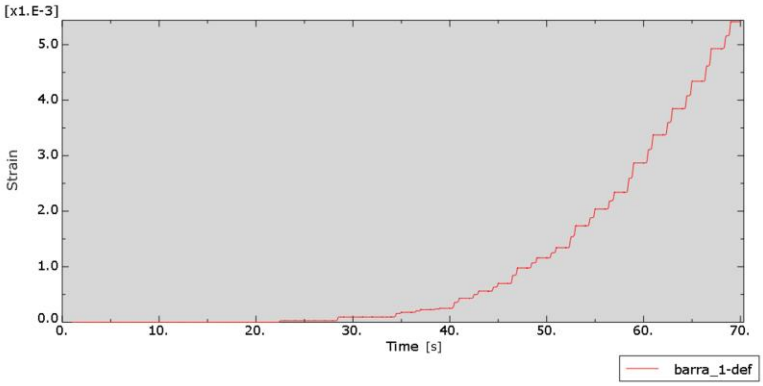
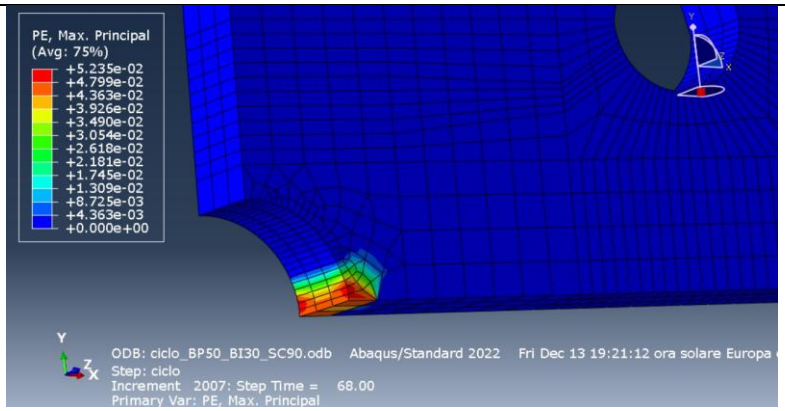
BP50_BI30_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

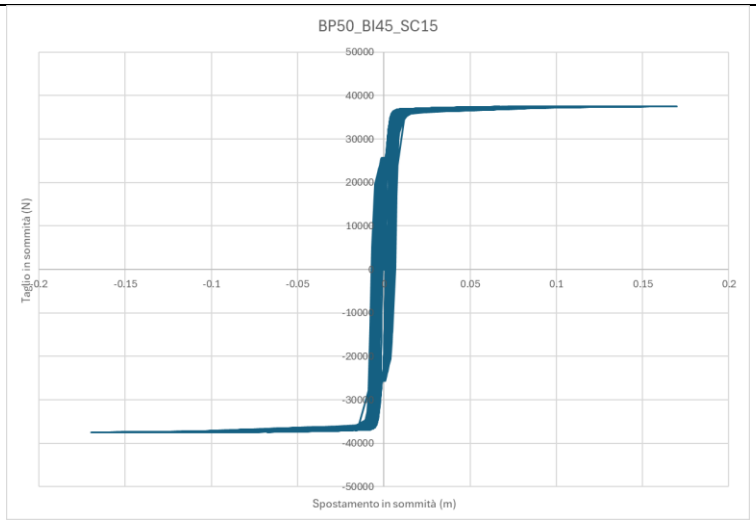
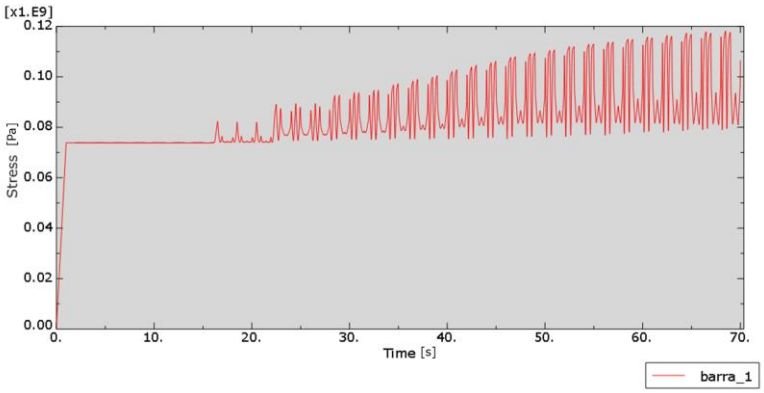
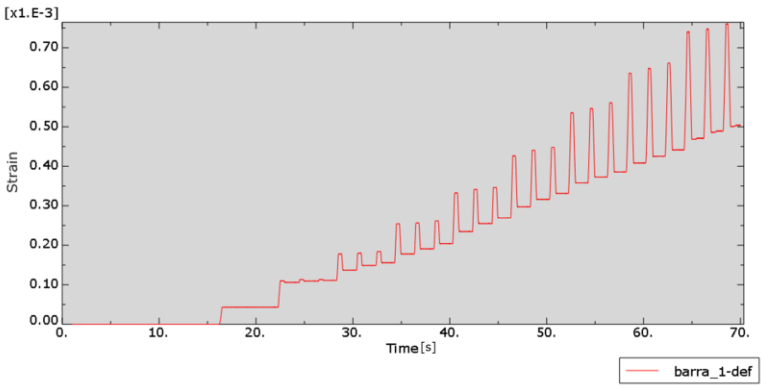
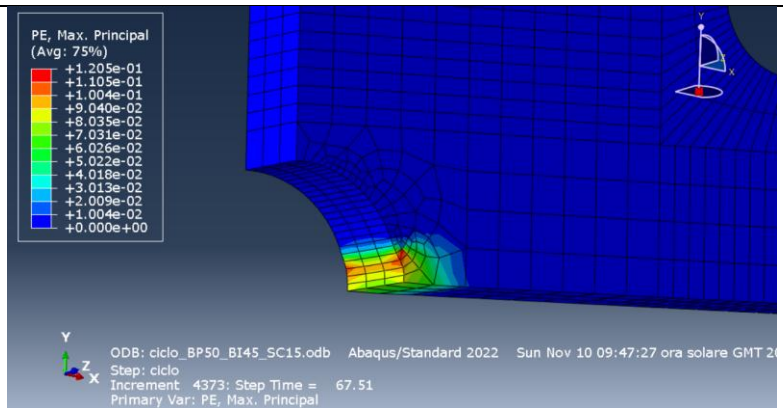
BP50_BI30_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

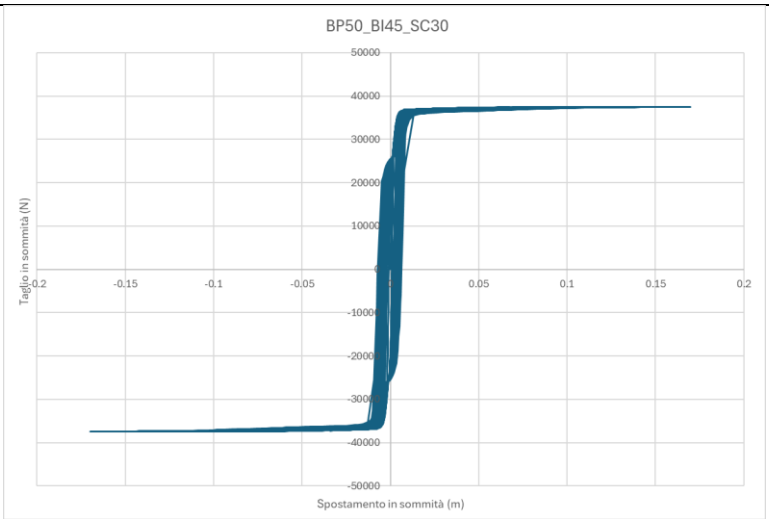
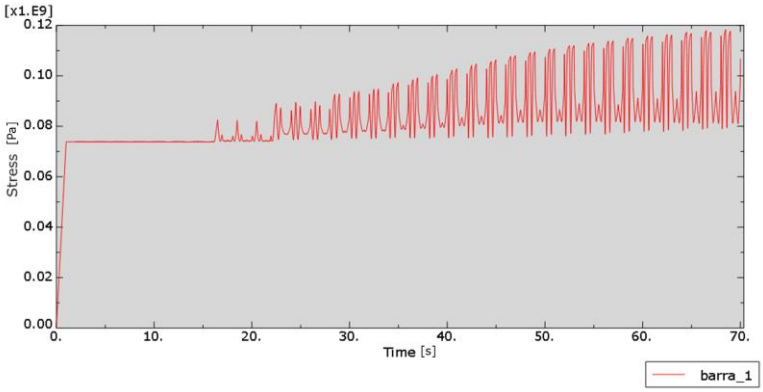
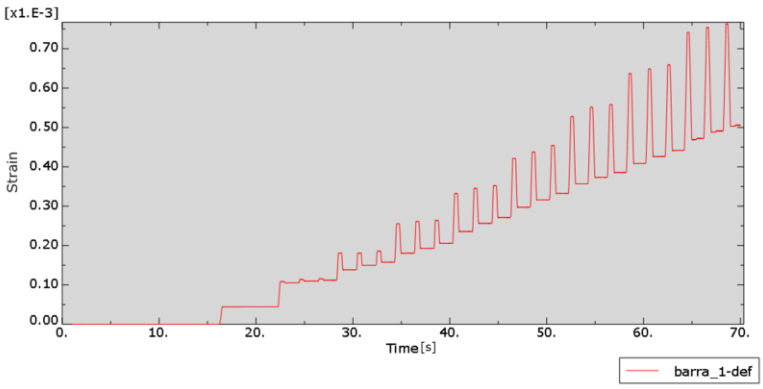
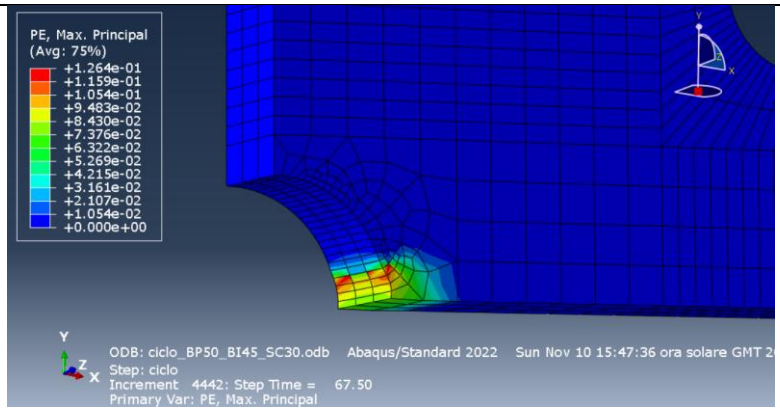
BP50_BI30_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

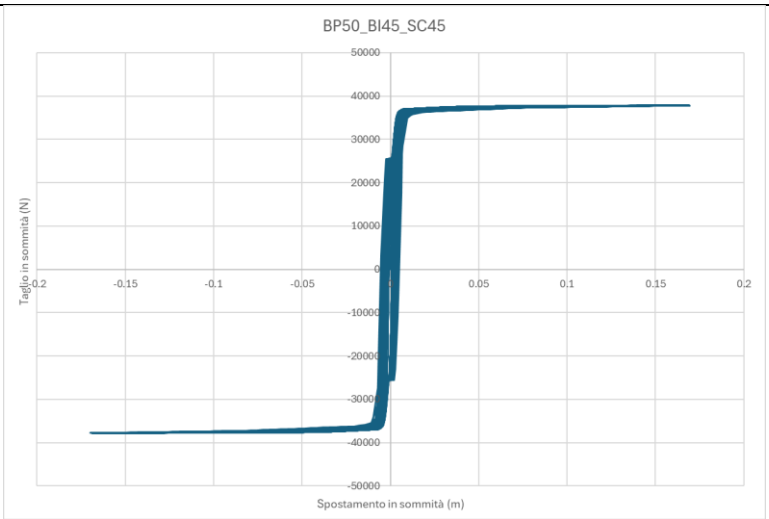
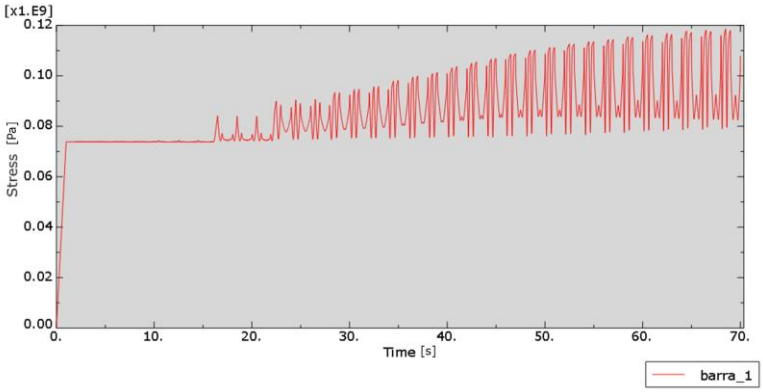
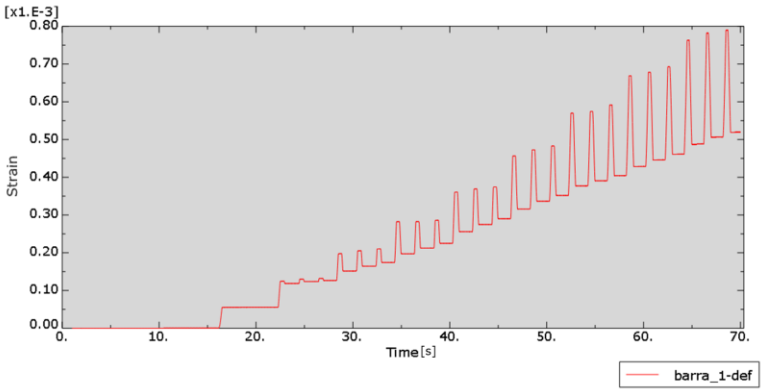
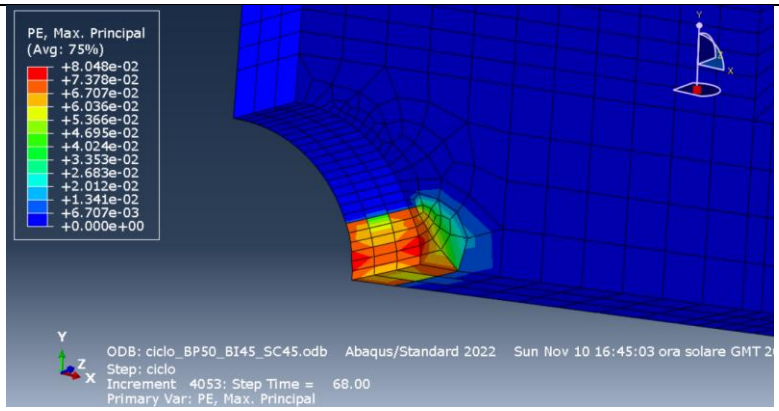
BP50_BI45_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP50_BI45_SC30

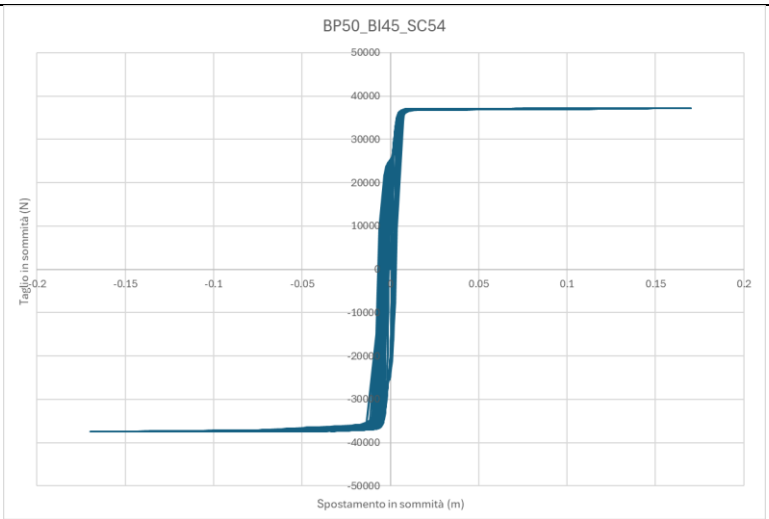
Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP50_BI45_SC45

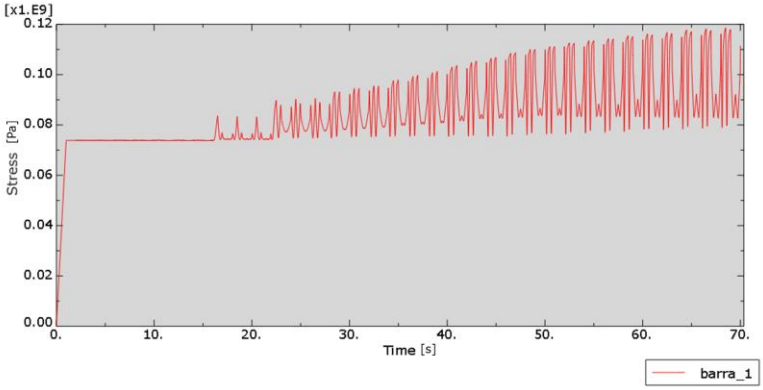
Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP50_BI45_SC54

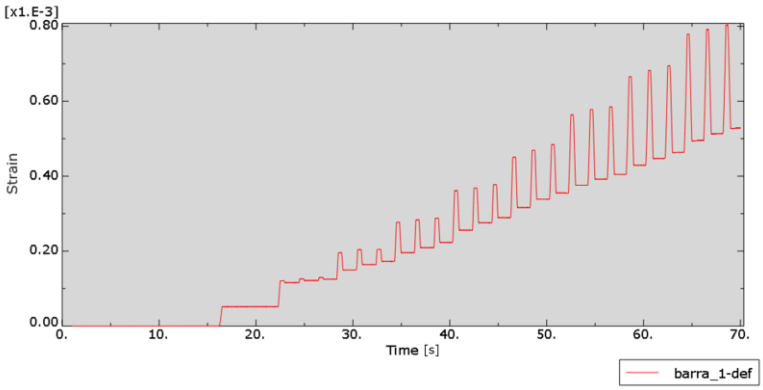
Analisi ciclica forza-spostamento



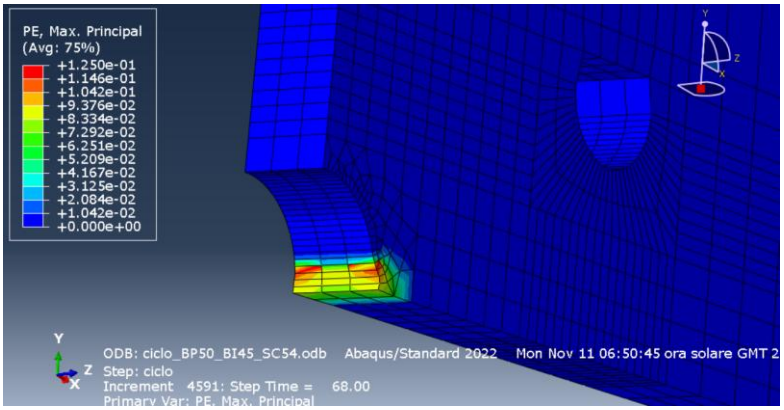
Andamento medio tensioni barra



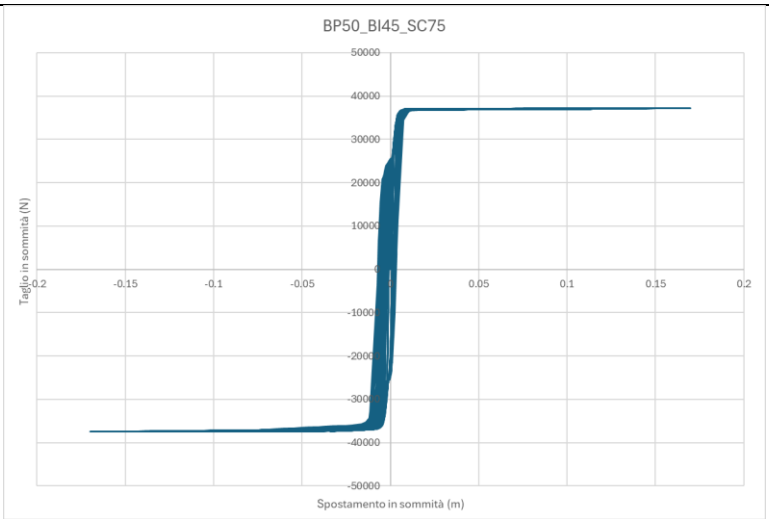
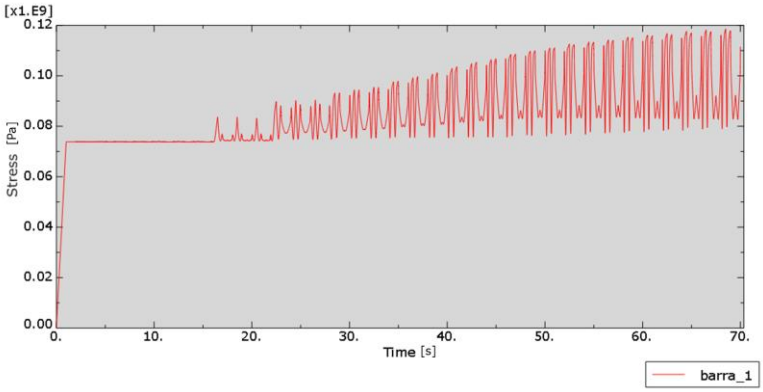
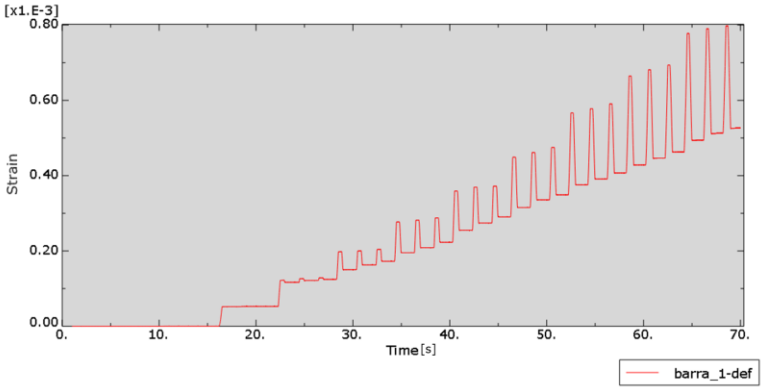
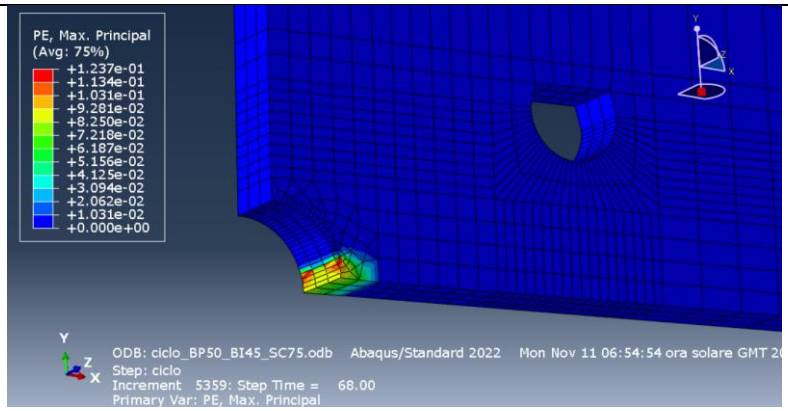
Andamento medio deformazioni barra



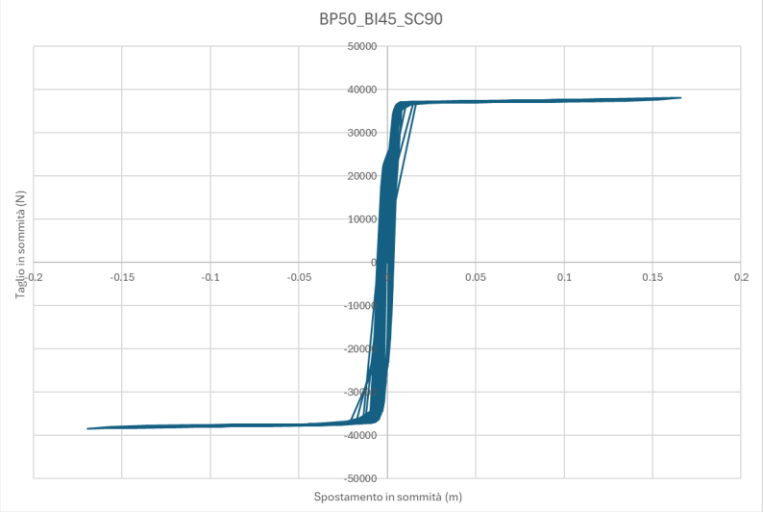
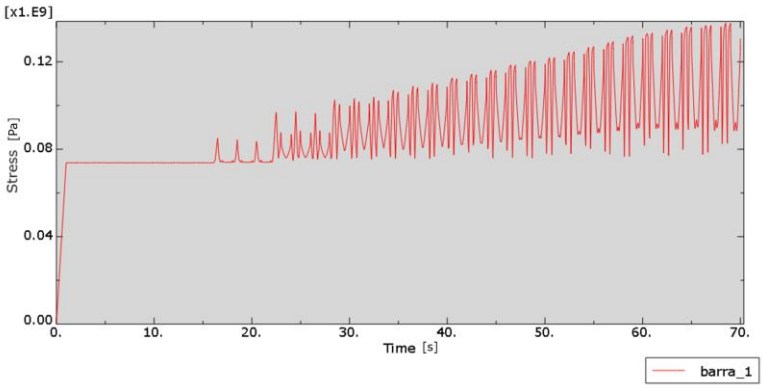
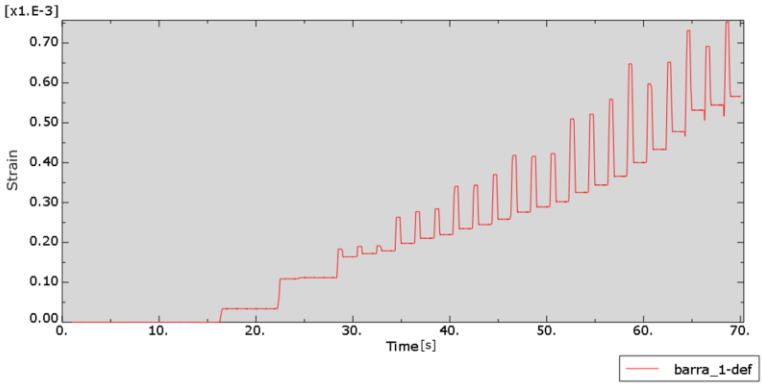
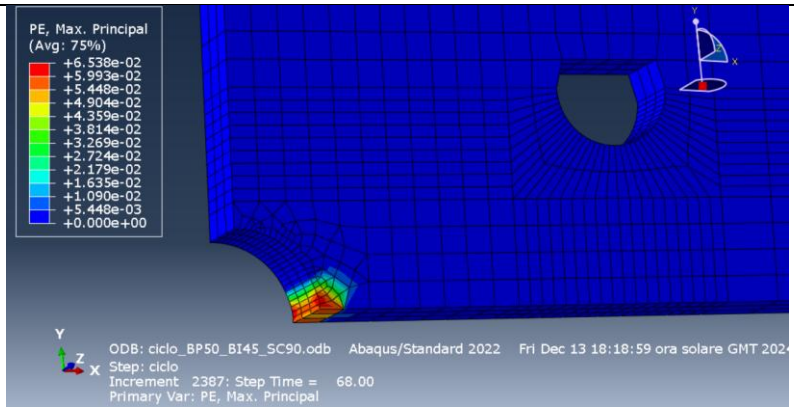
Danneggiamento pannello a fine analisi



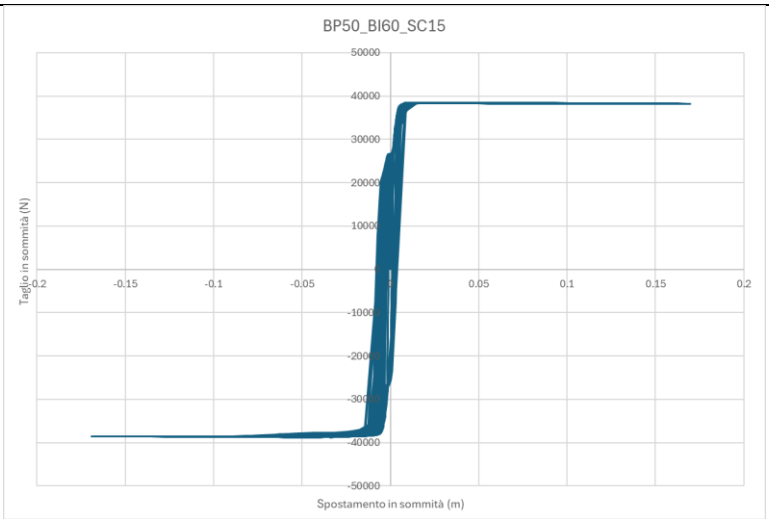
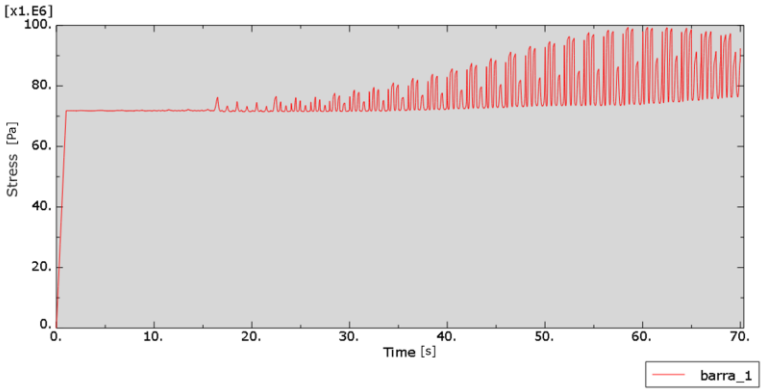
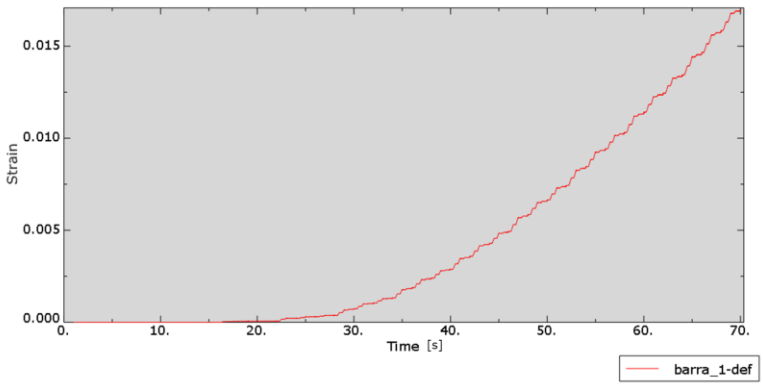
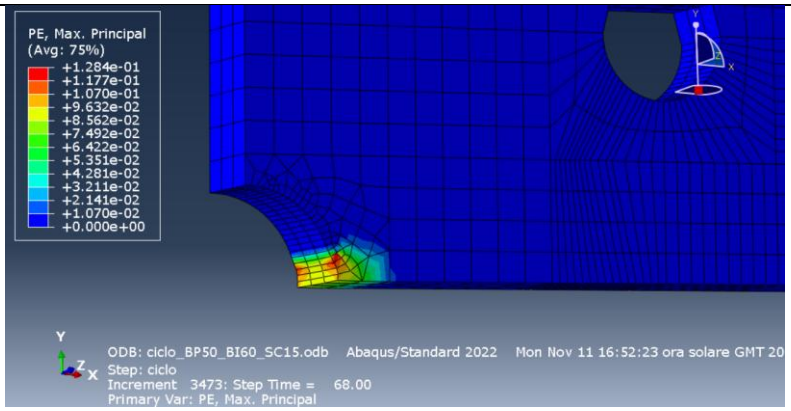
BP50_BI45_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

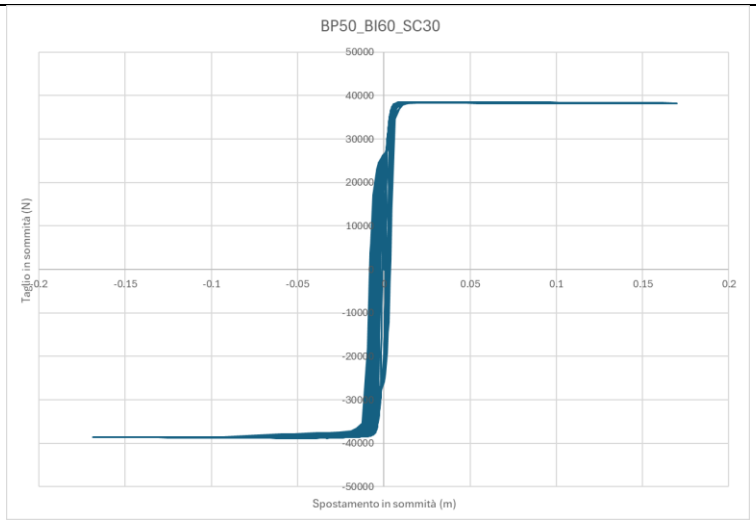
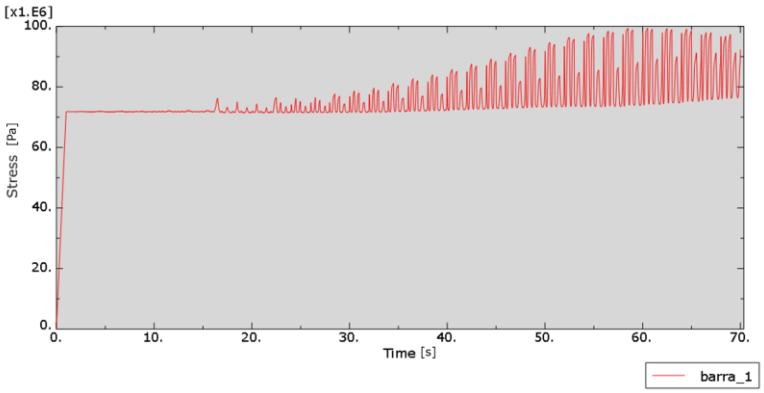
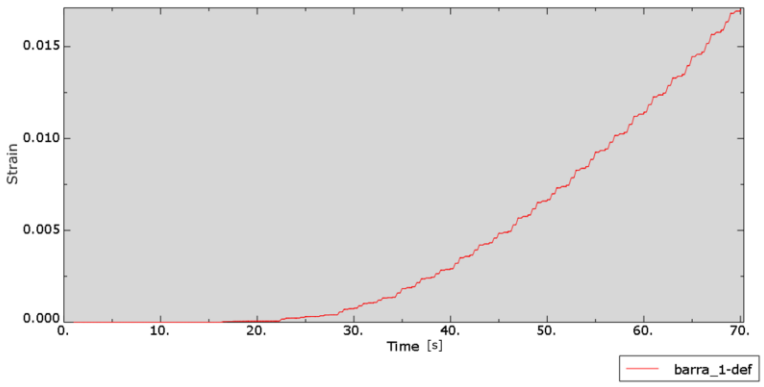
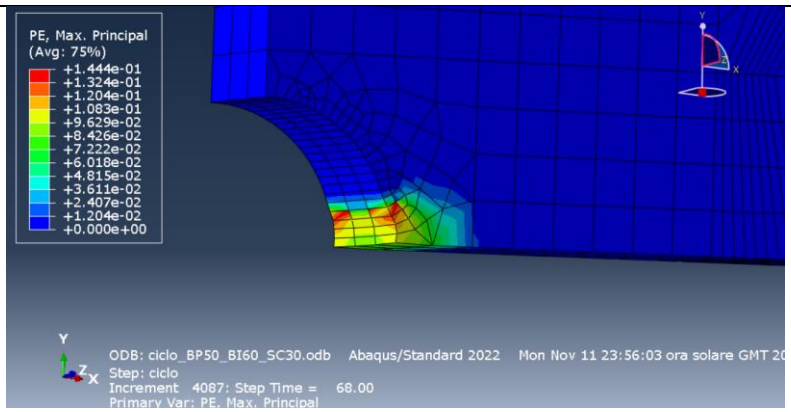
BP50_BI45_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

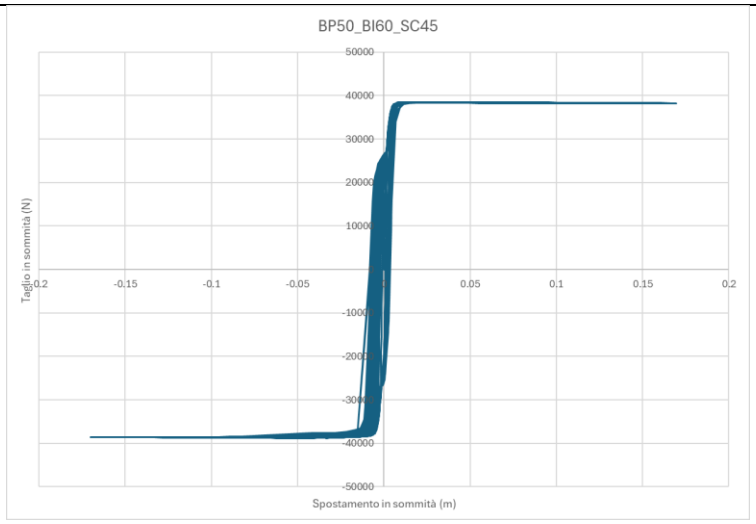
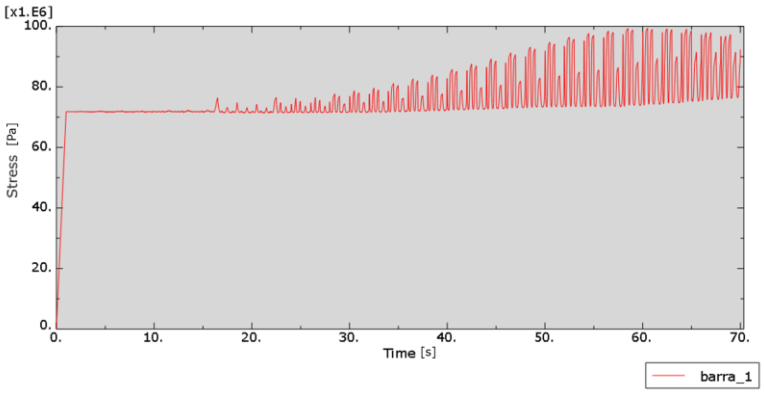
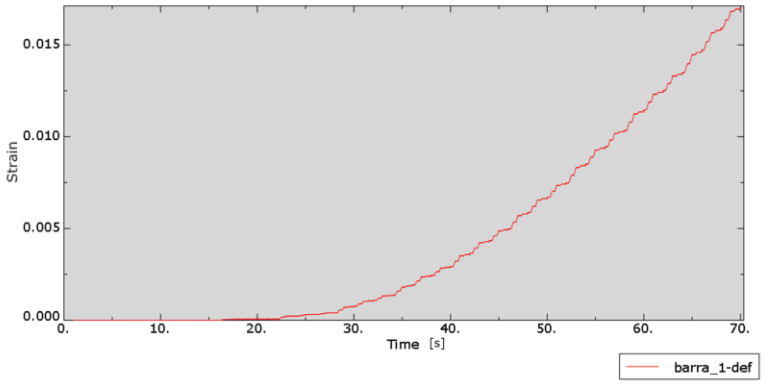
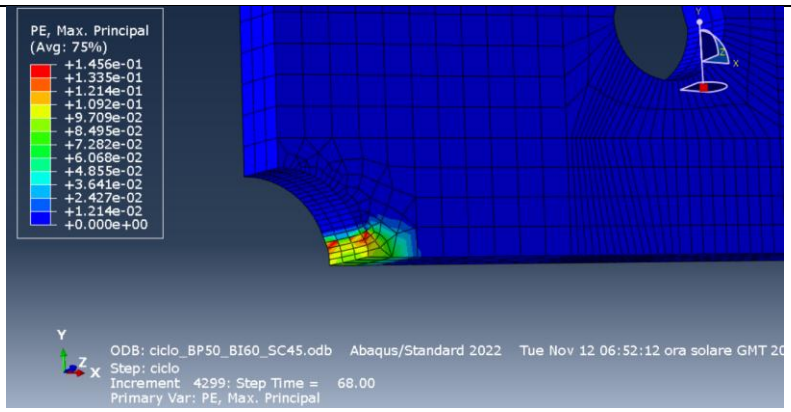
BP50_BI60_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

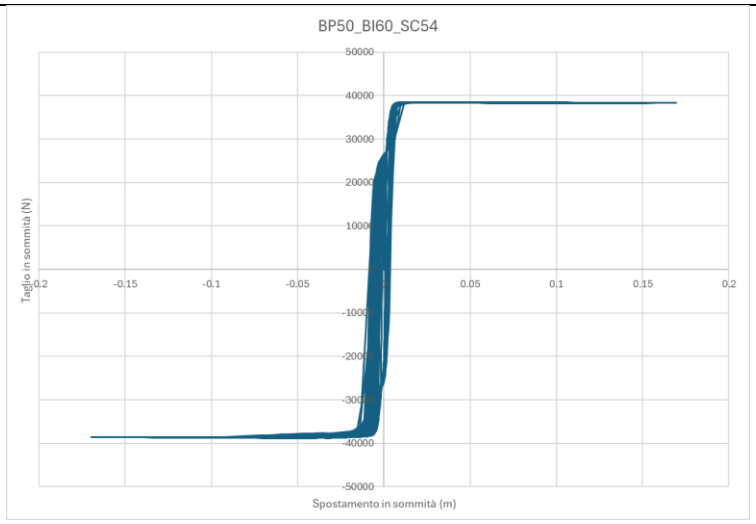
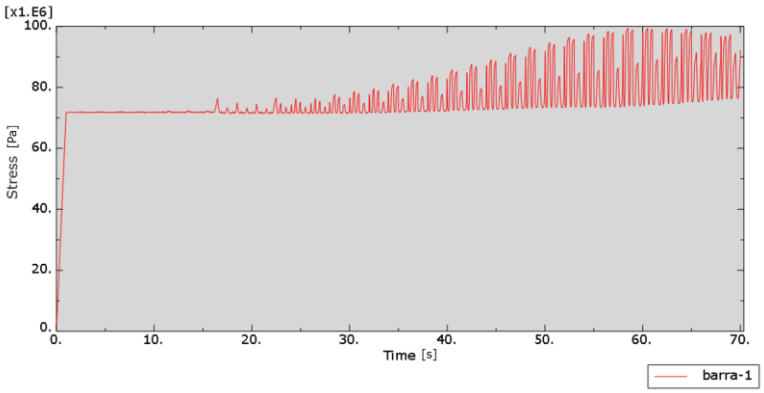
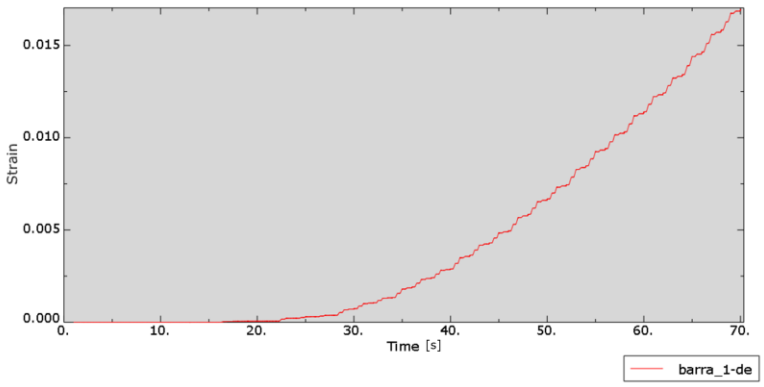
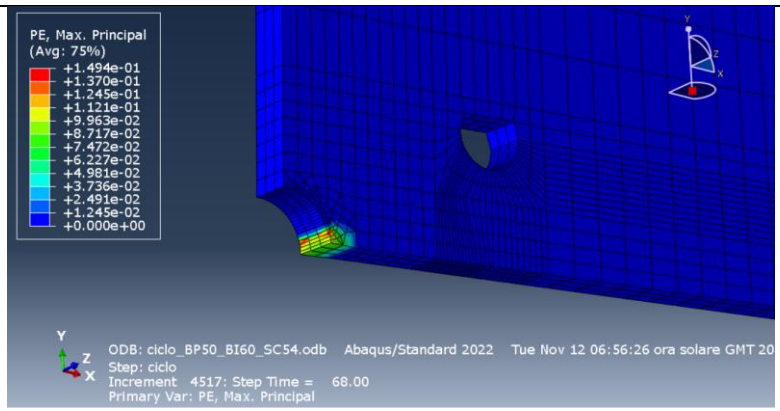
BP50_BI60_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

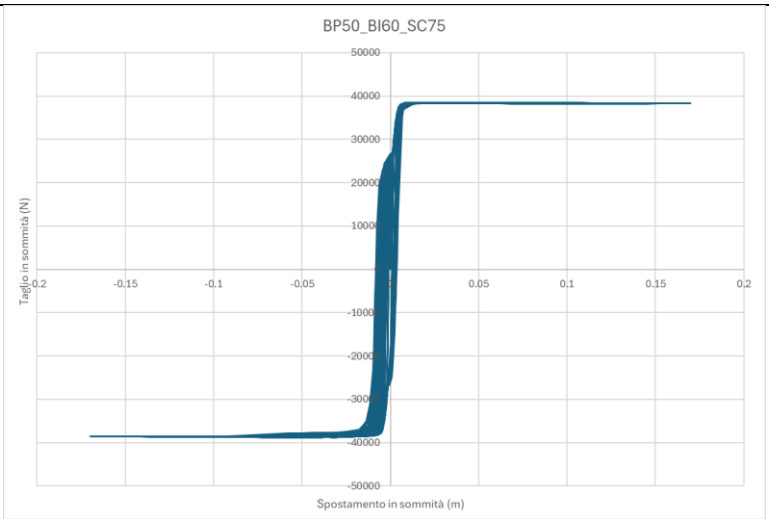
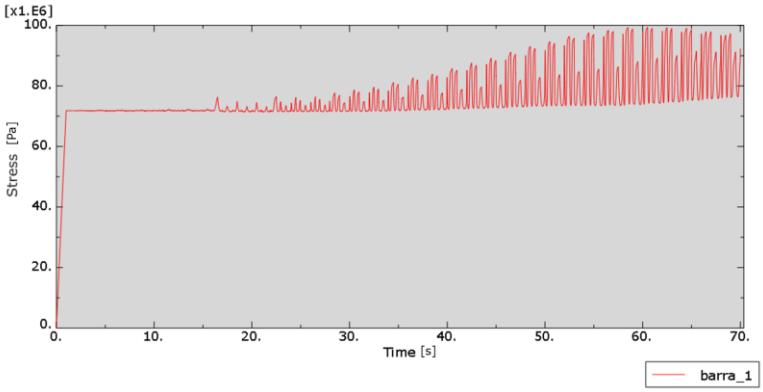
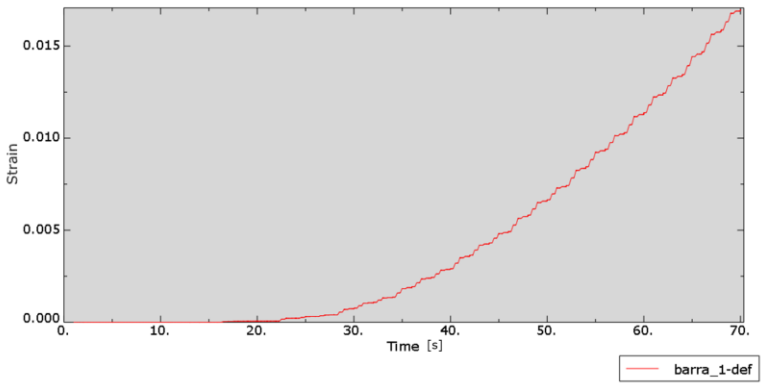
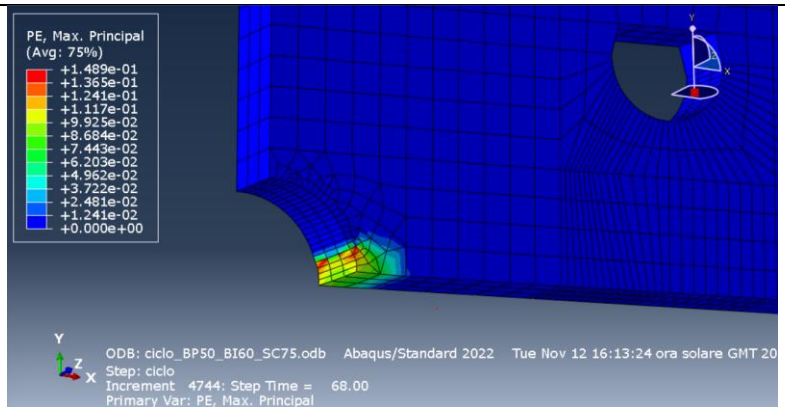
BP50_BI60_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

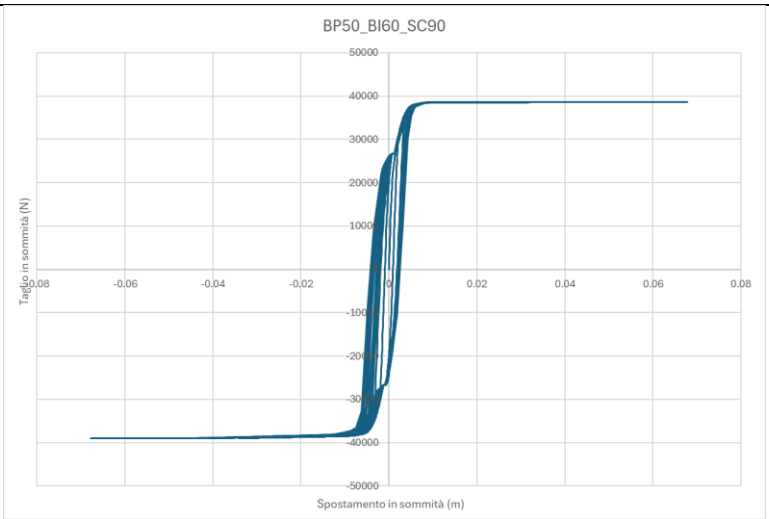
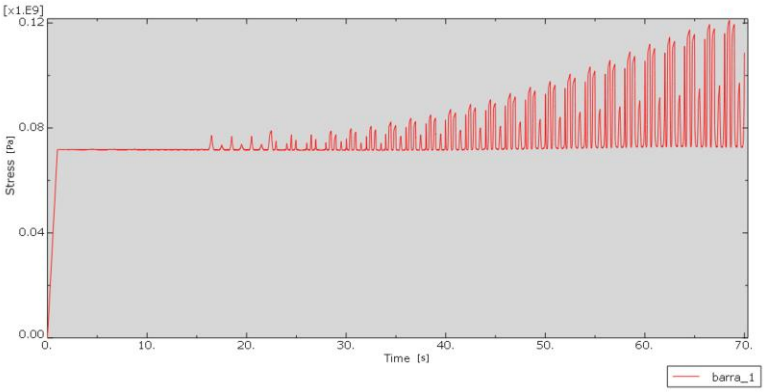
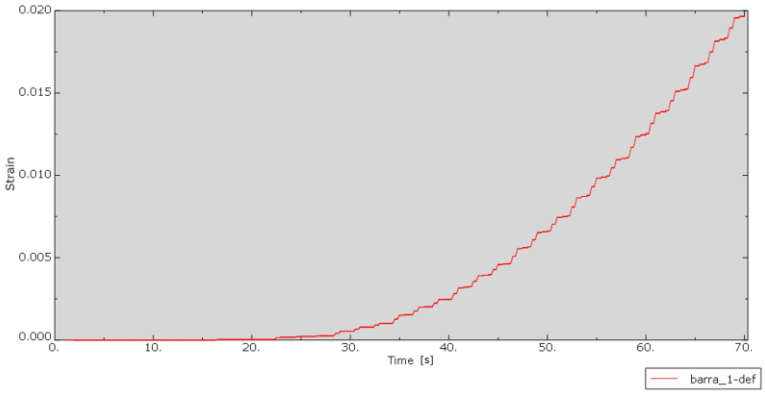
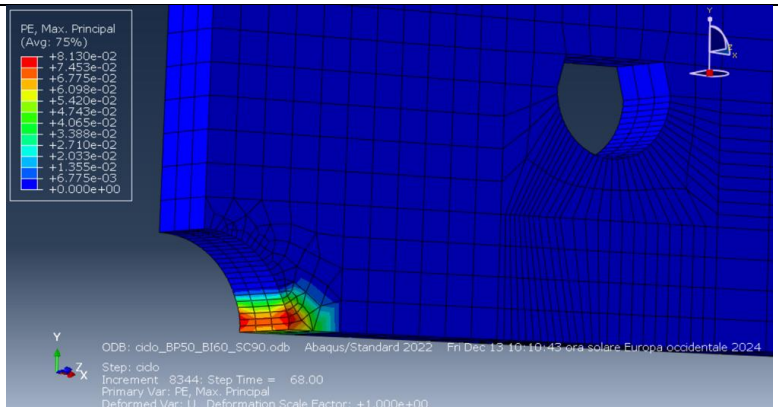
BP50_BI60_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

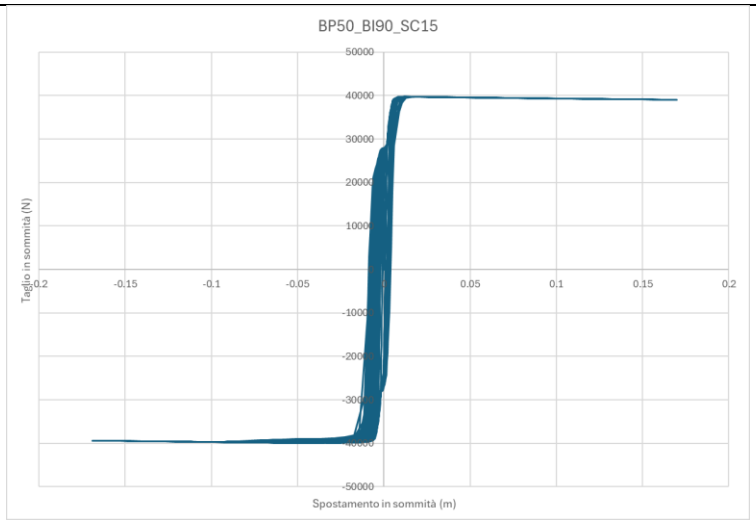
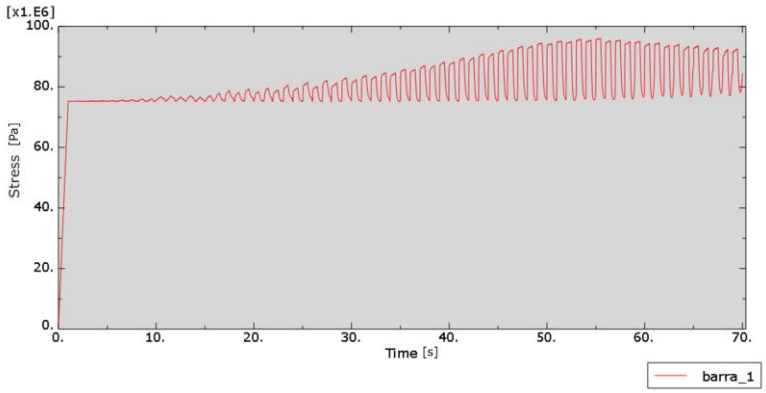
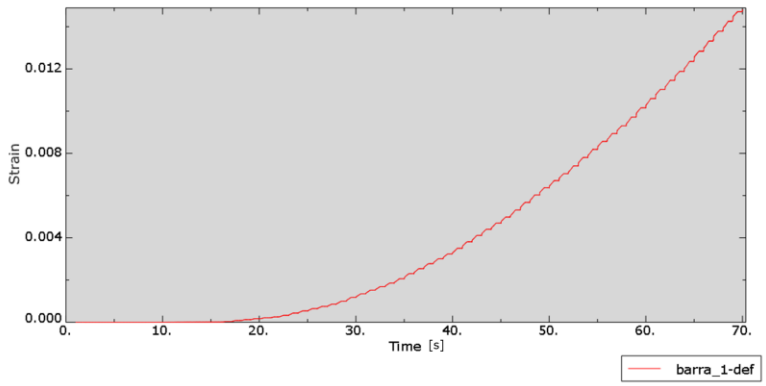
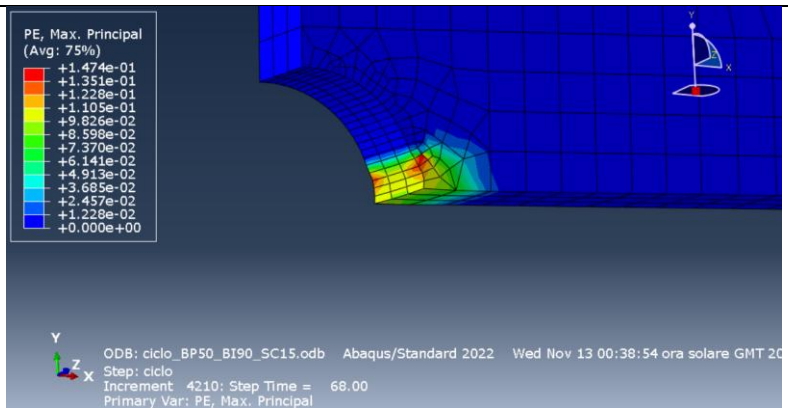
BP50_BI60_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

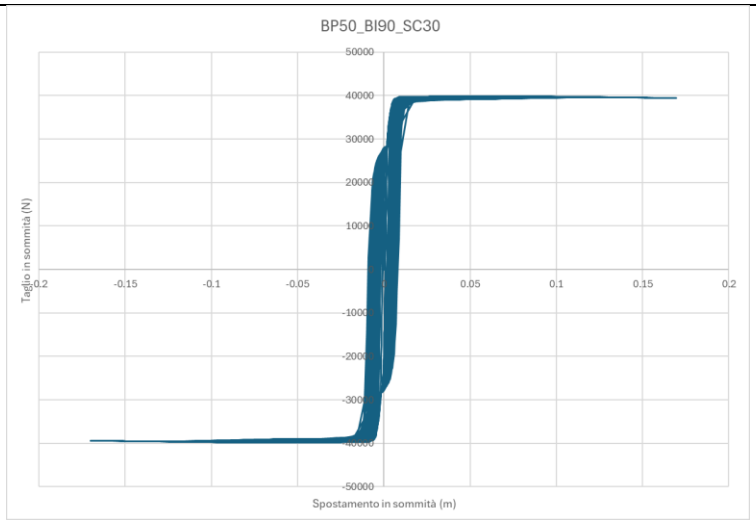
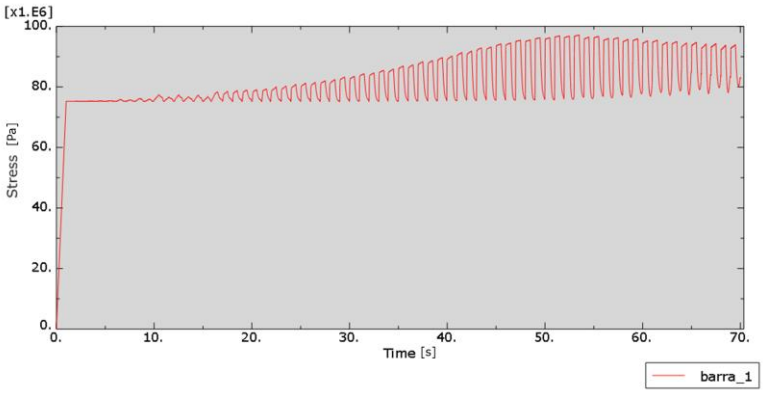
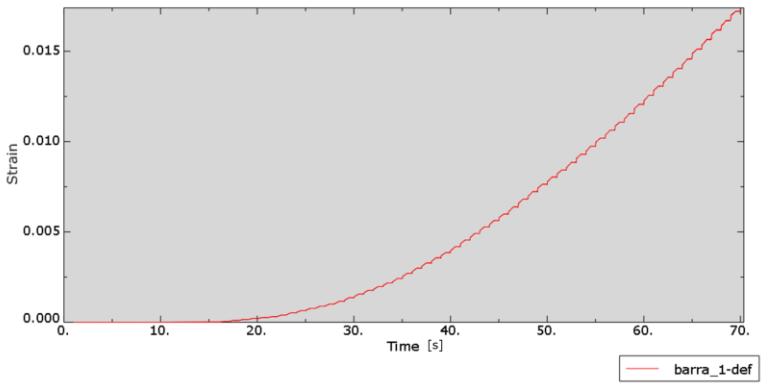
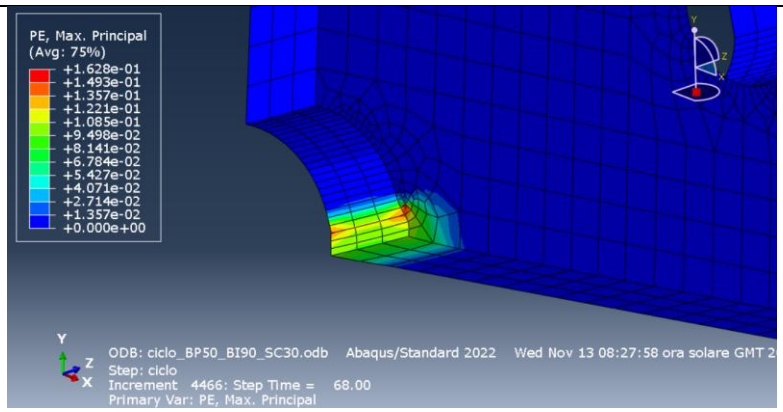
BP50_BI60_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

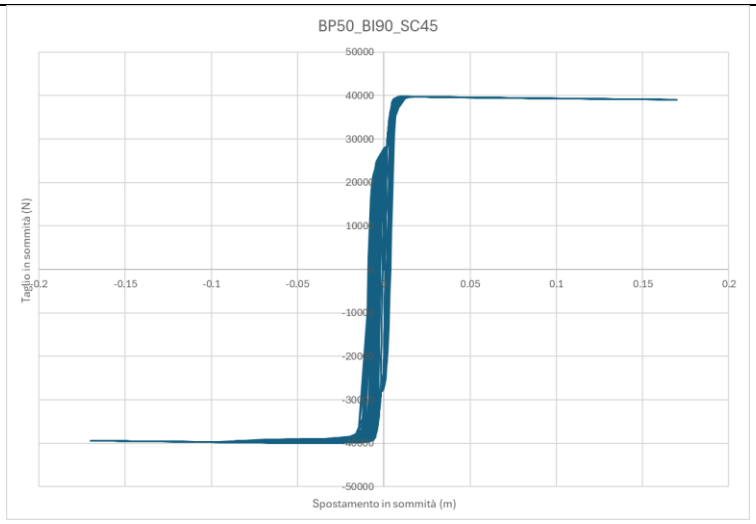
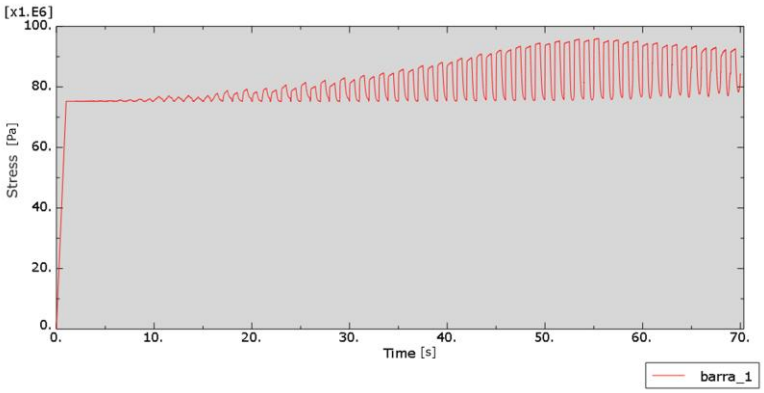
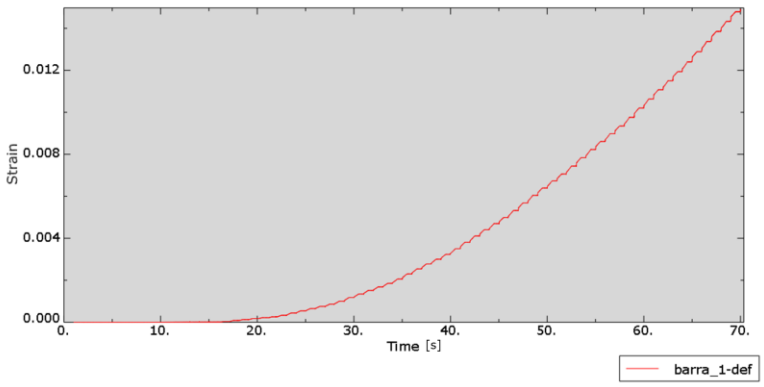
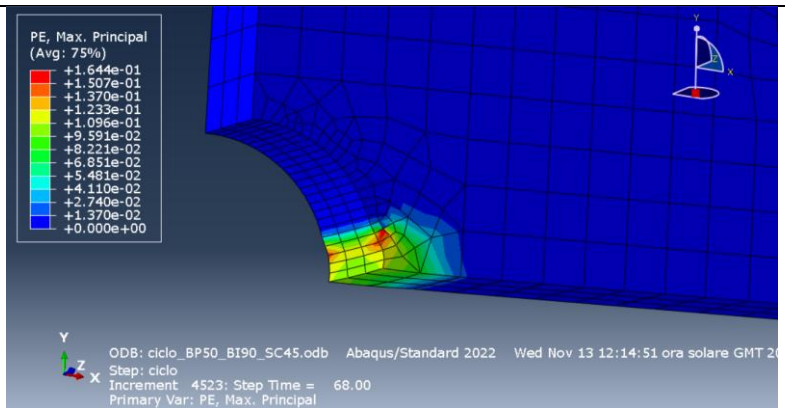
BP50_BI90_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

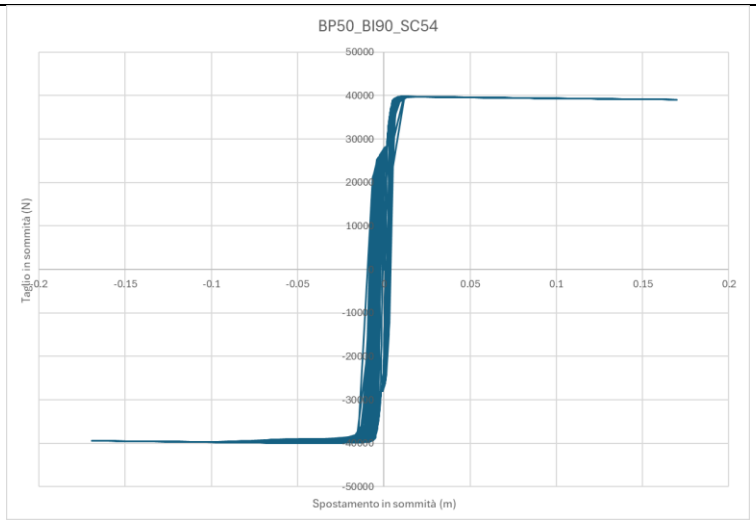
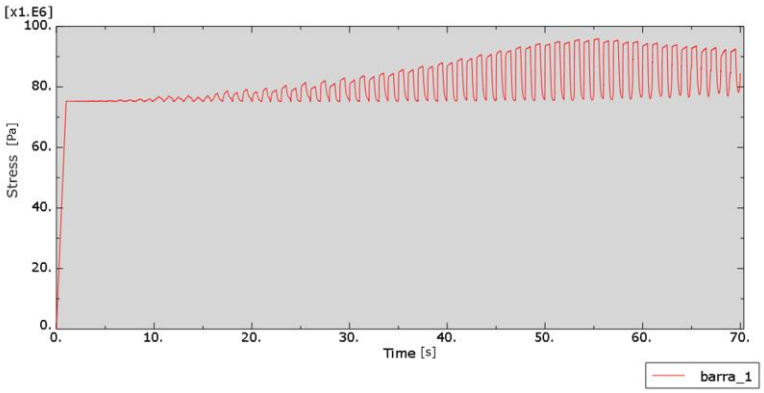
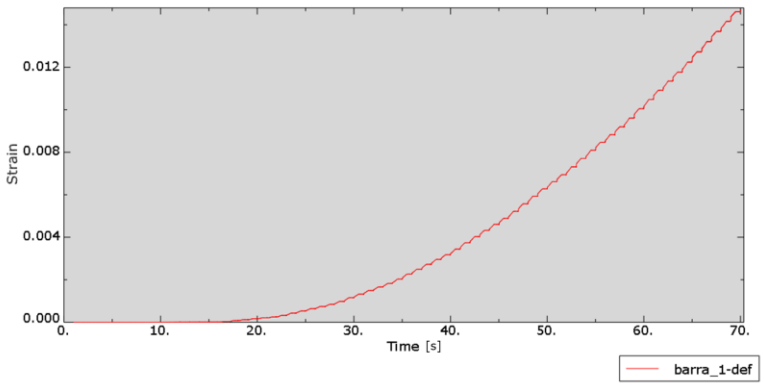
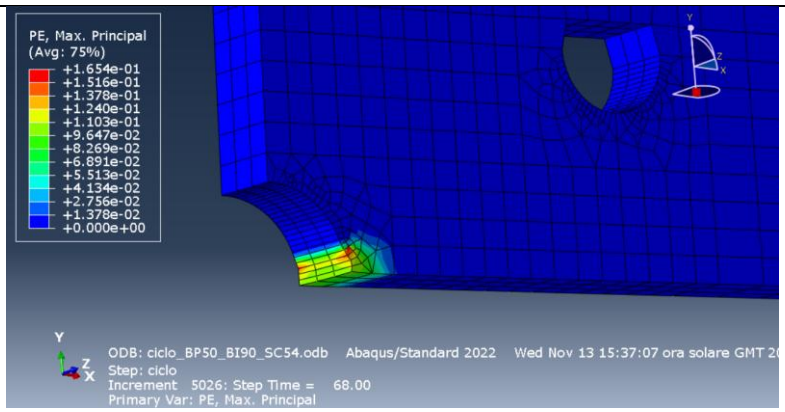
BP50_BI90_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

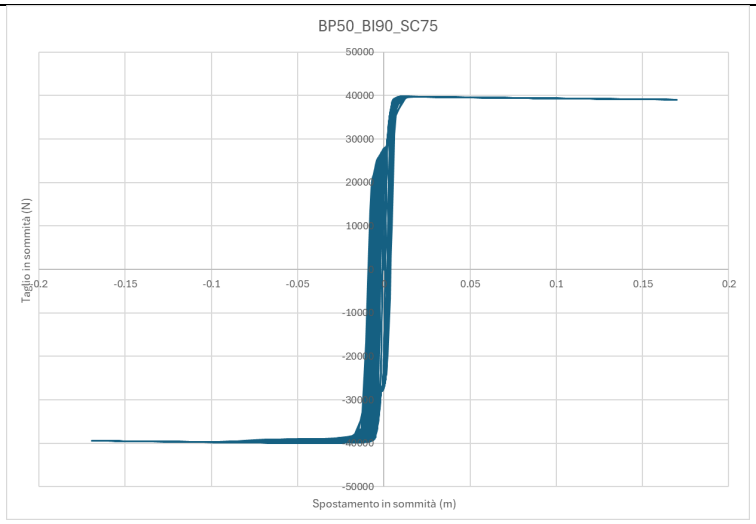
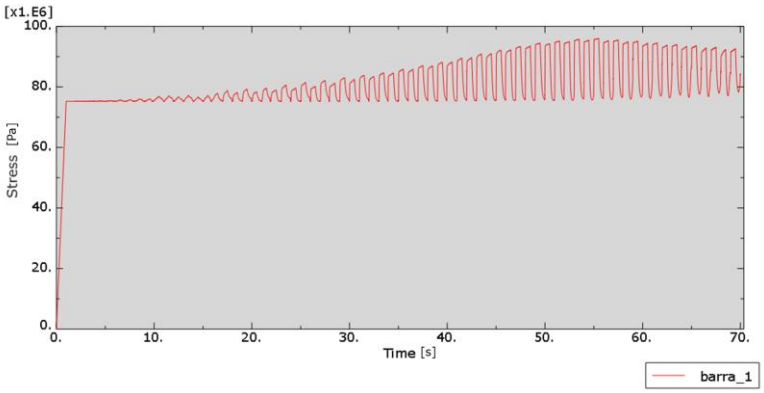
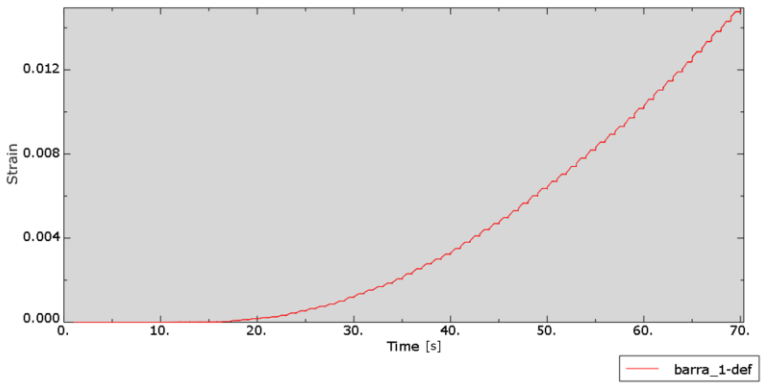
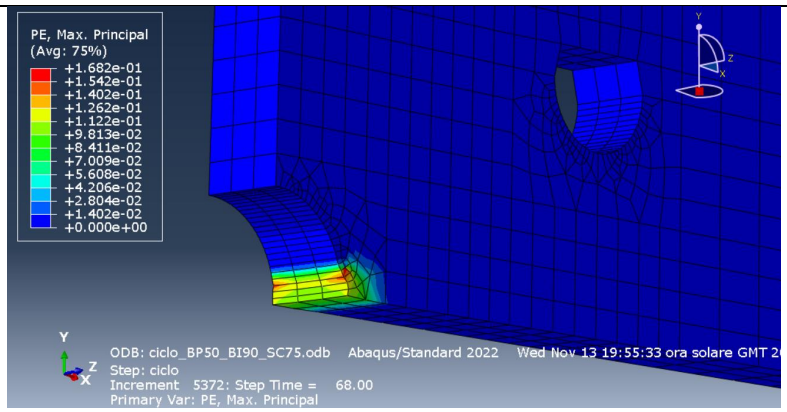
BP50_BI90_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

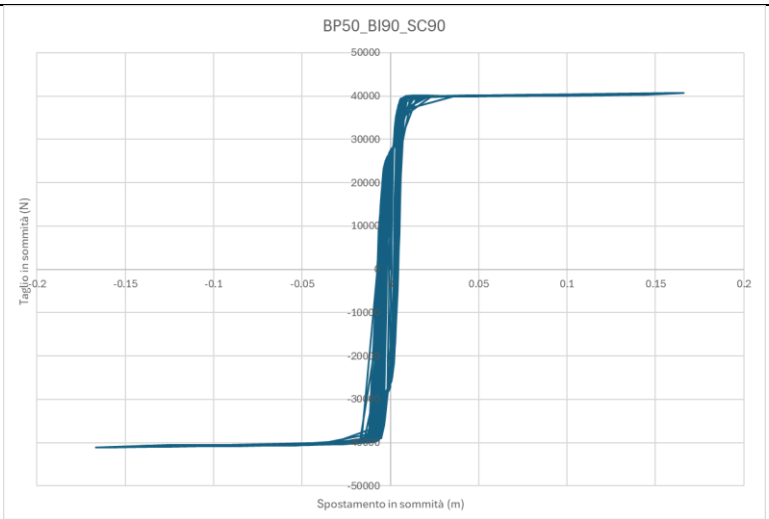
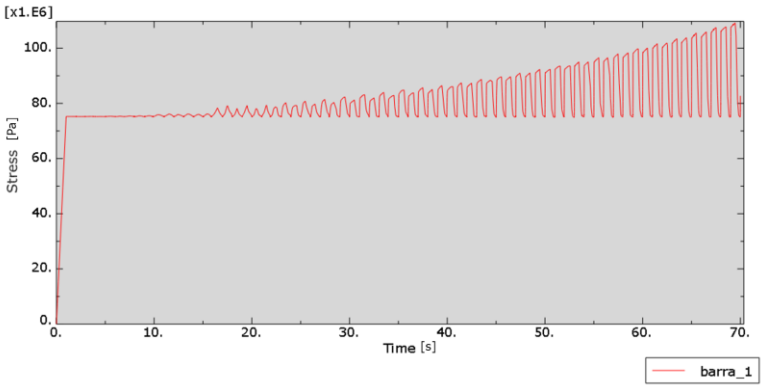
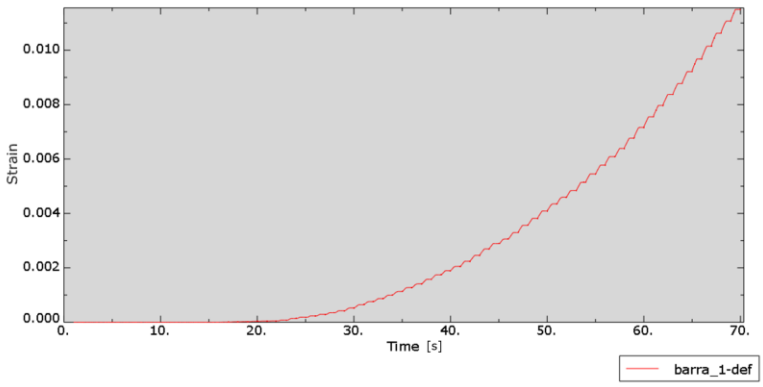
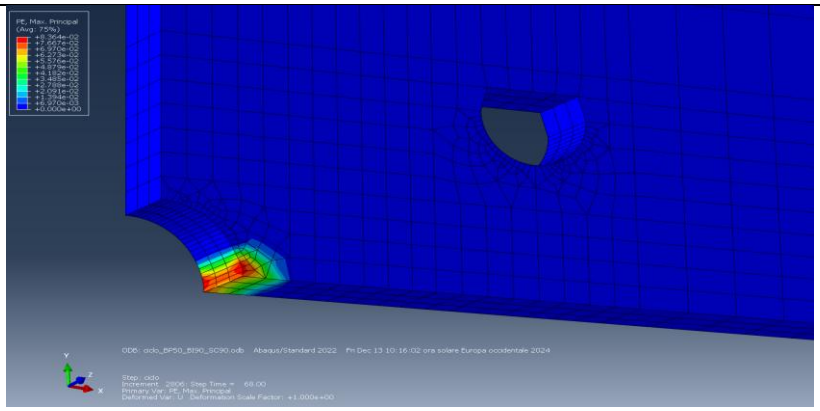
BP50_BI90_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

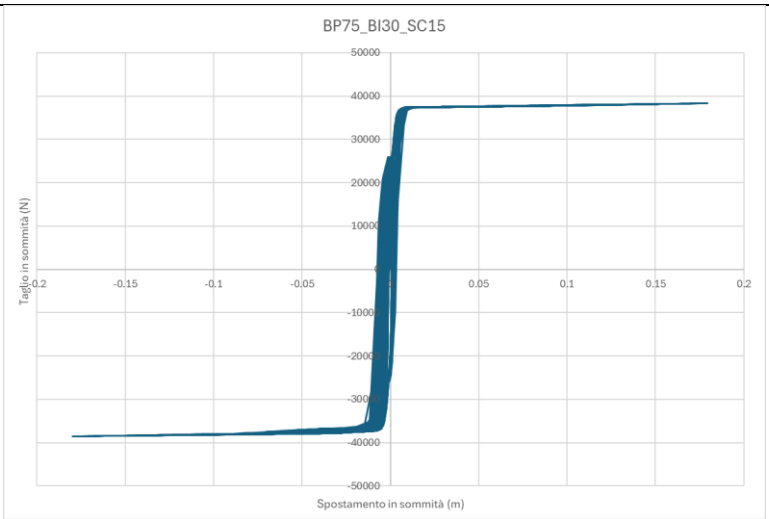
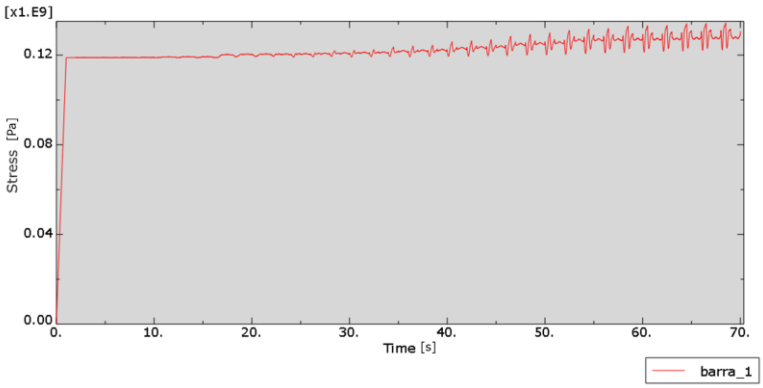
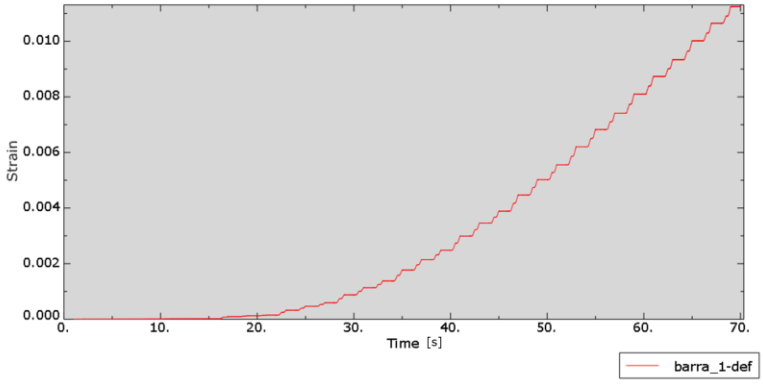
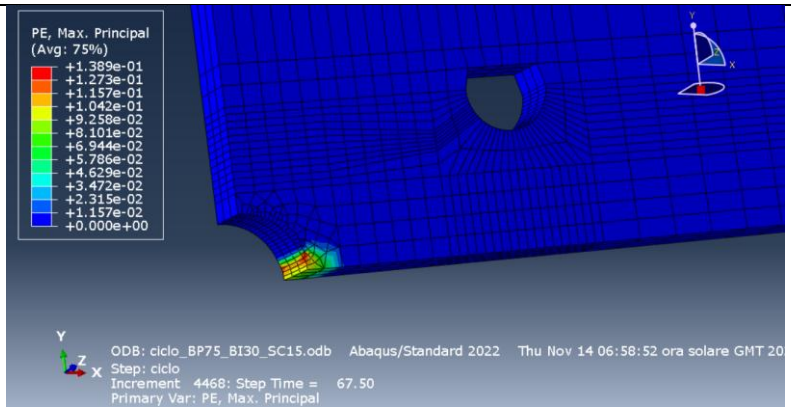
BP50_BI90_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

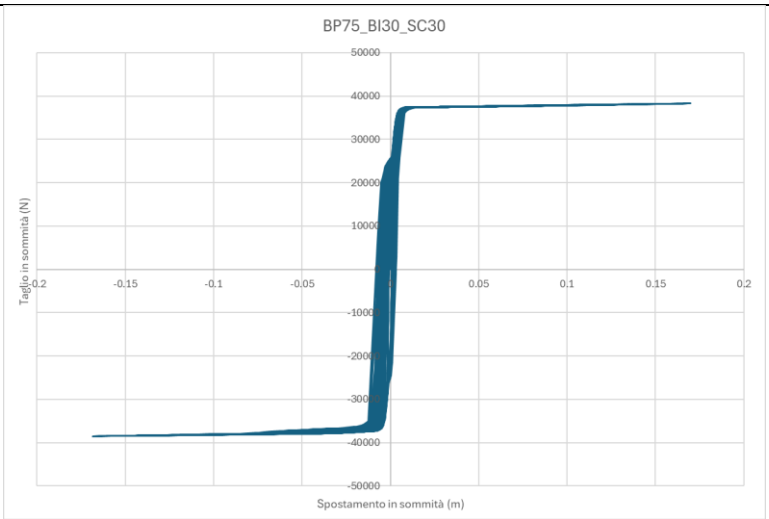
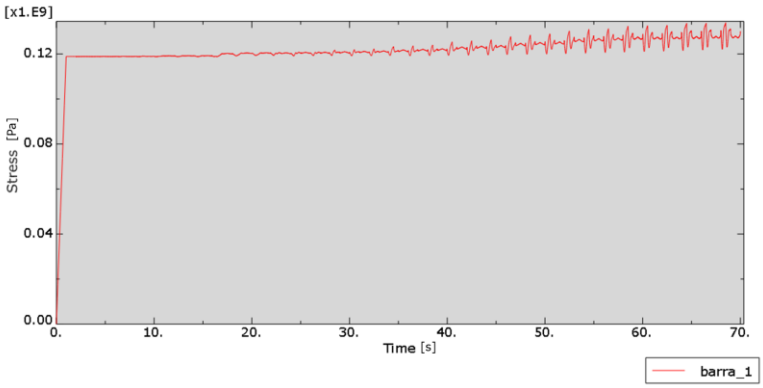
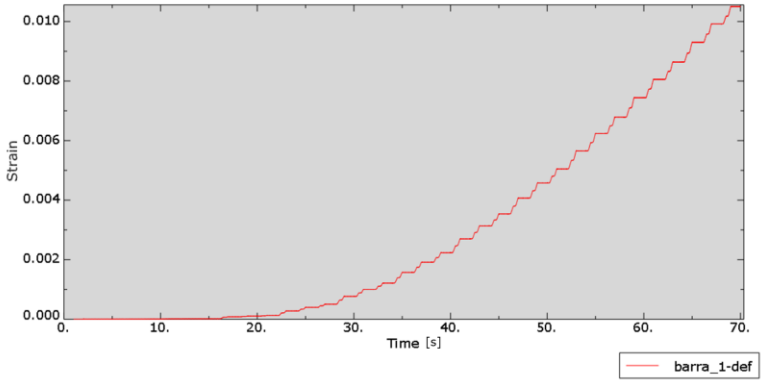
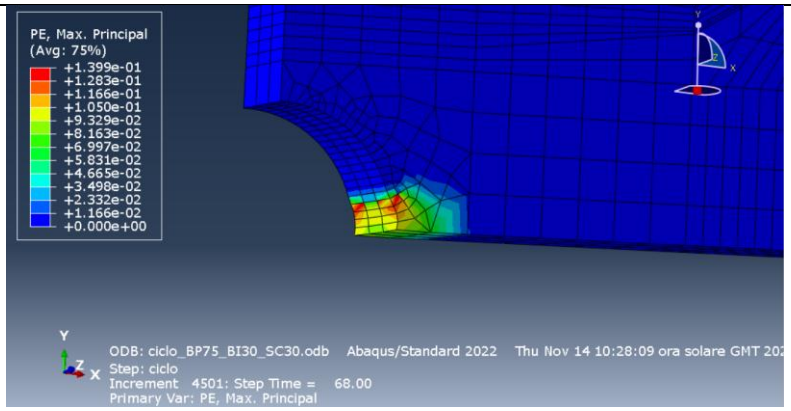
BP50_BI90_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

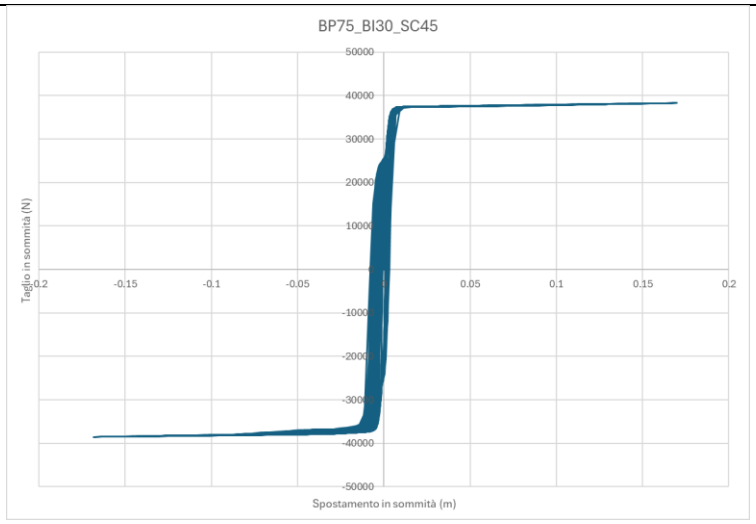
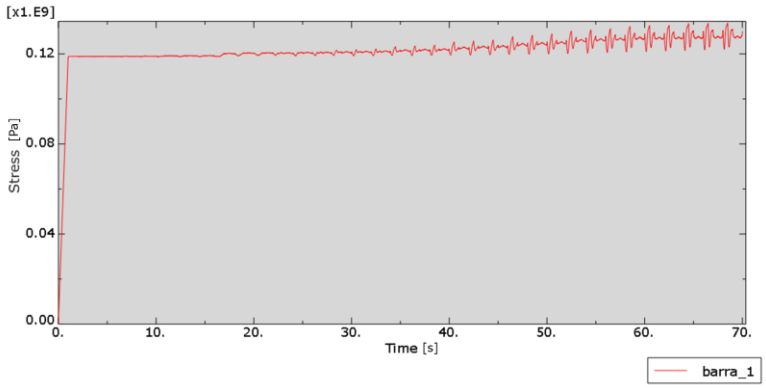
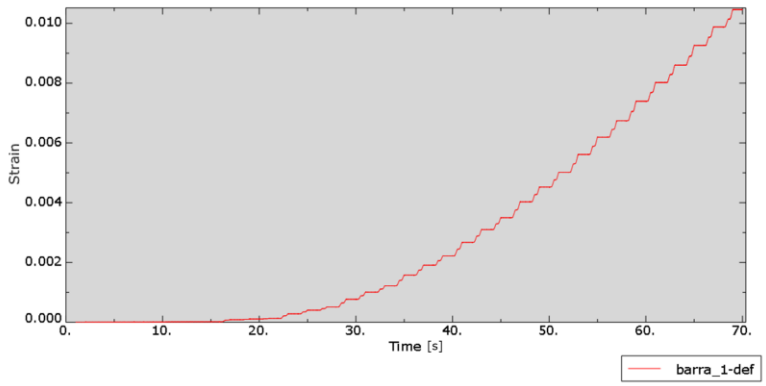
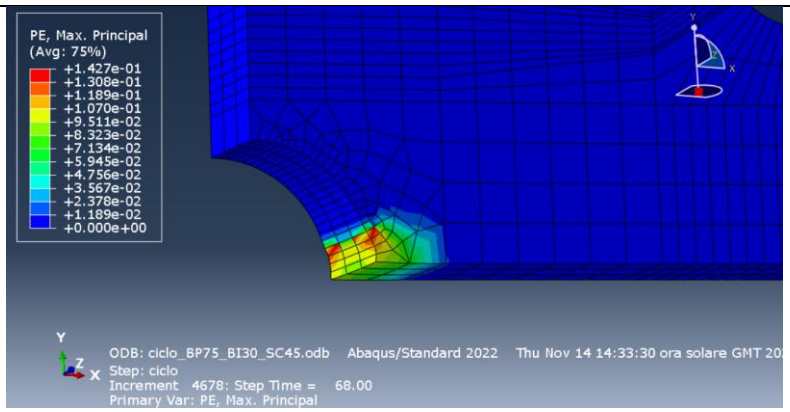
BP75_BI30_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

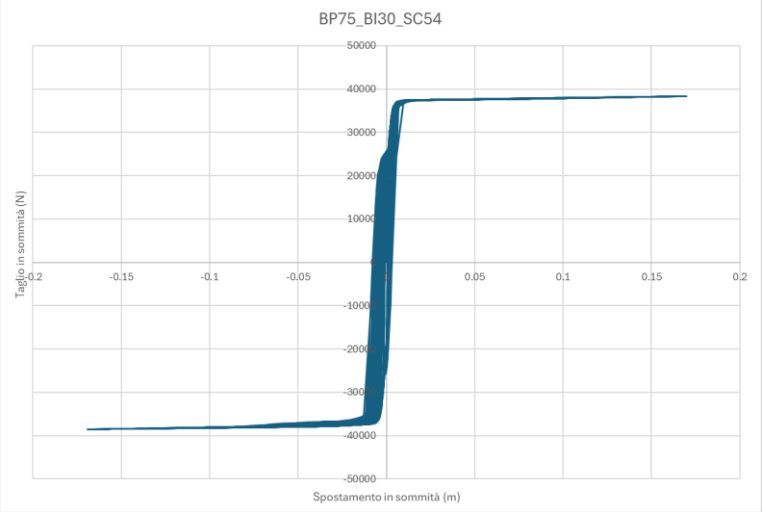
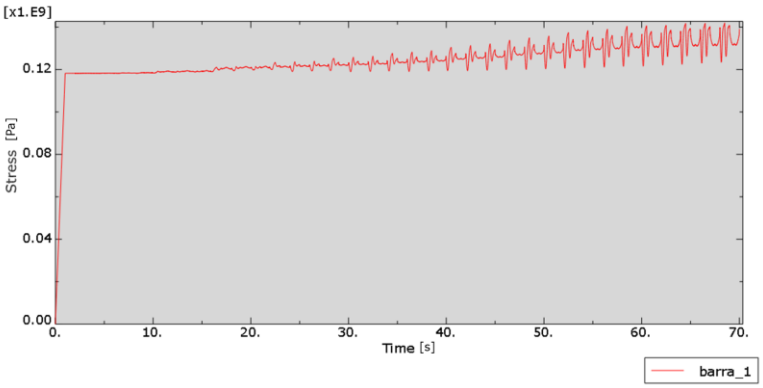
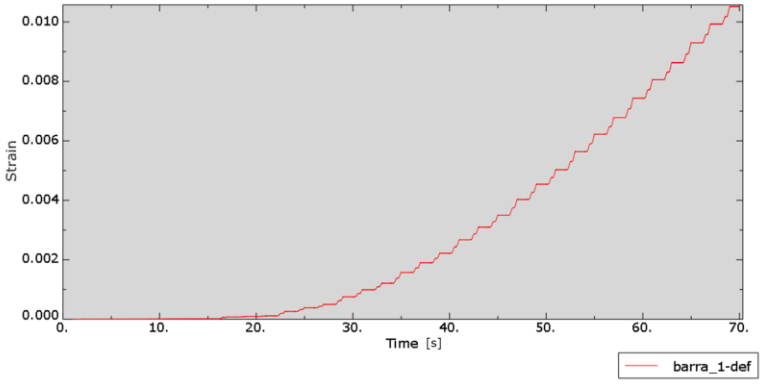
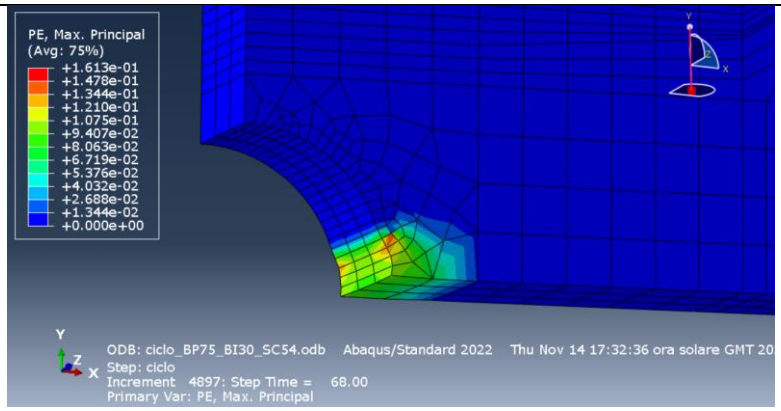
BP75_BI30_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

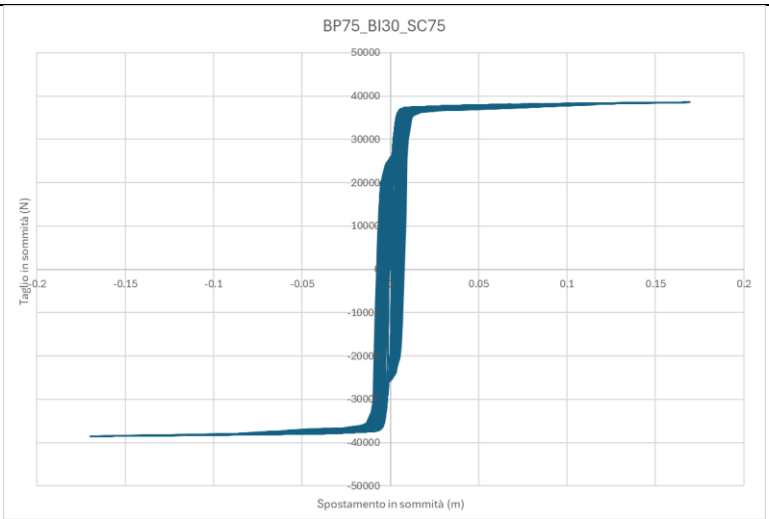
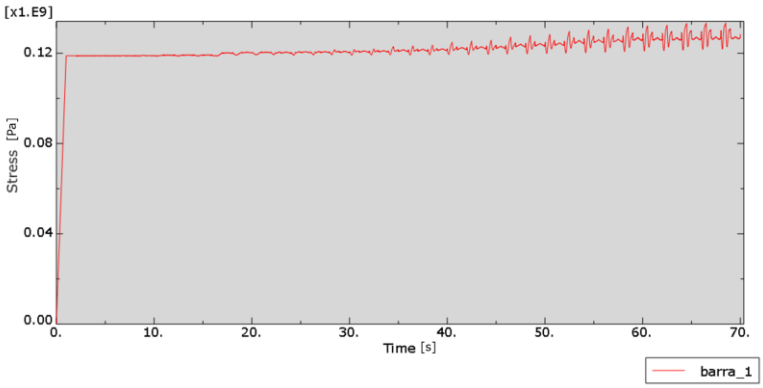
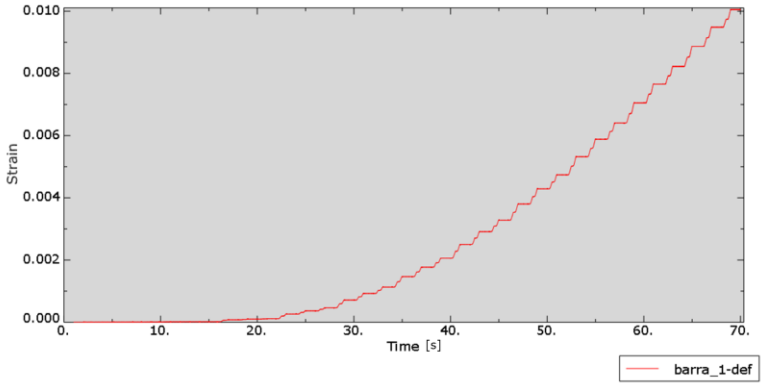
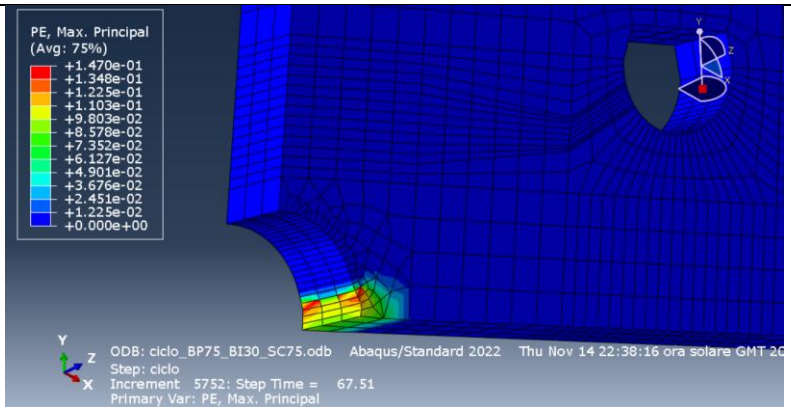
BP75_BI30_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

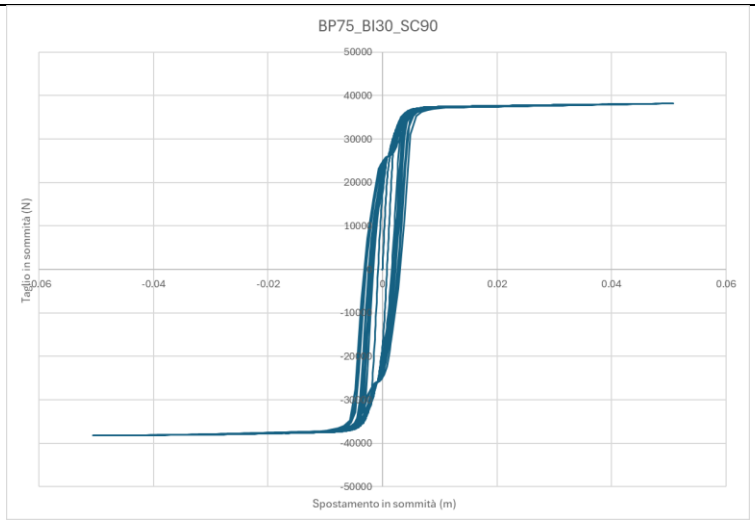
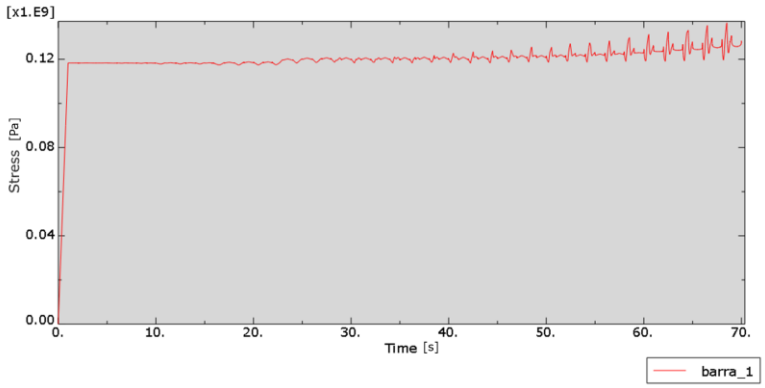
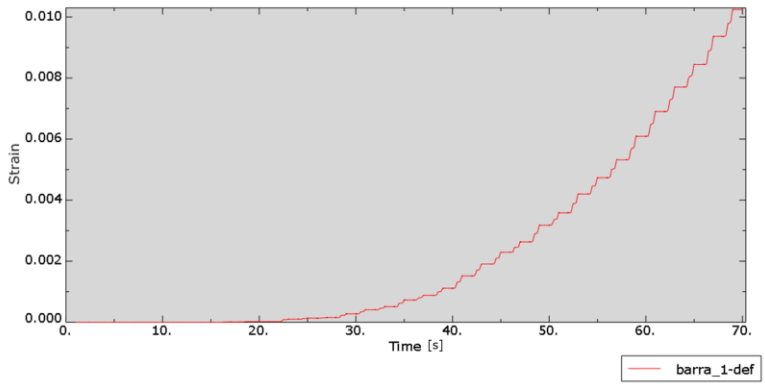
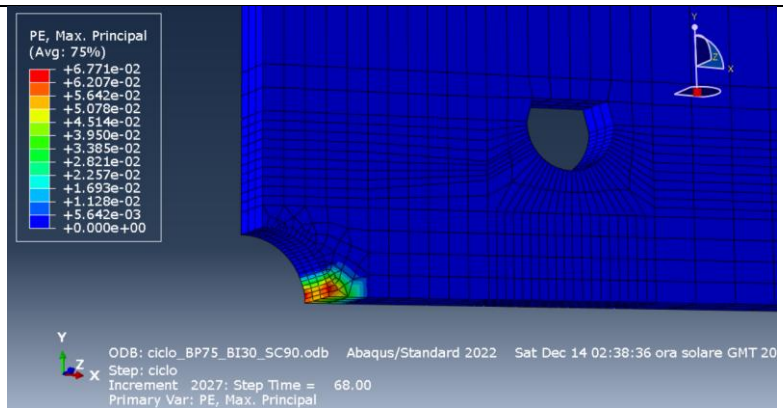
BP75_BI30_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

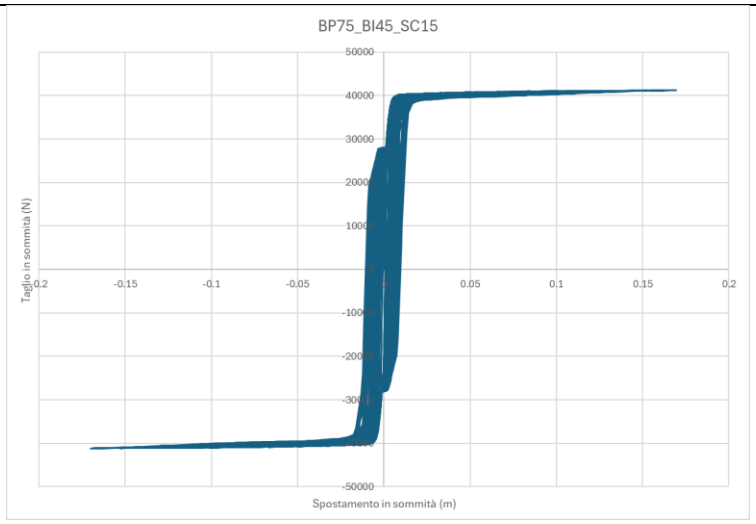
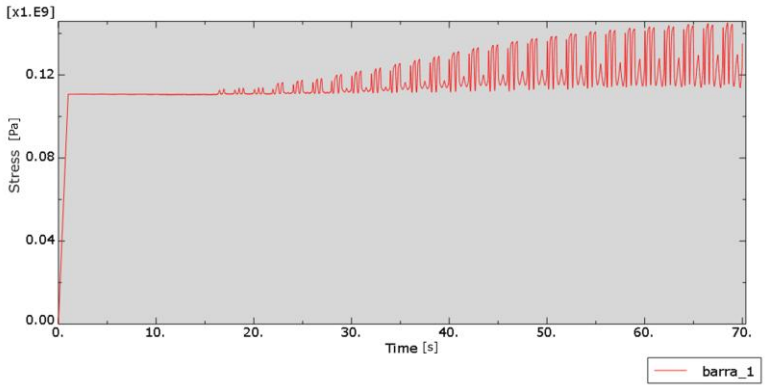
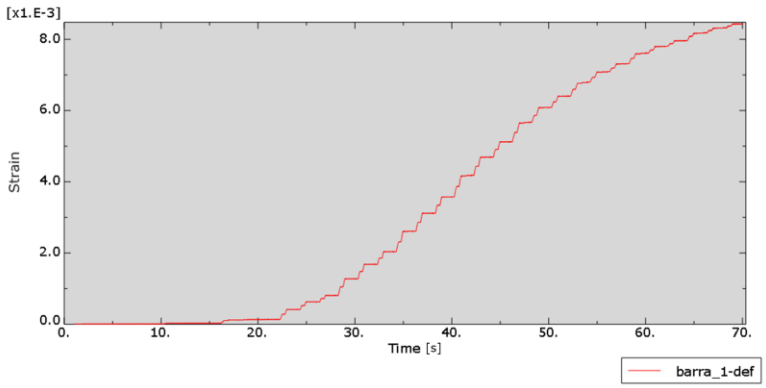
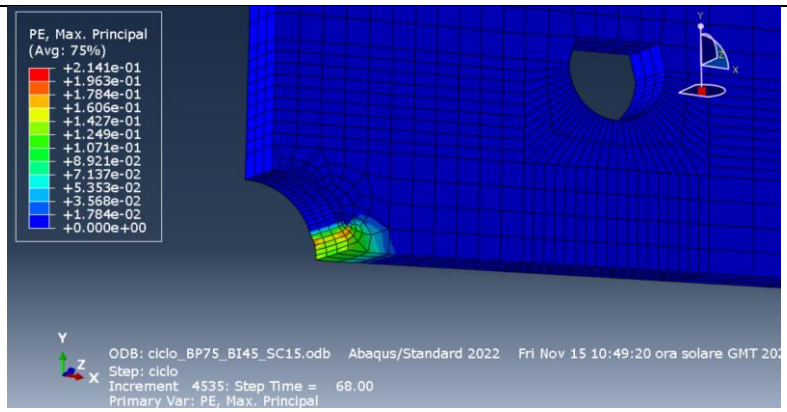
BP75_BI30_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

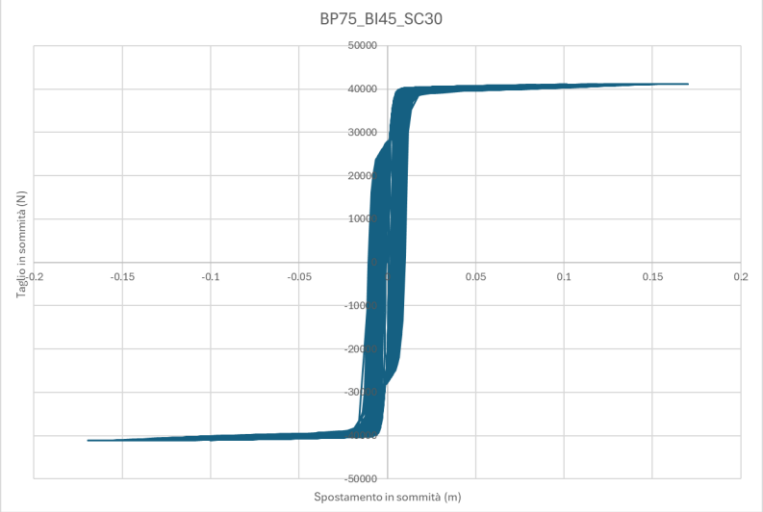
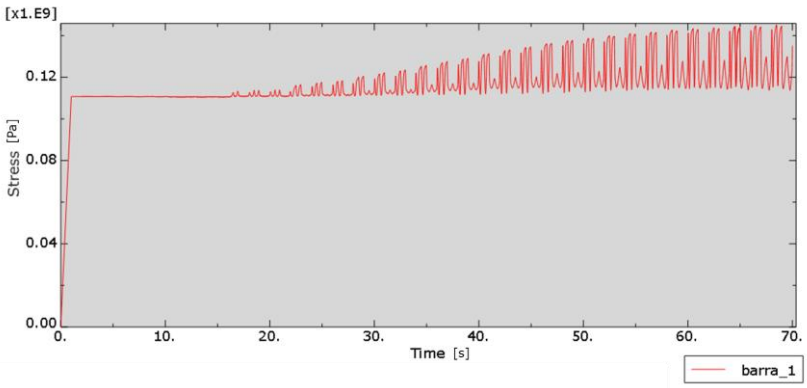
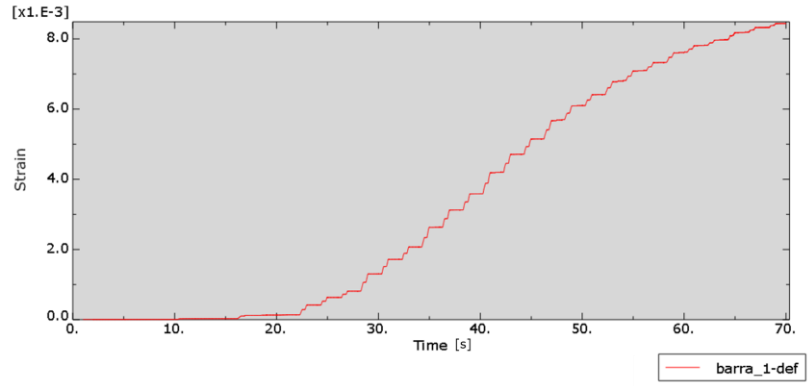
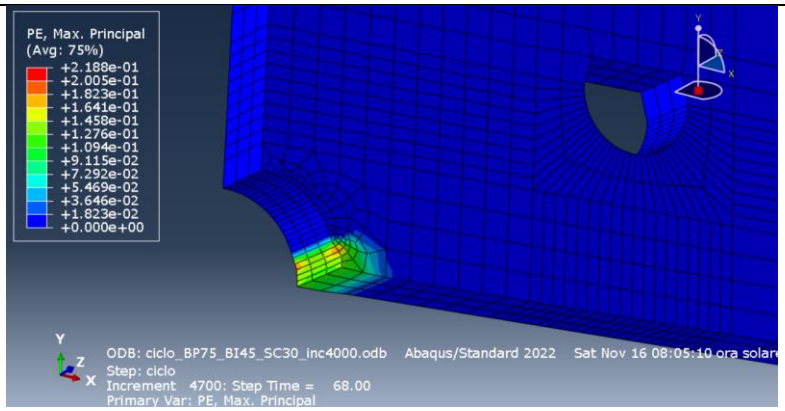
BP75_BI30_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

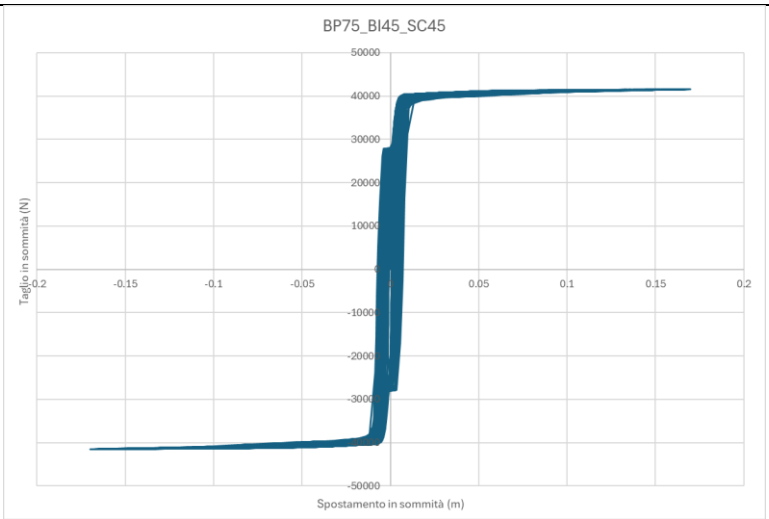
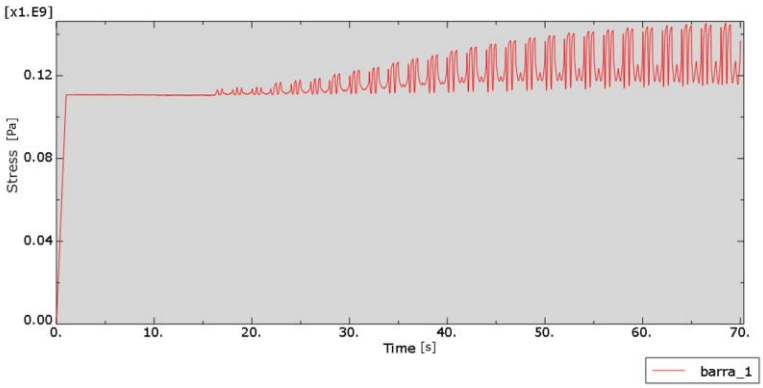
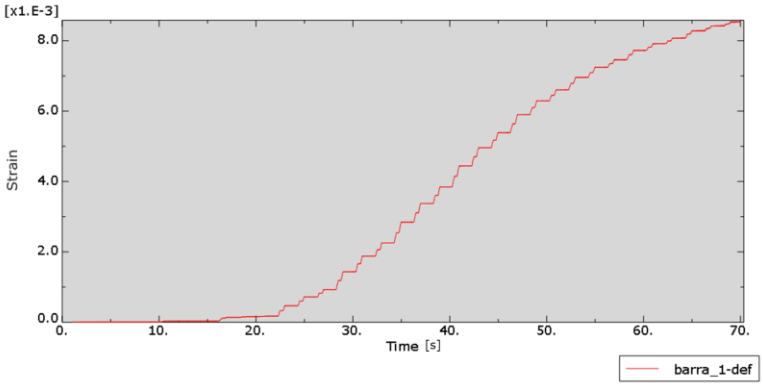
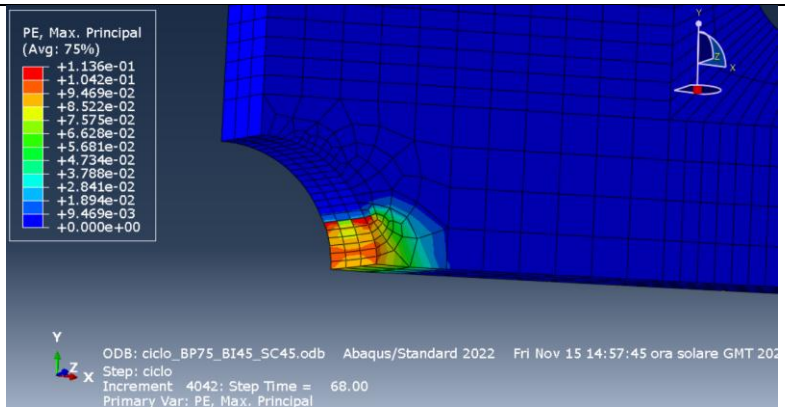
BP75_BI45_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

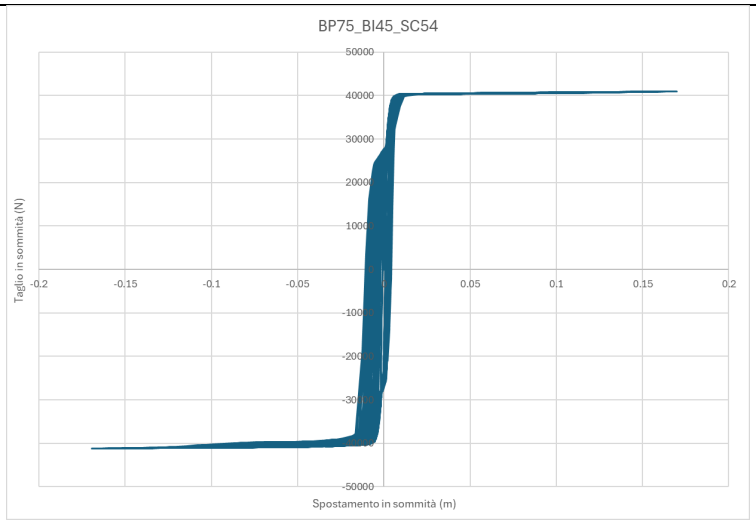
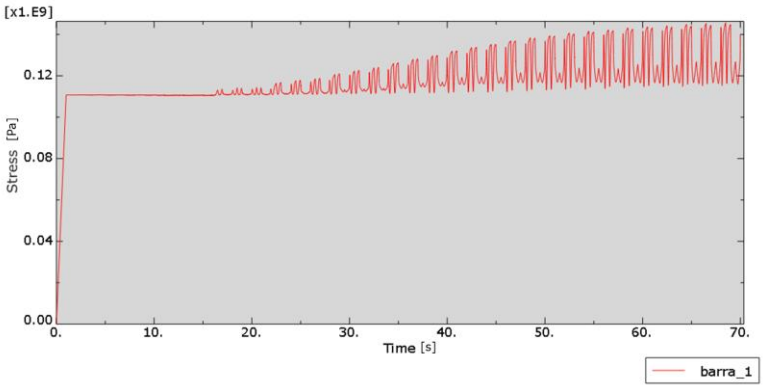
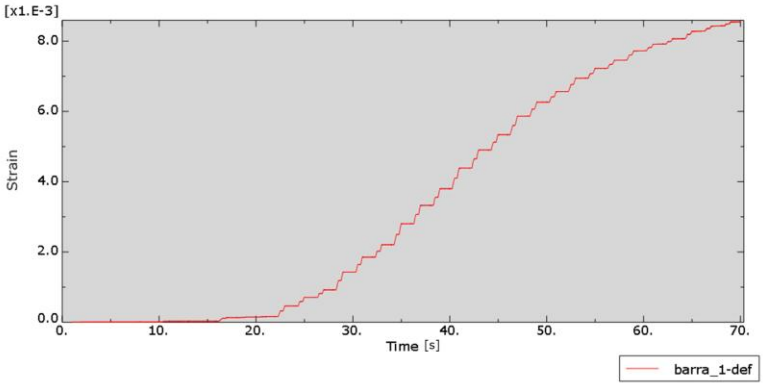
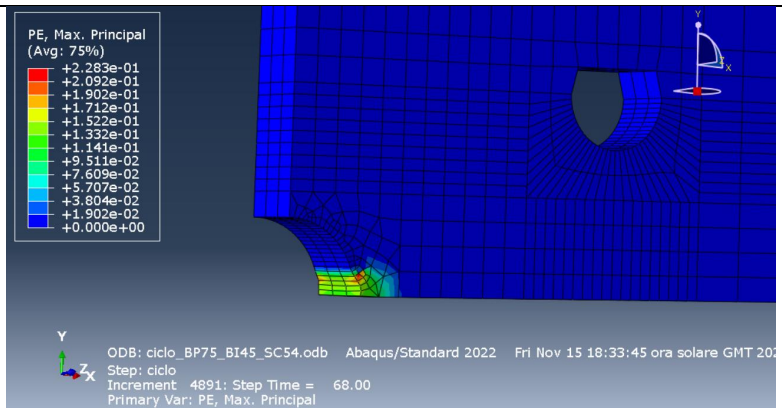
BP75_BI45_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

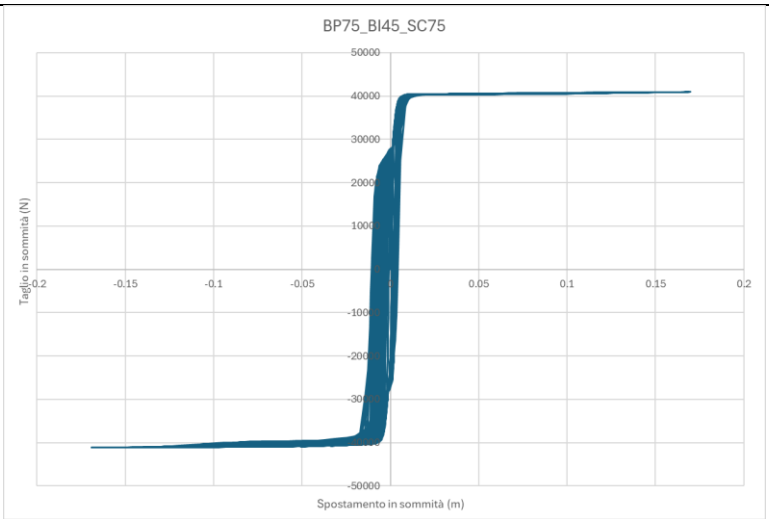
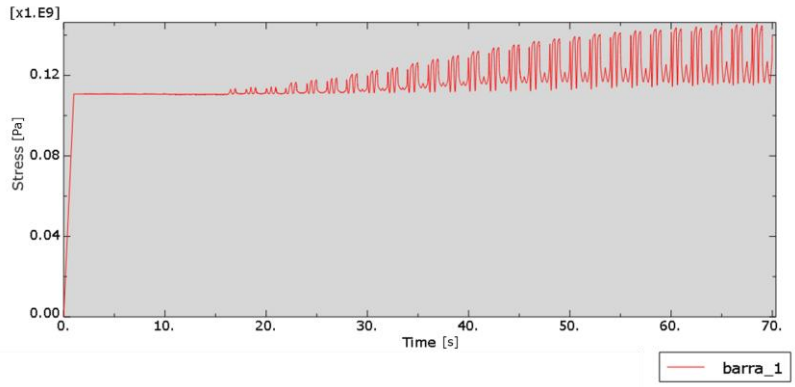
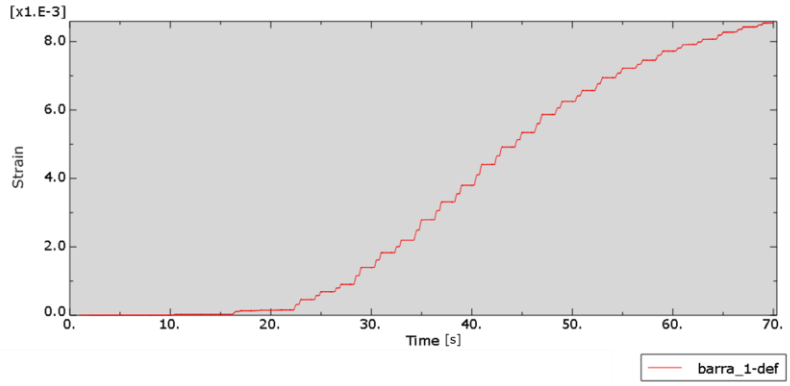
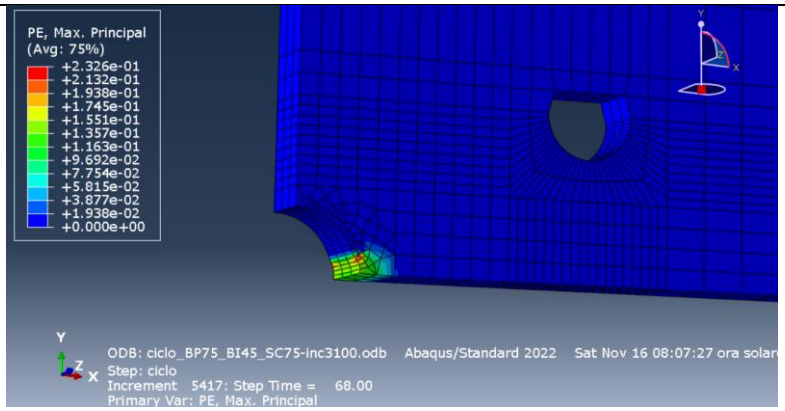
BP75_BI45_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

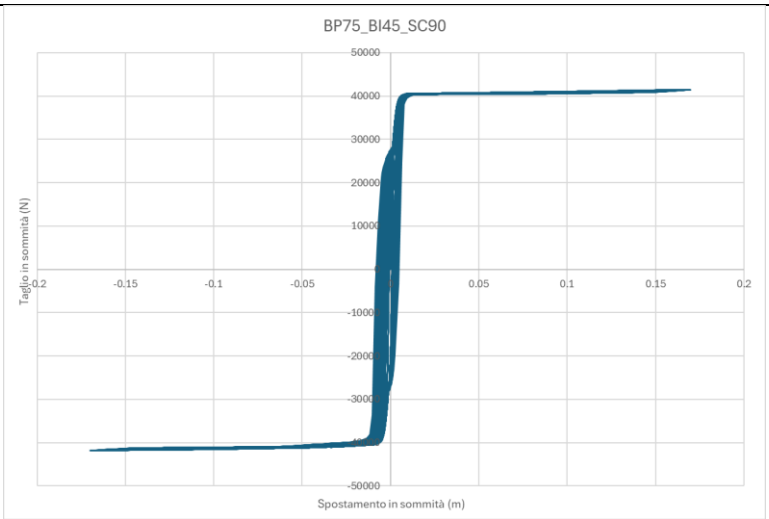
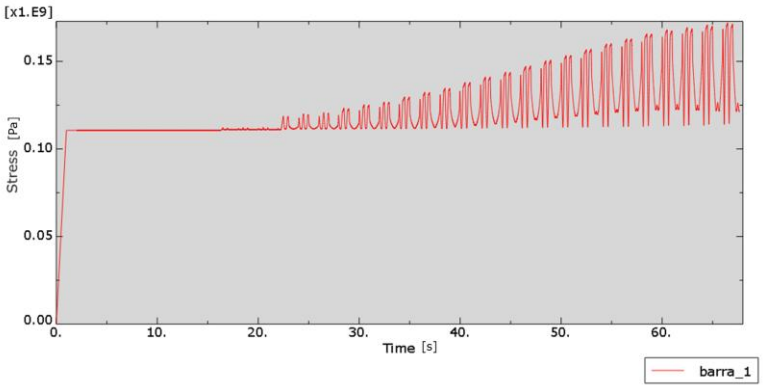
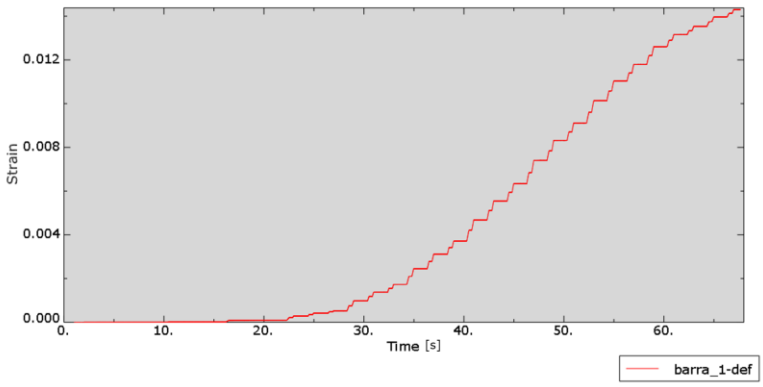
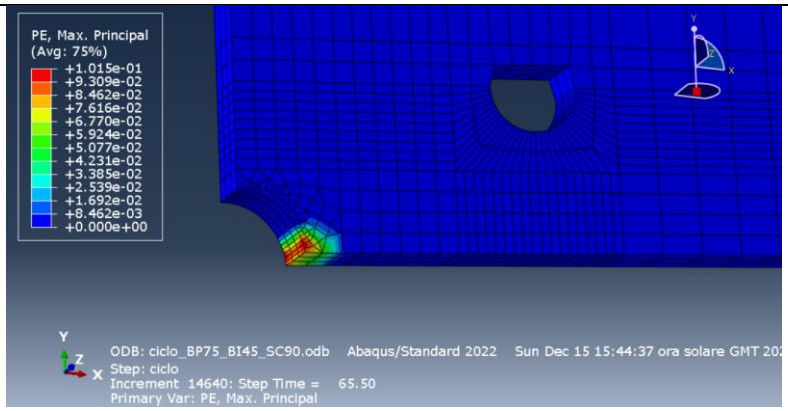
BP75_BI45_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

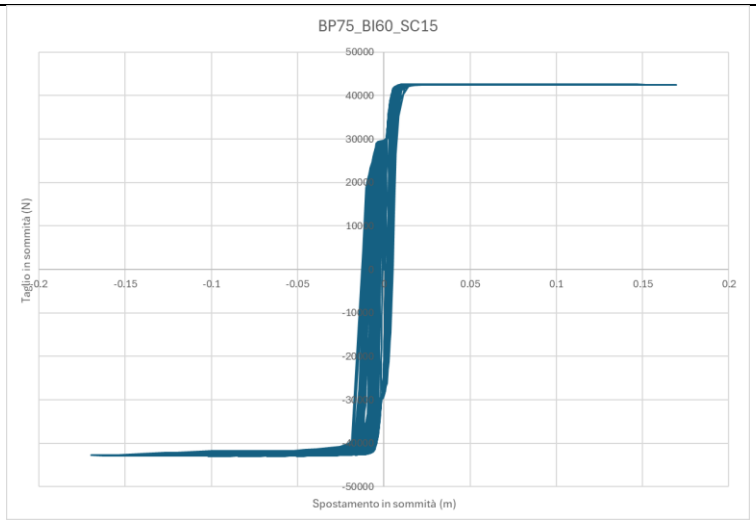
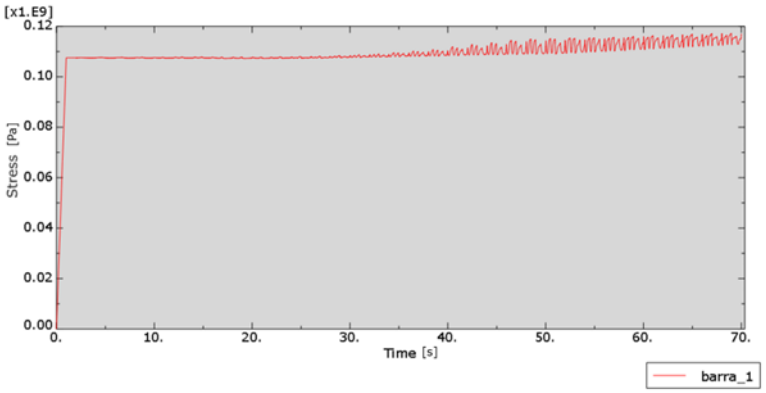
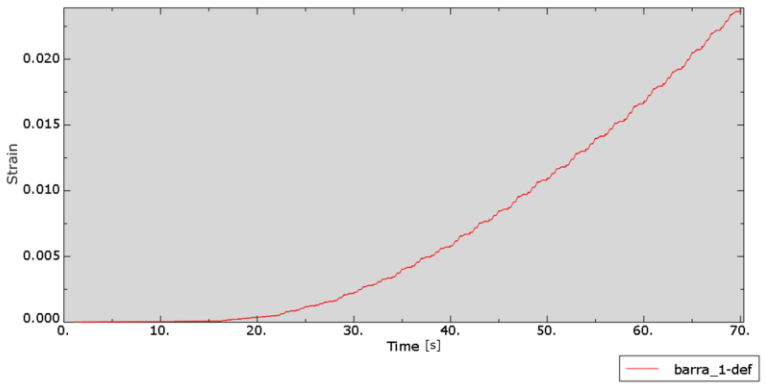
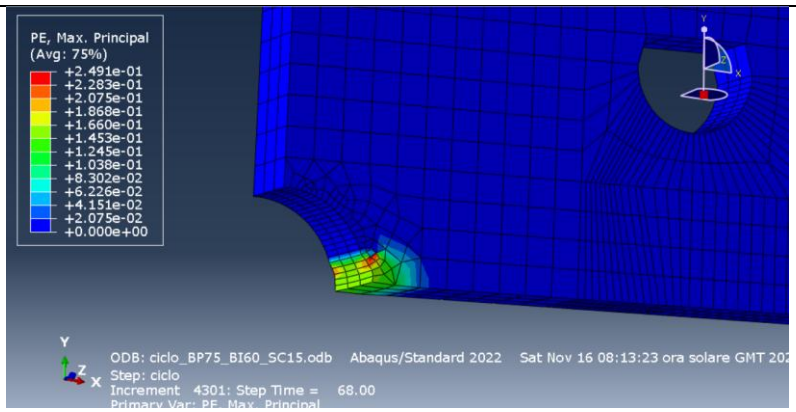
BP75_BI45_SC75

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

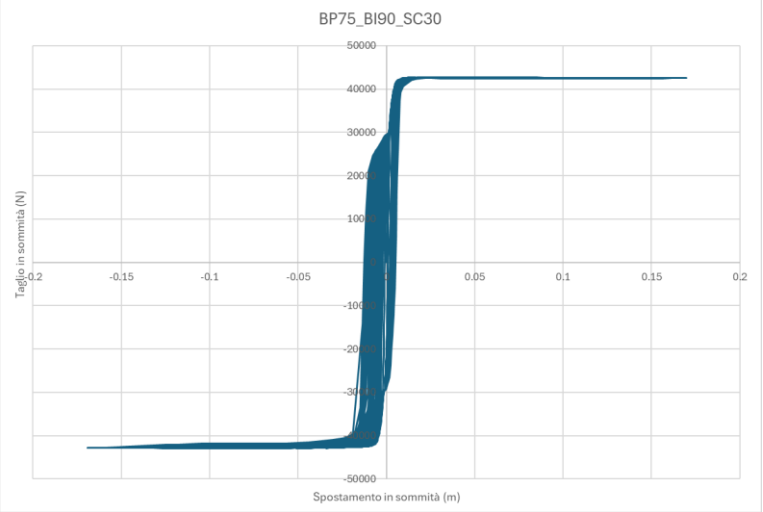
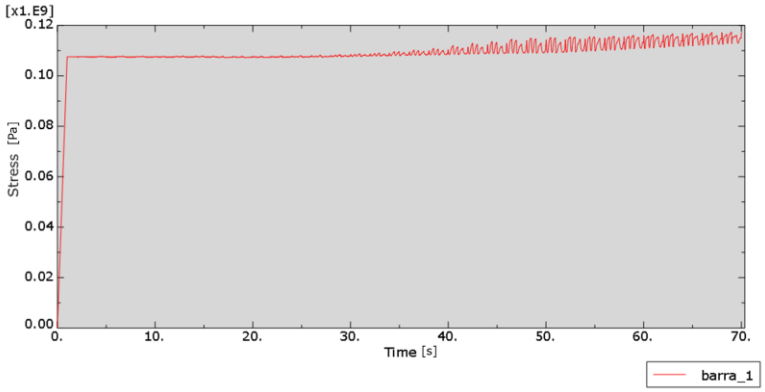
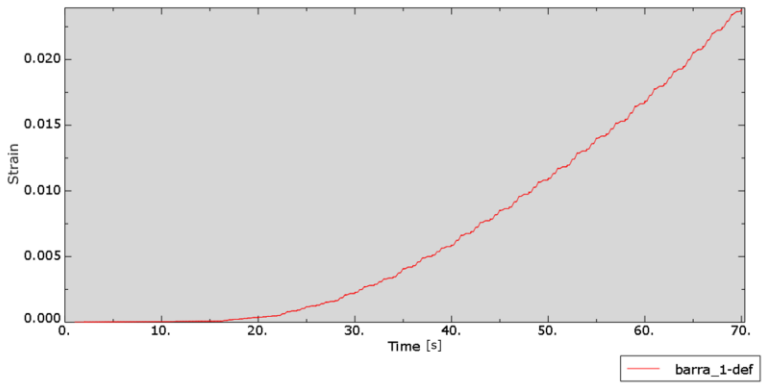
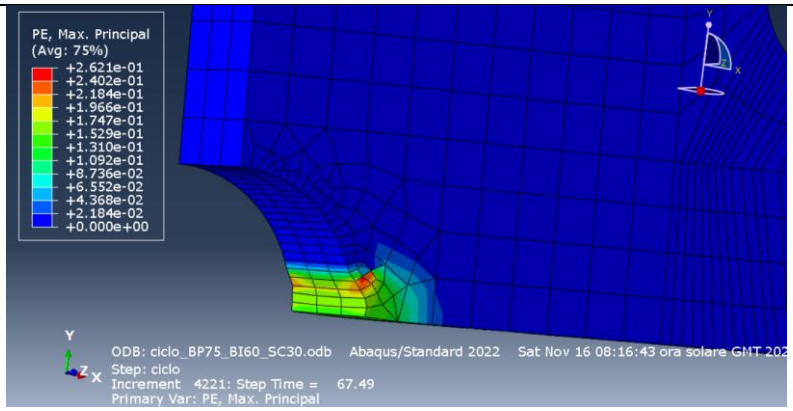
BP75_BI45_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

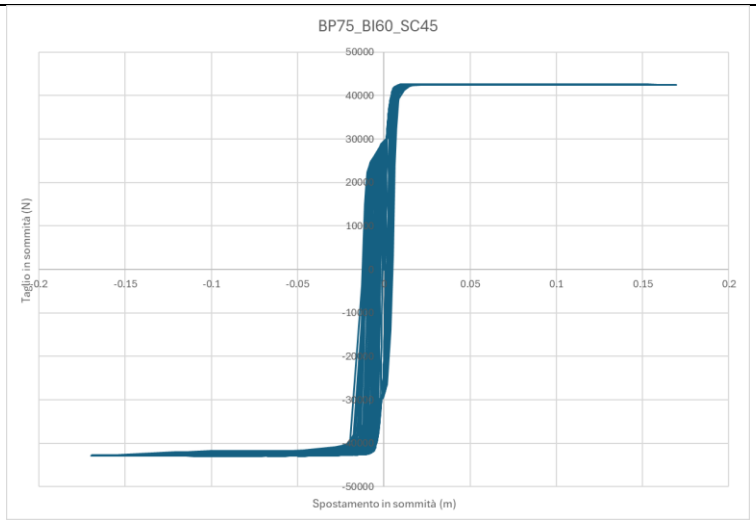
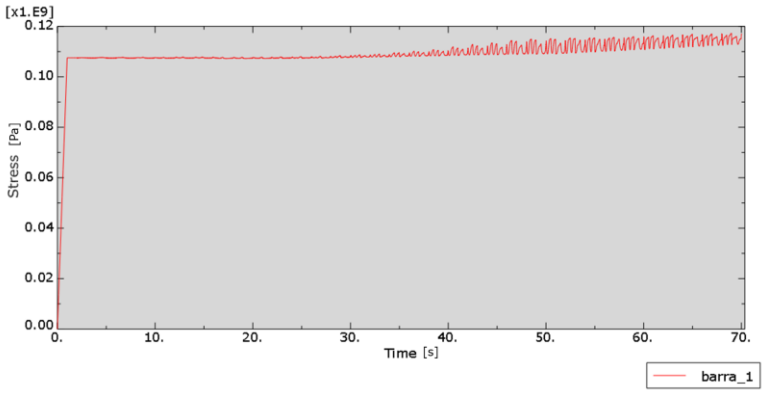
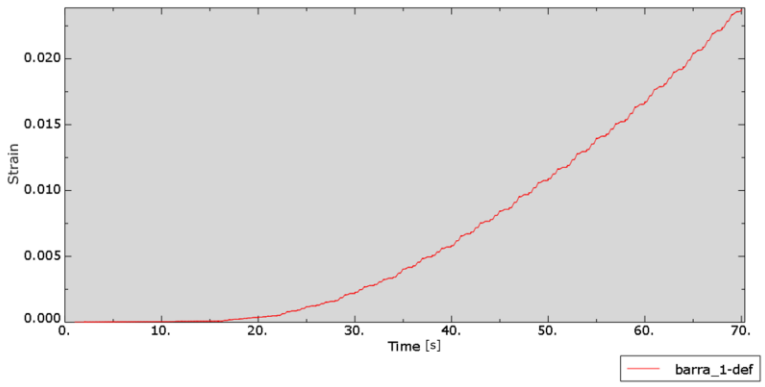
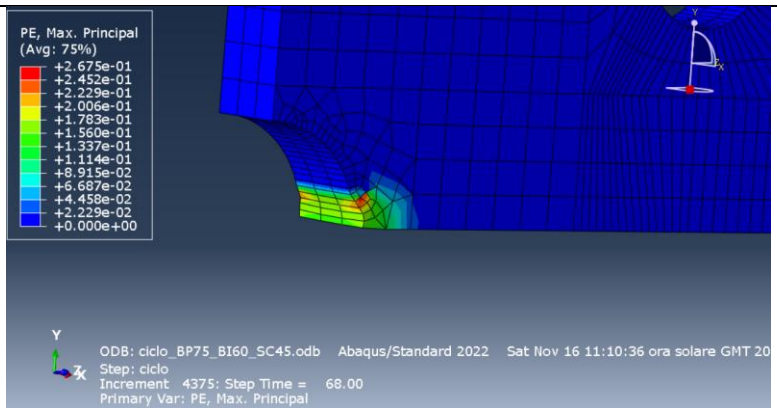
BP75_BI60_SC15

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

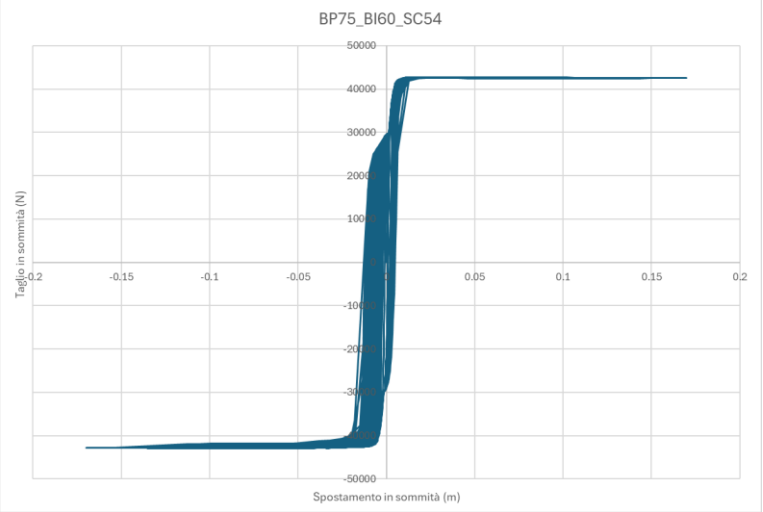
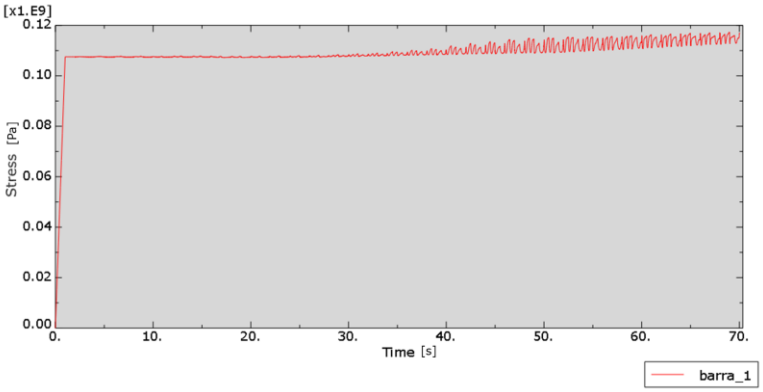
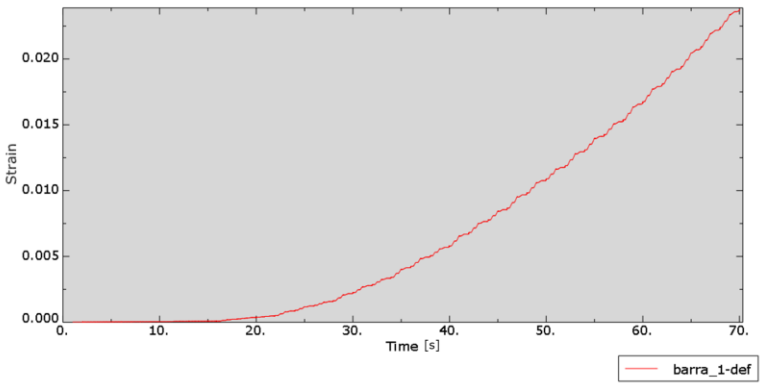
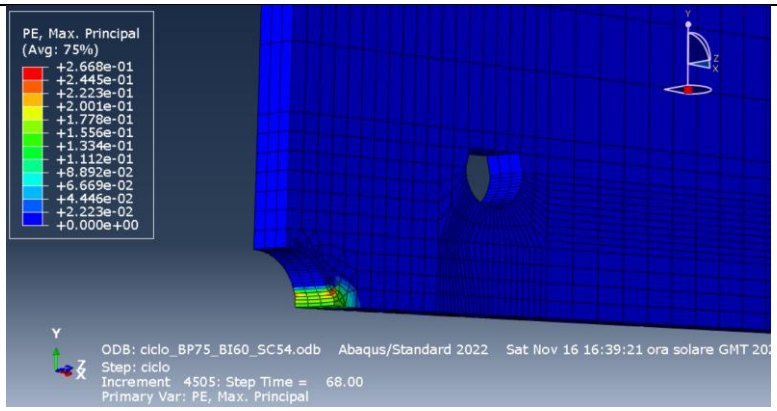
BP75_BI60_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

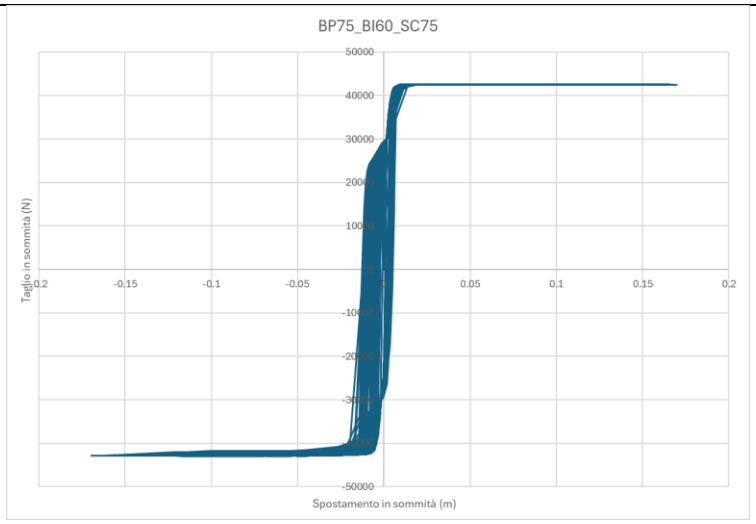
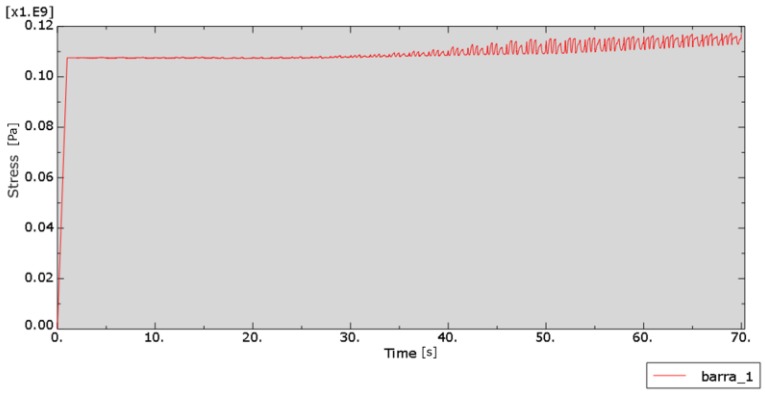
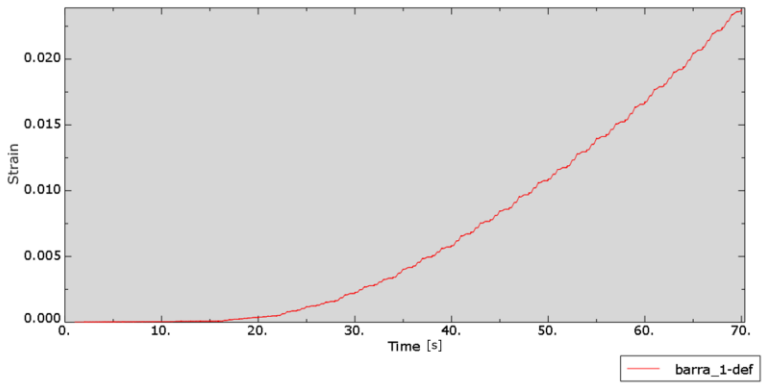
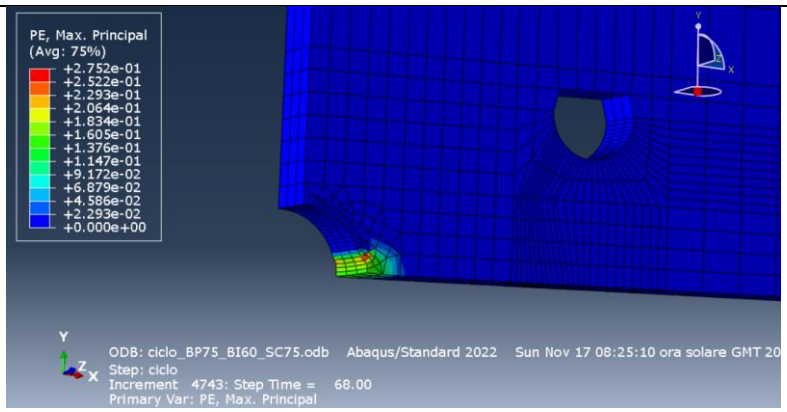
BP75_BI60_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

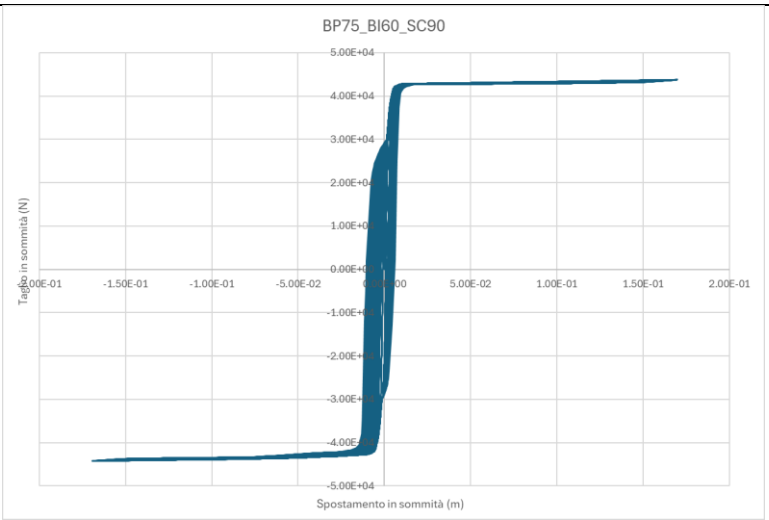
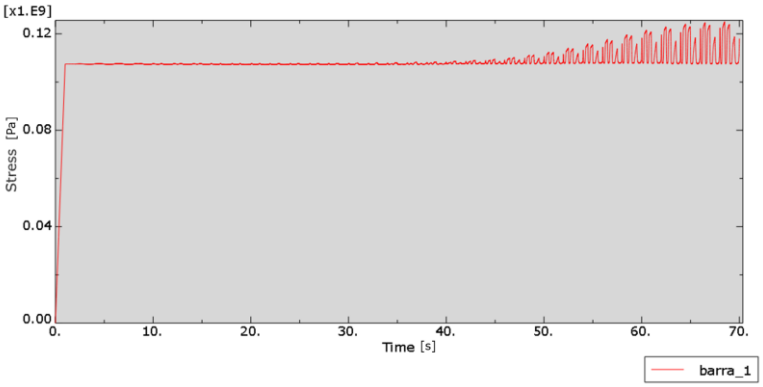
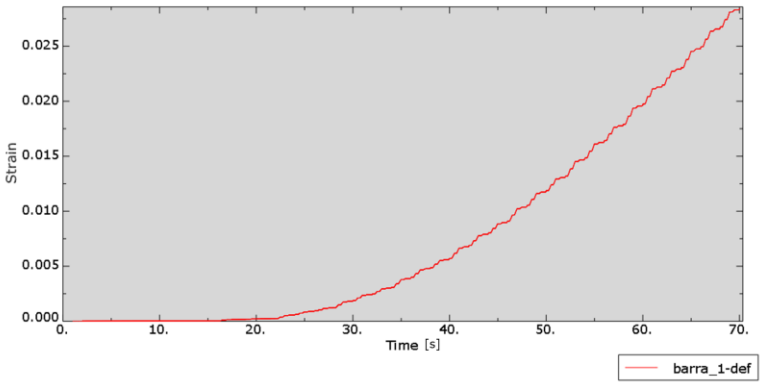
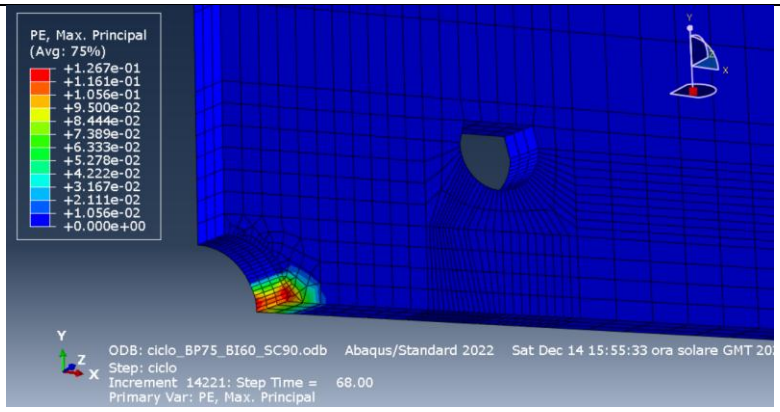
BP75_BI60_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP75_BI60_SC75

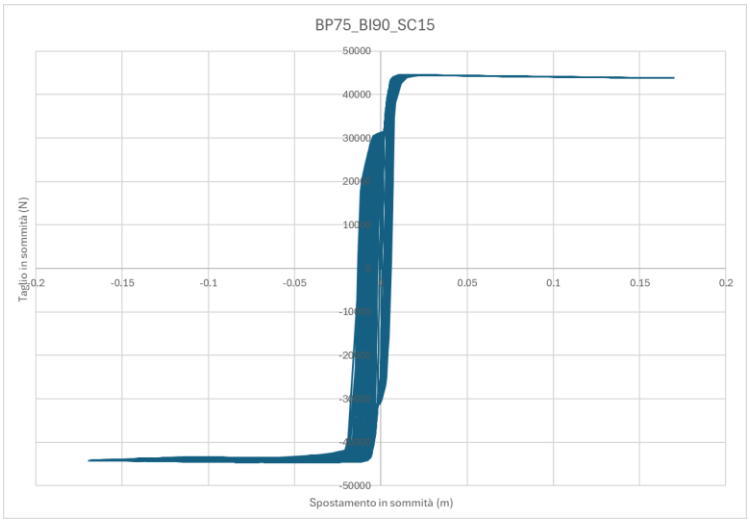
Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP75_BI60_SC90

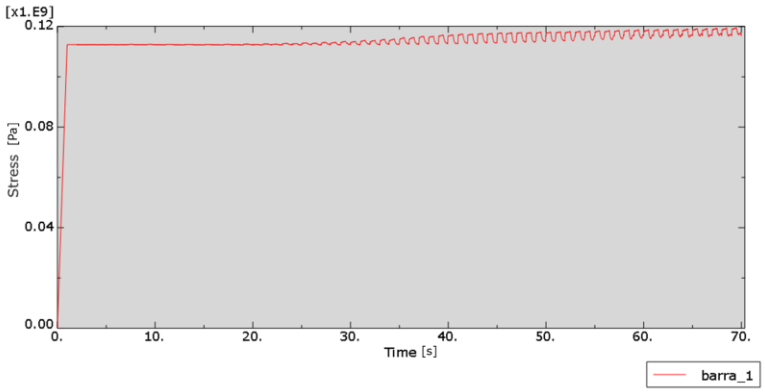
Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP75_BI90_SC15

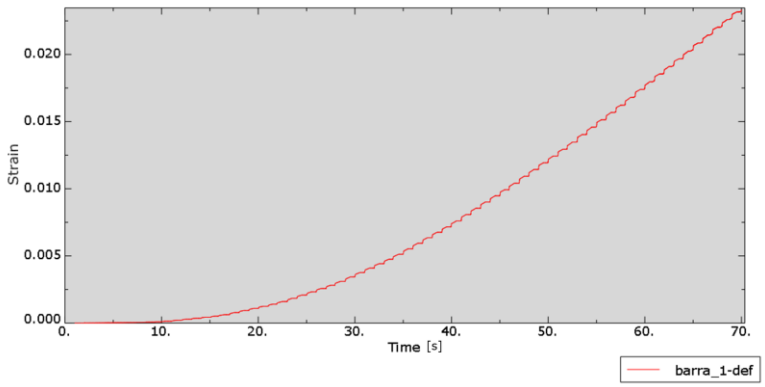
Analisi ciclica forza-spostamento



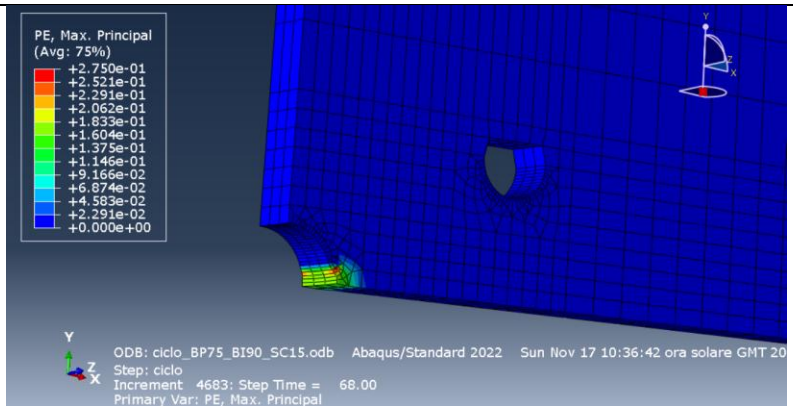
Andamento medio tensioni barra



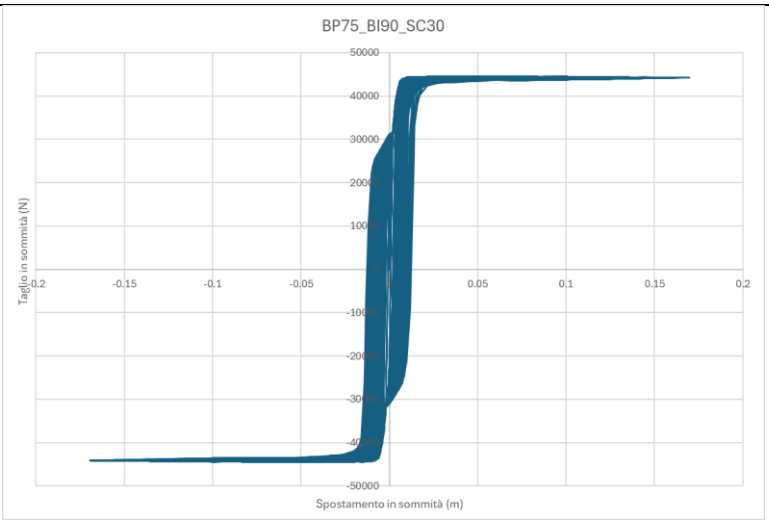
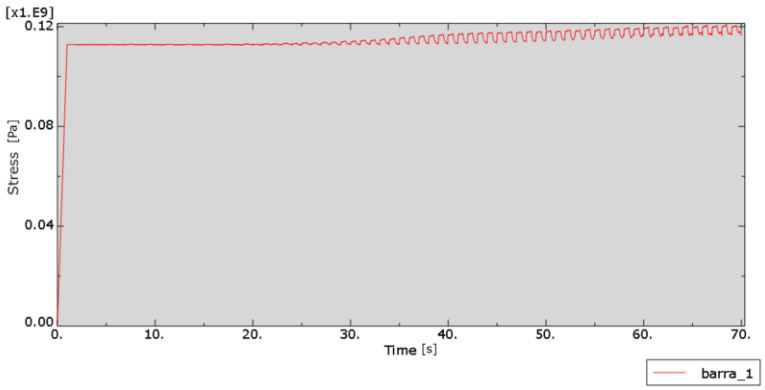
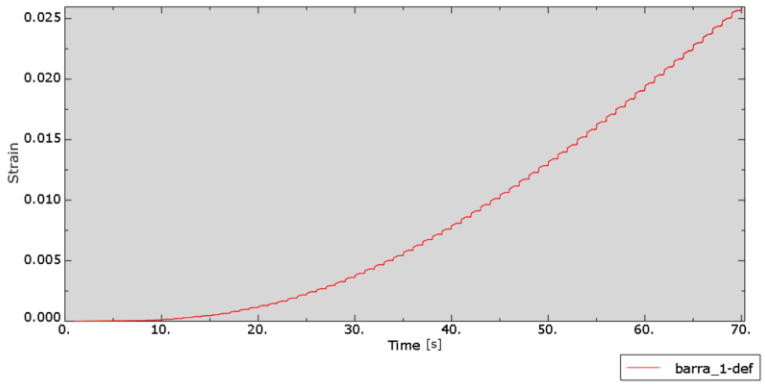
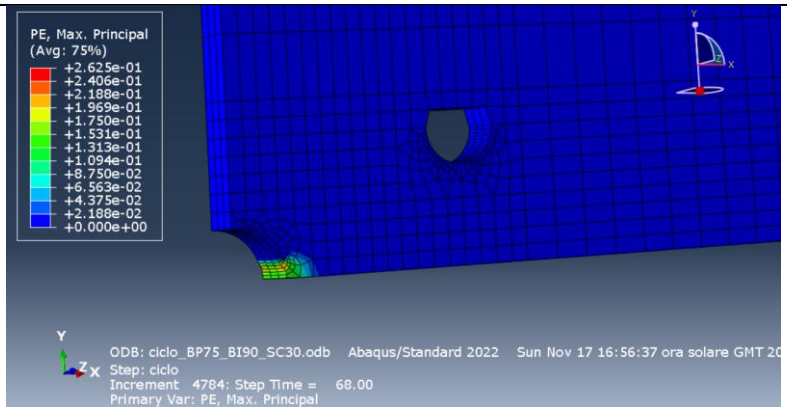
Andamento medio deformazioni barra



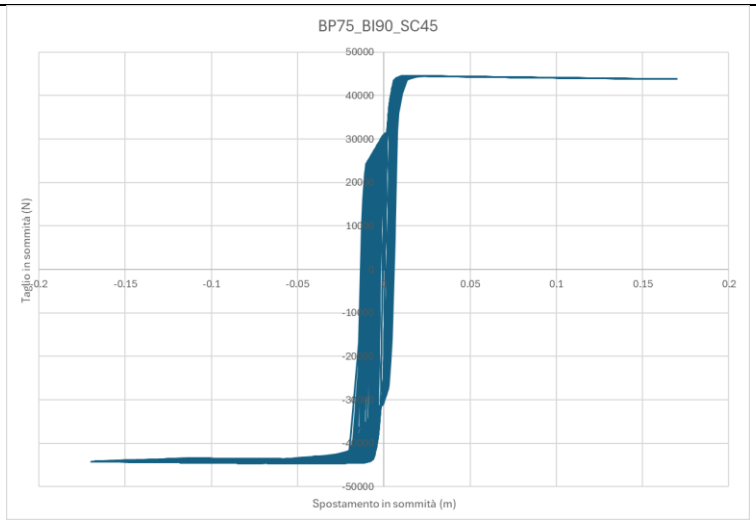
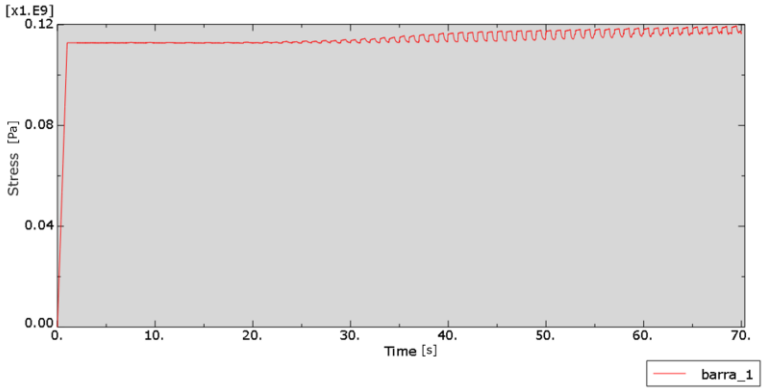
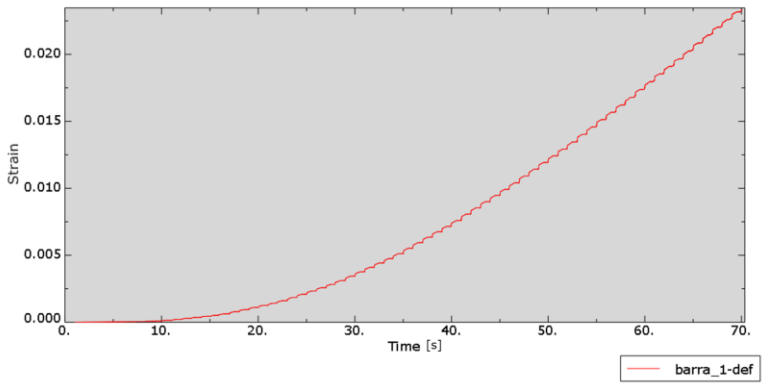
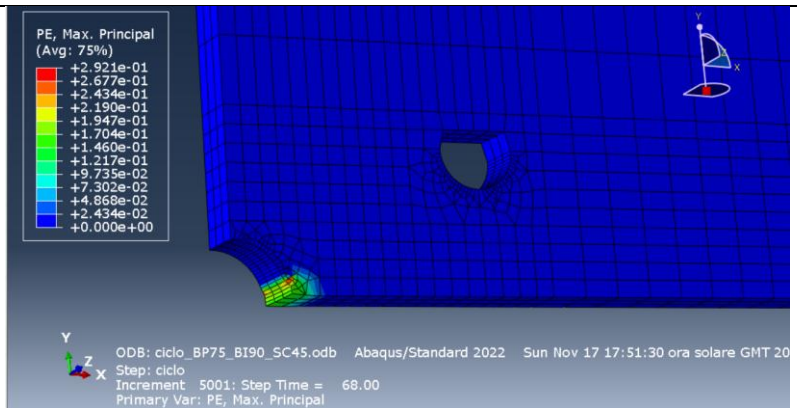
Danneggiamento pannello a fine analisi



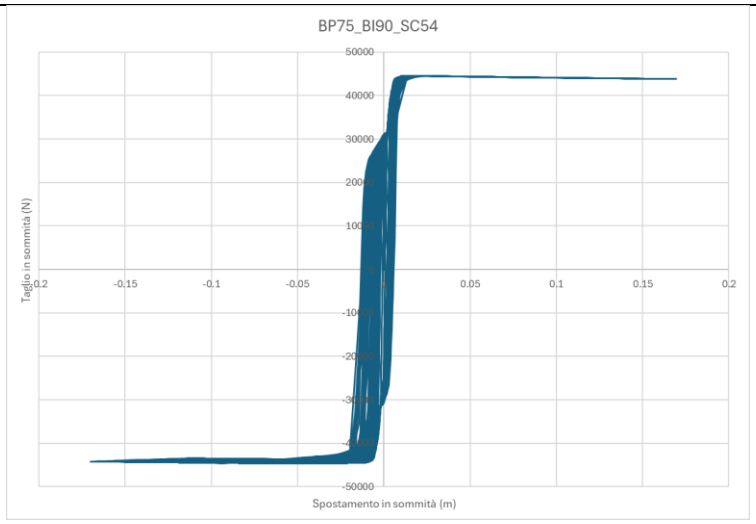
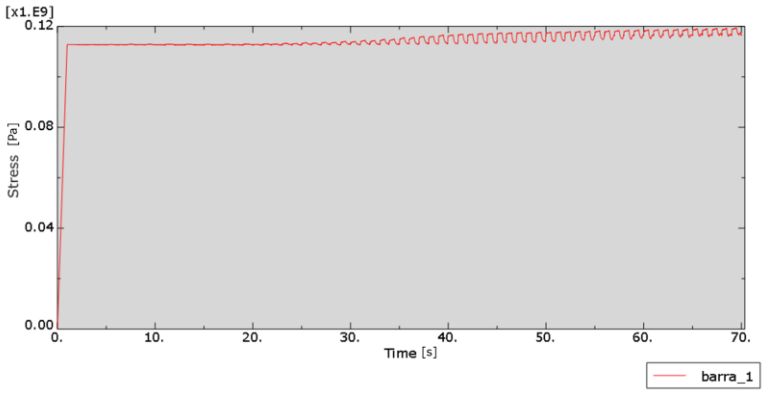
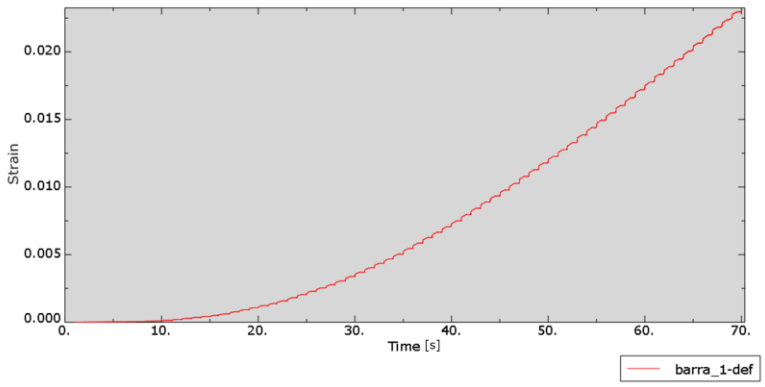
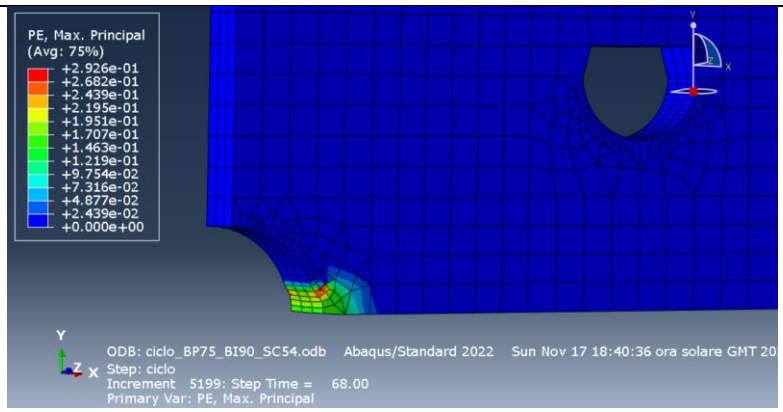
BP75_BI90_SC30

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

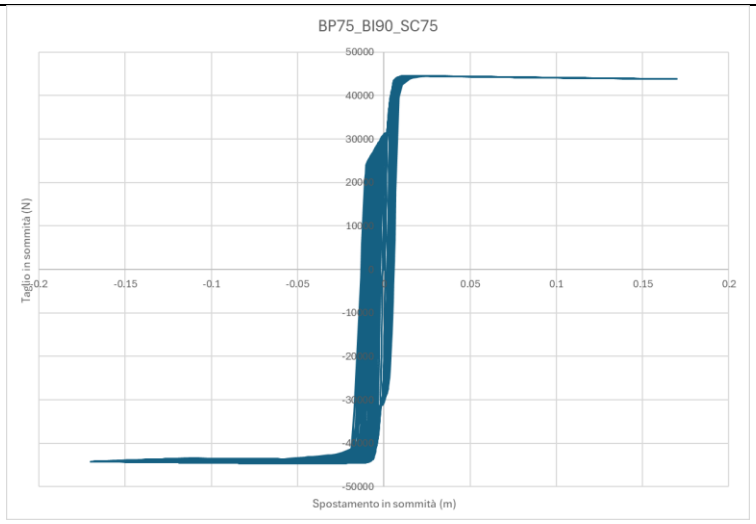
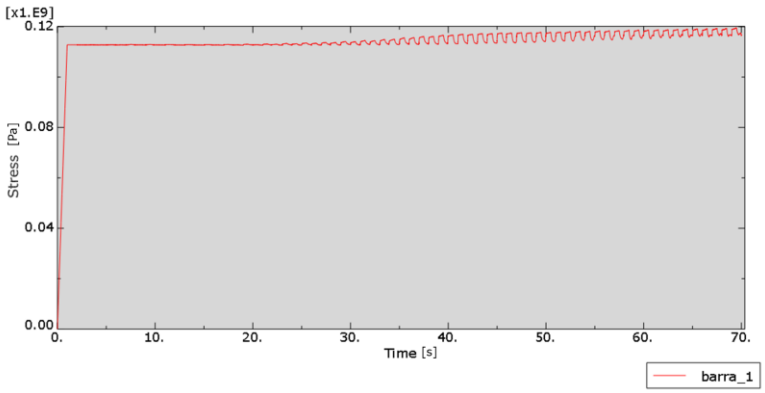
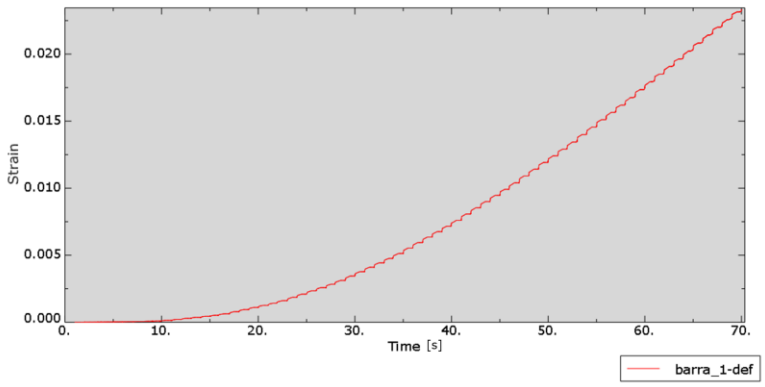
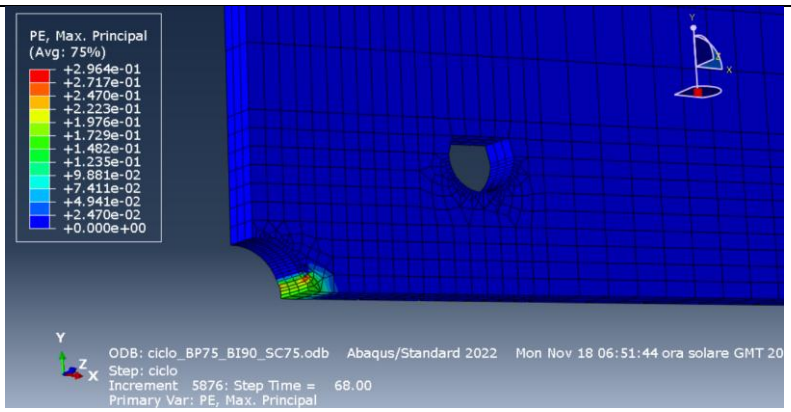
BP75_BI90_SC45

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

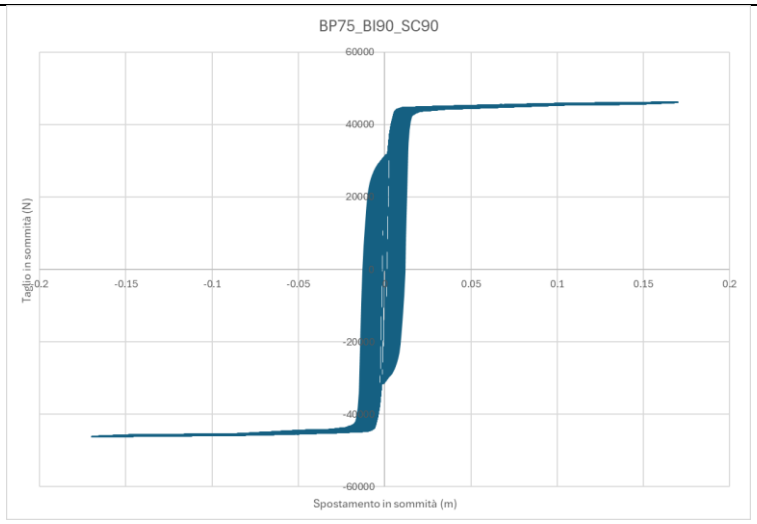
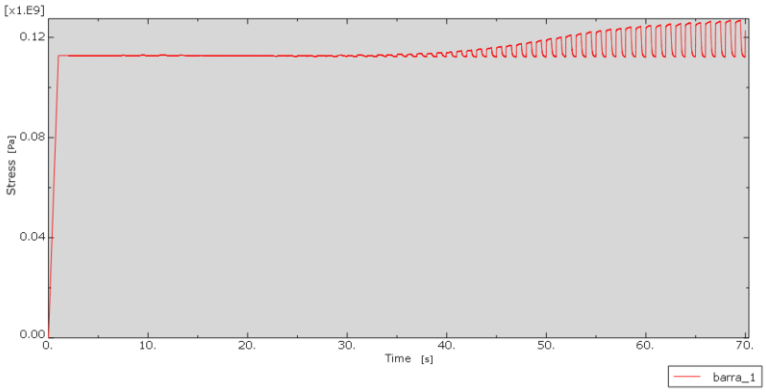
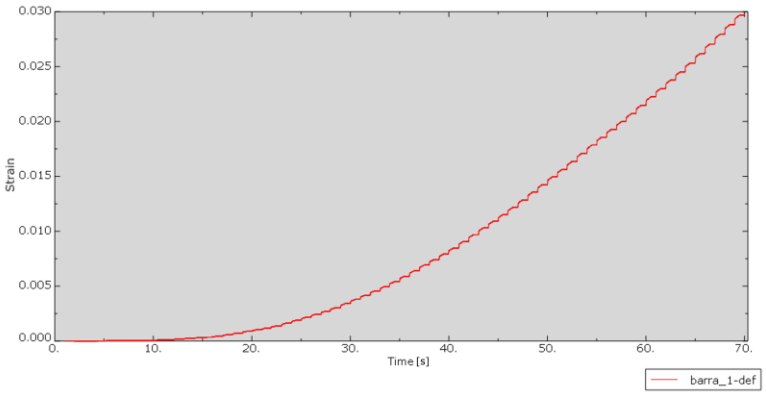
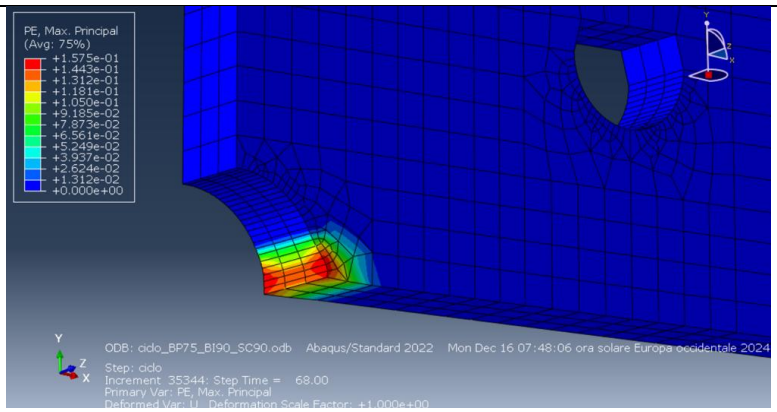
BP75_BI90_SC54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP75_BI90_SC75

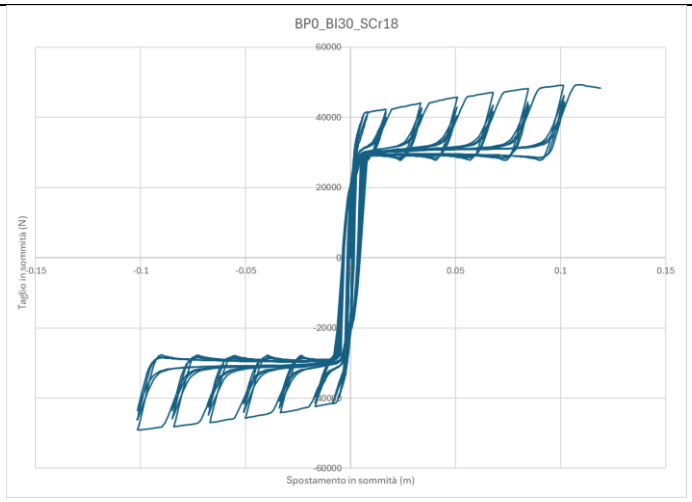
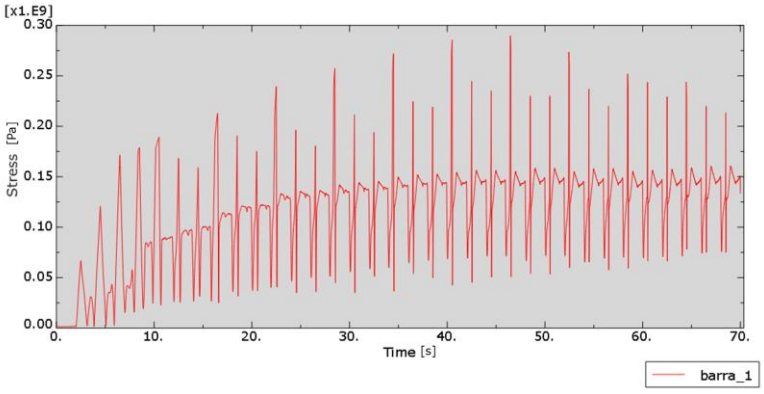
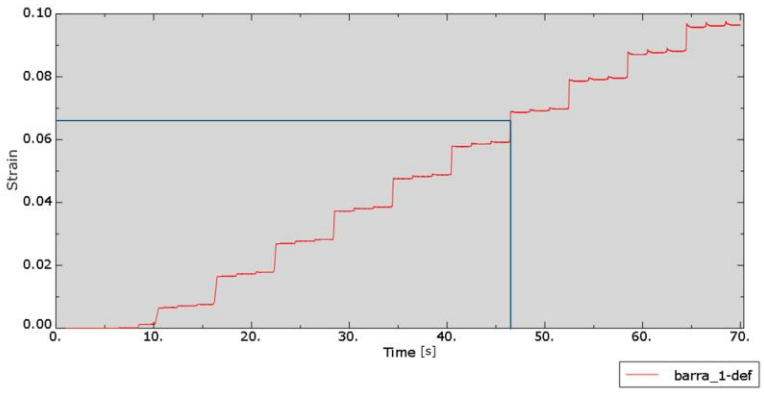
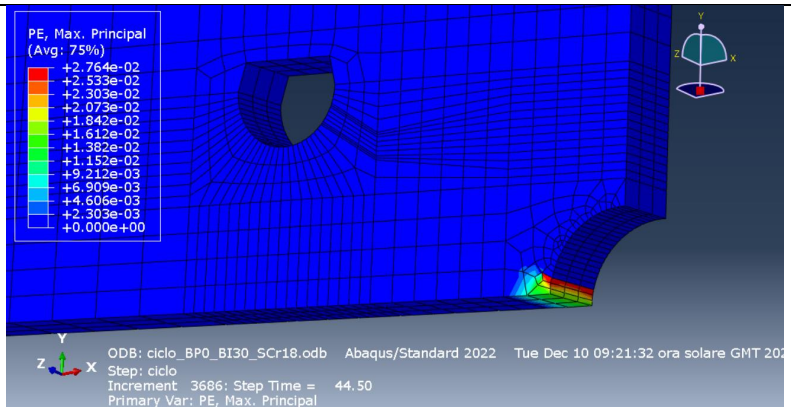
Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP75_BI90_SC90

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

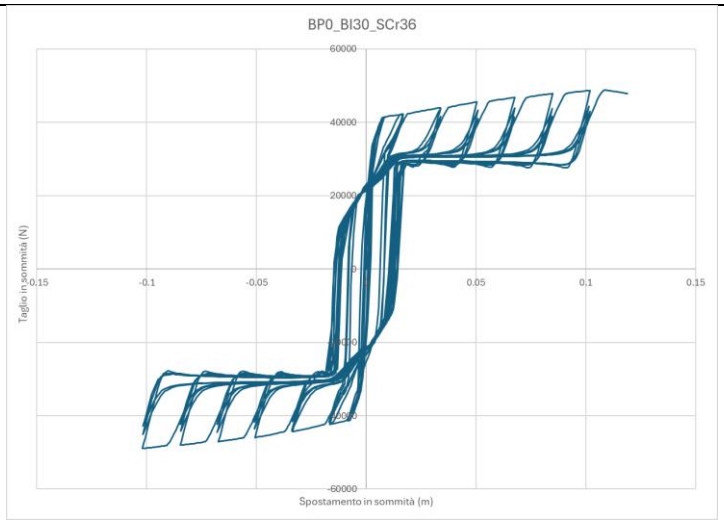
9 ALLEGATO B: Risultati prototipo a doppia curvatura

BP0_BI30_SCr18

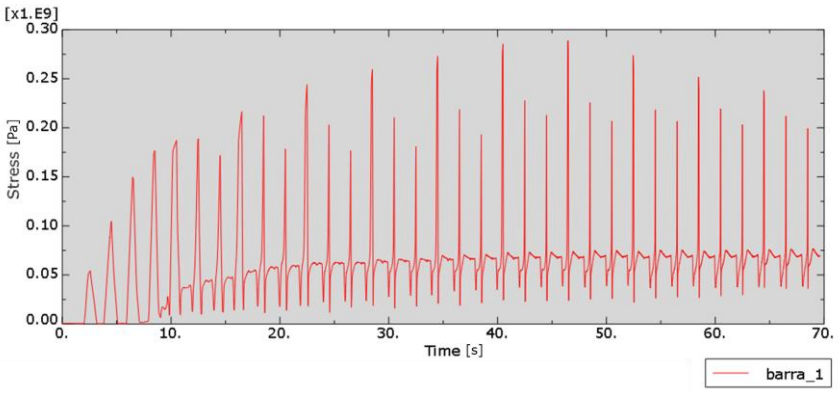
Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP0_BI30_SCr36

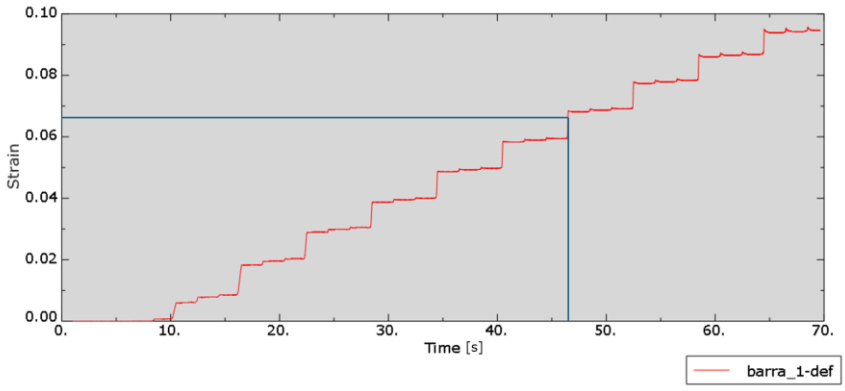
Analisi ciclica forza-spostamento



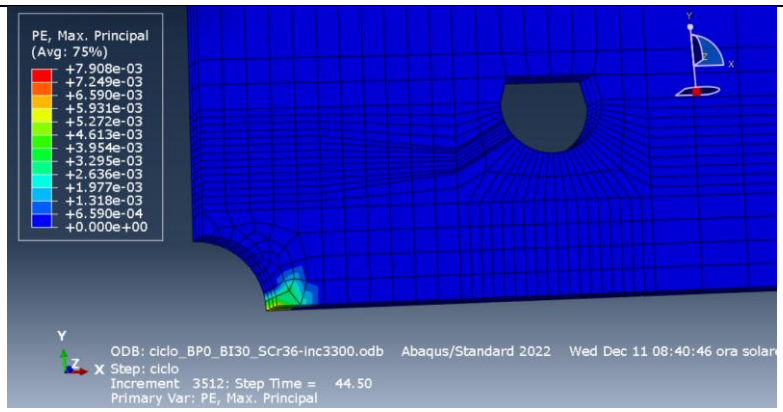
Andamento medio tensioni barra



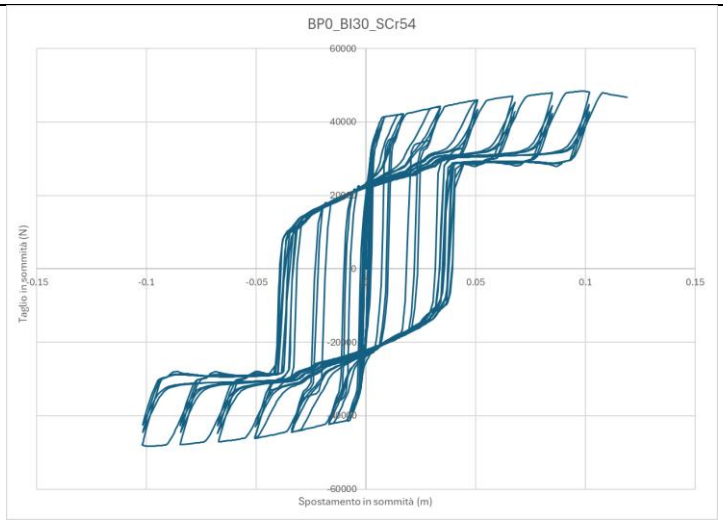
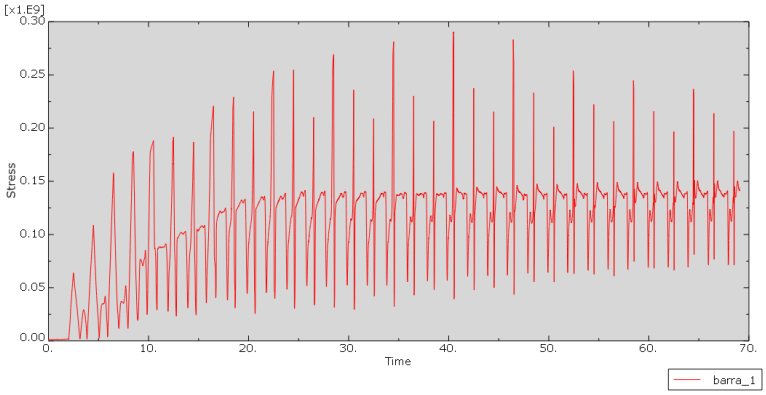
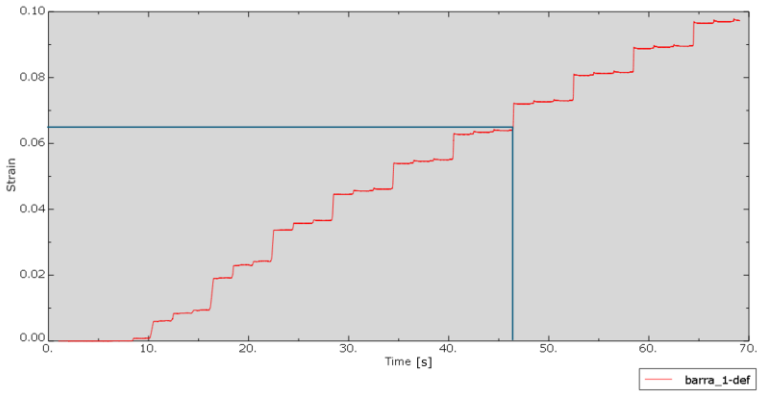
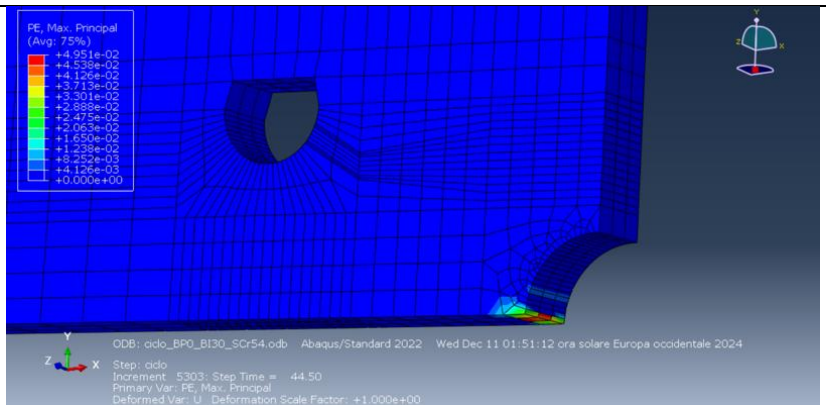
Andamento medio deformazioni barra



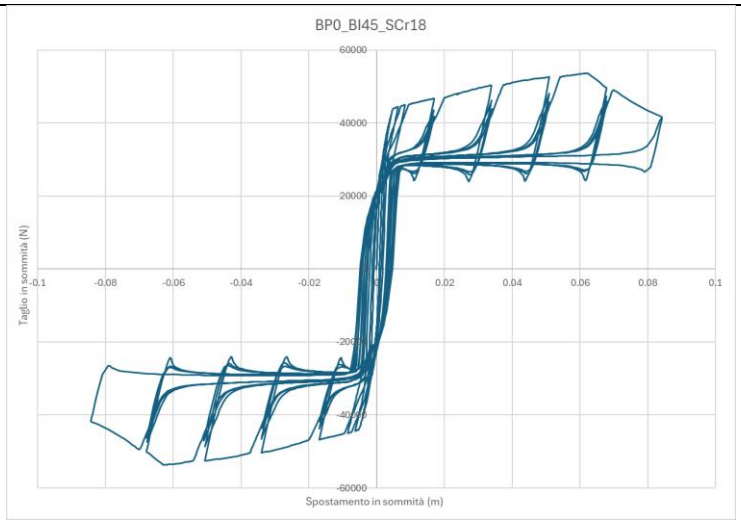
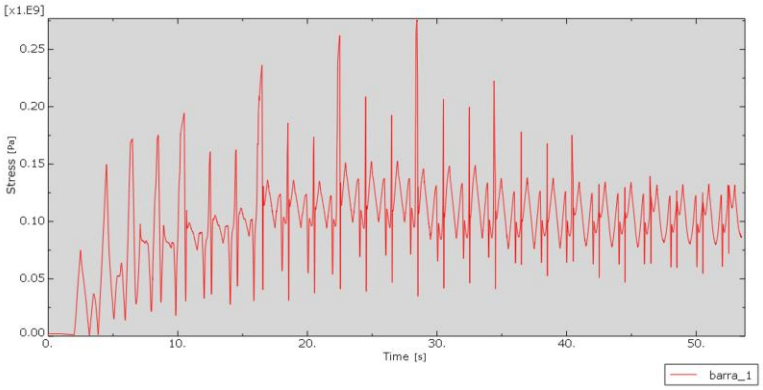
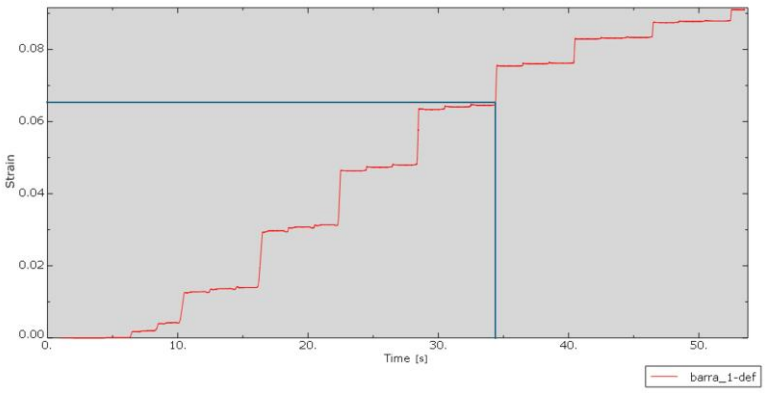
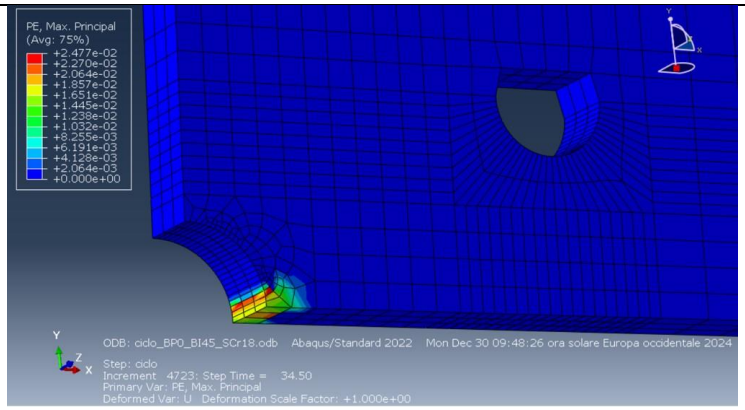
Danneggiamento pannello a fine analisi



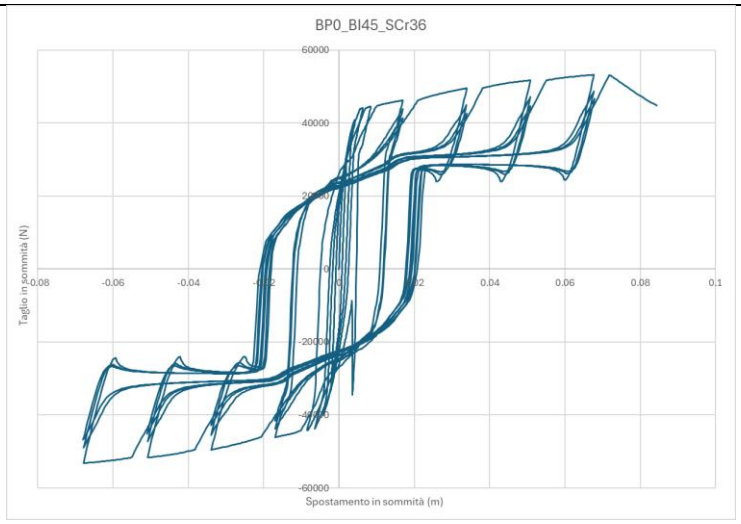
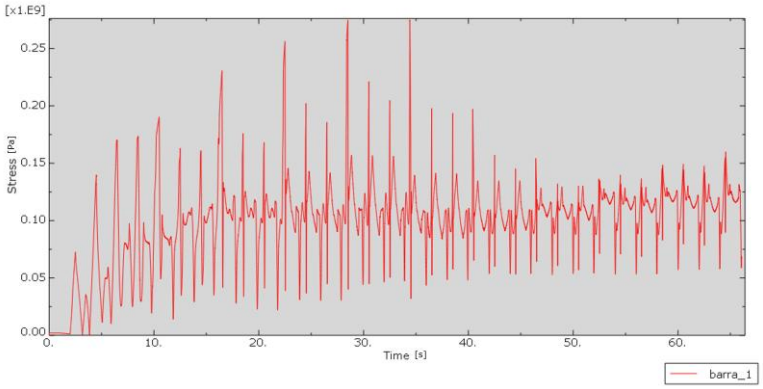
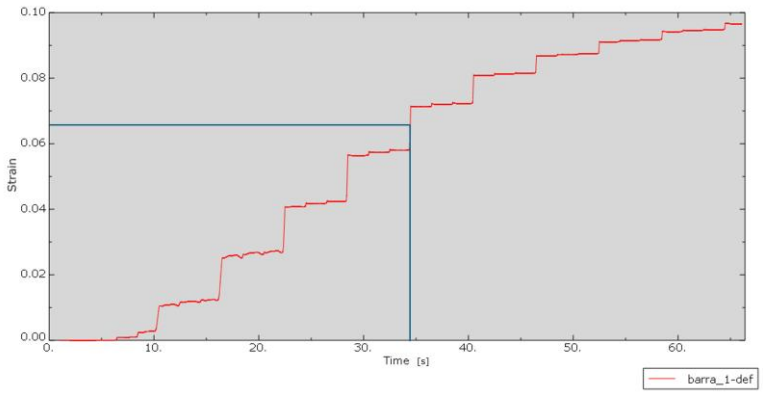
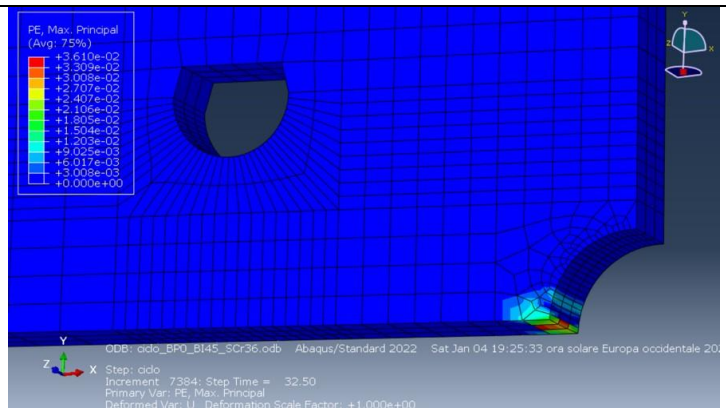
BP0_BI30_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

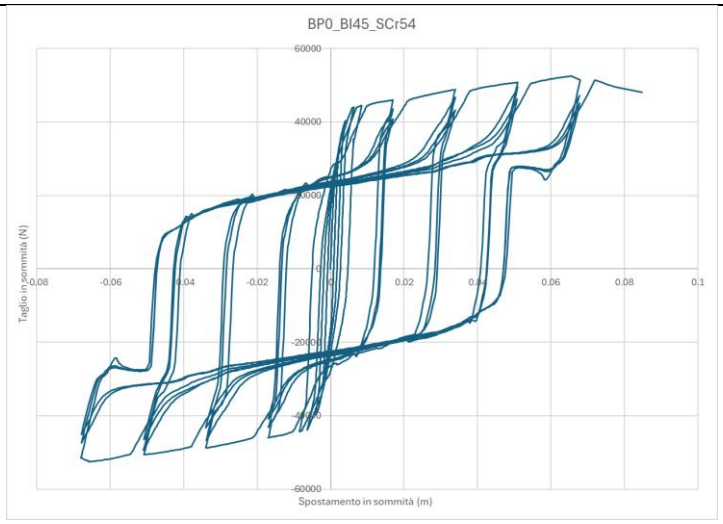
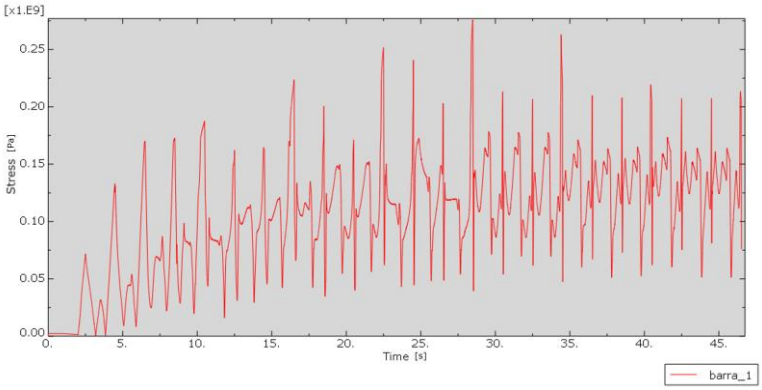
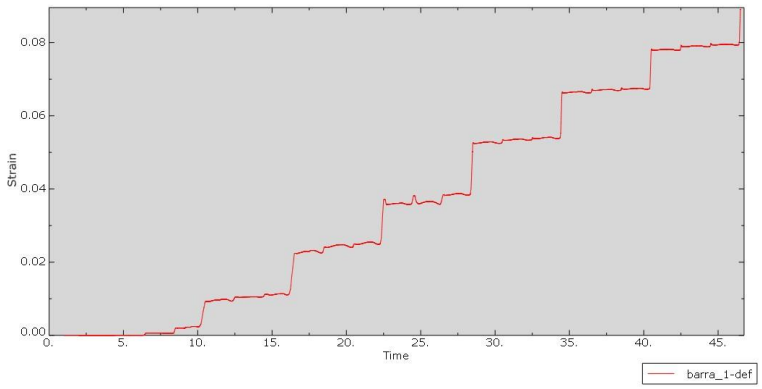
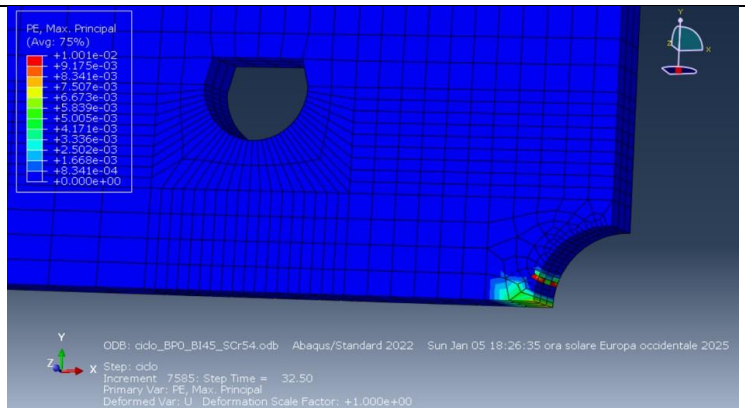
BP0_BI45_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

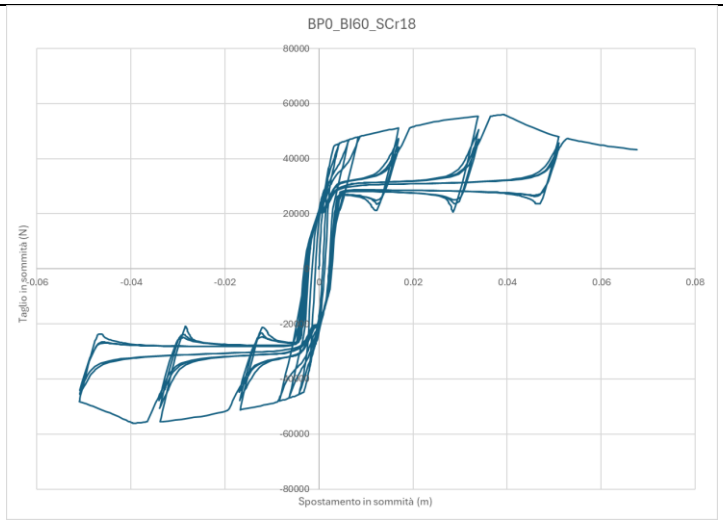
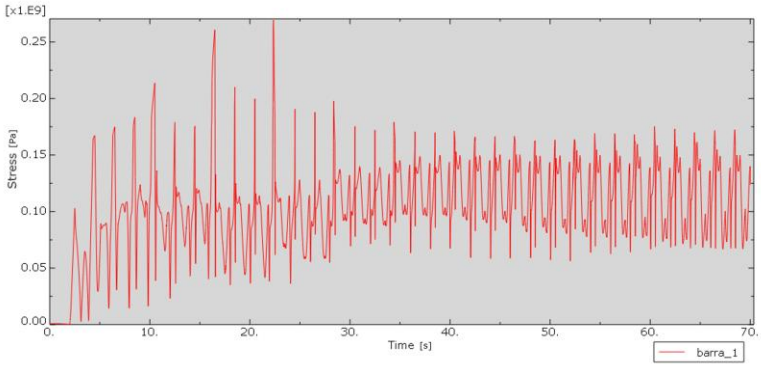
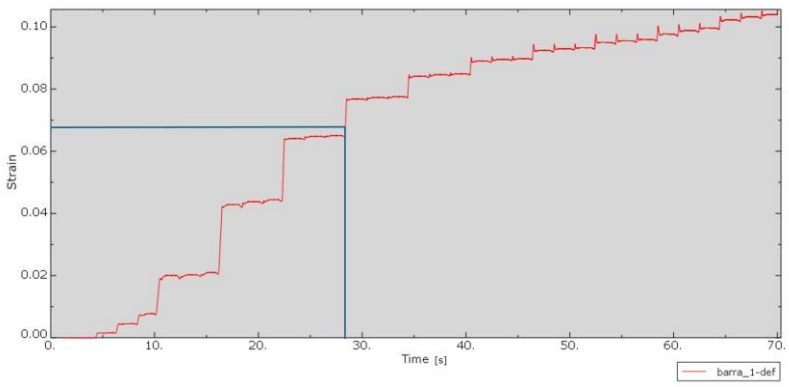
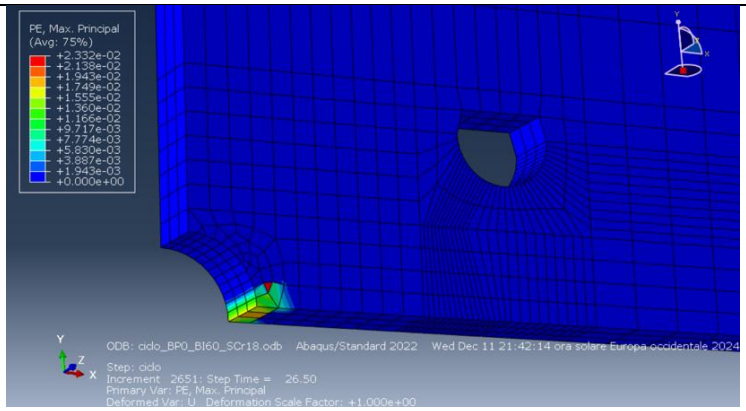
BP0_BI45_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

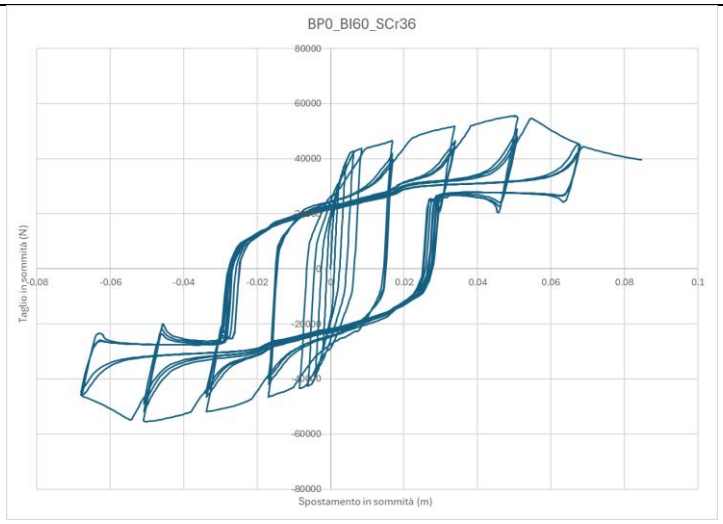
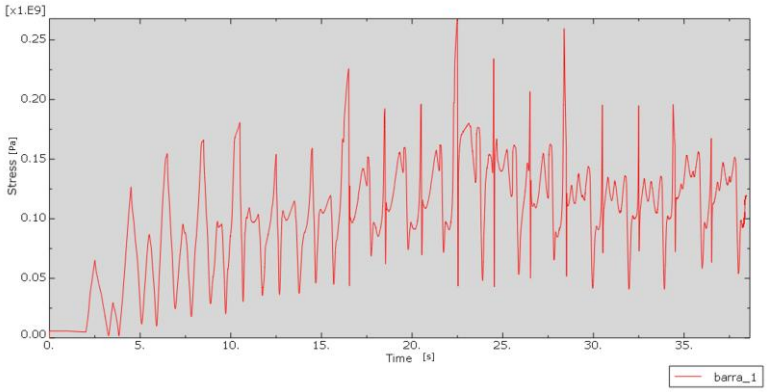
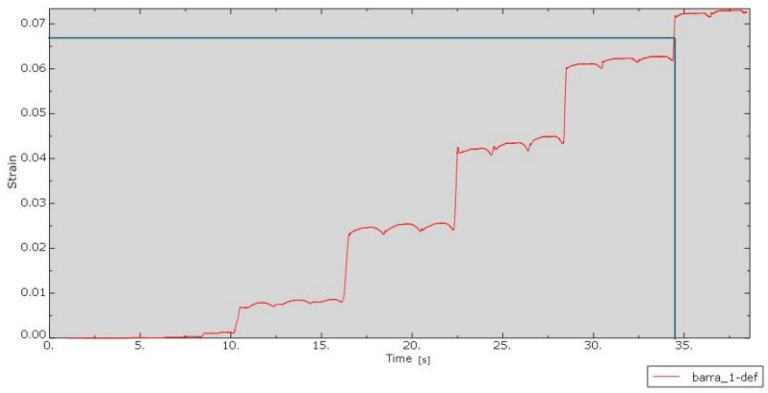
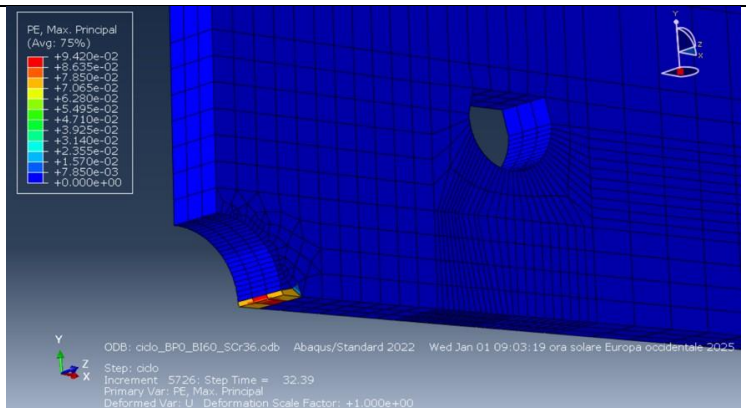
BP0_BI45_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

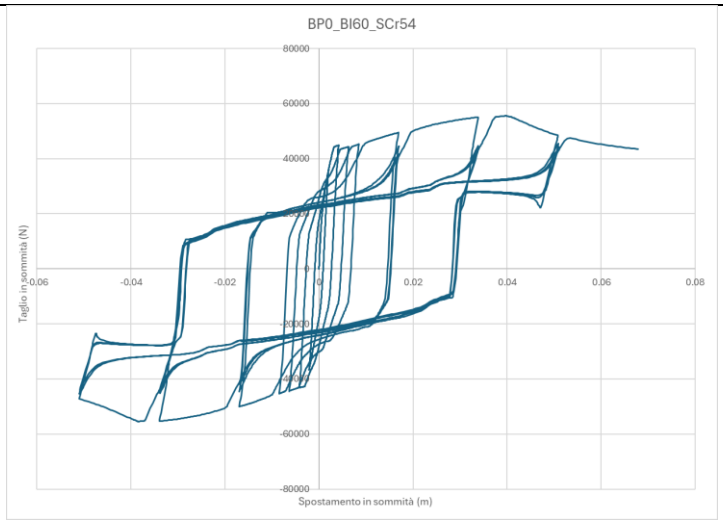
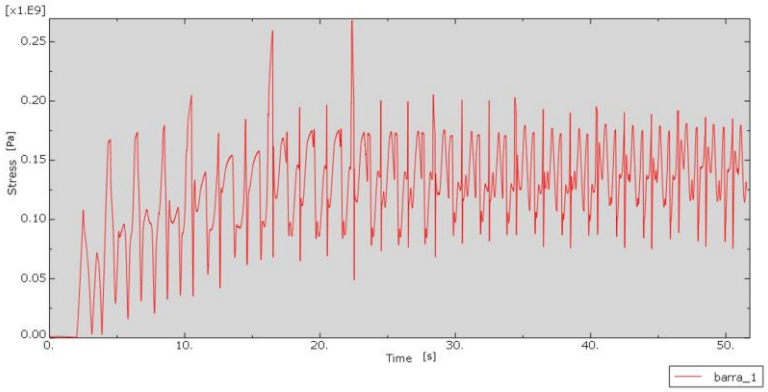
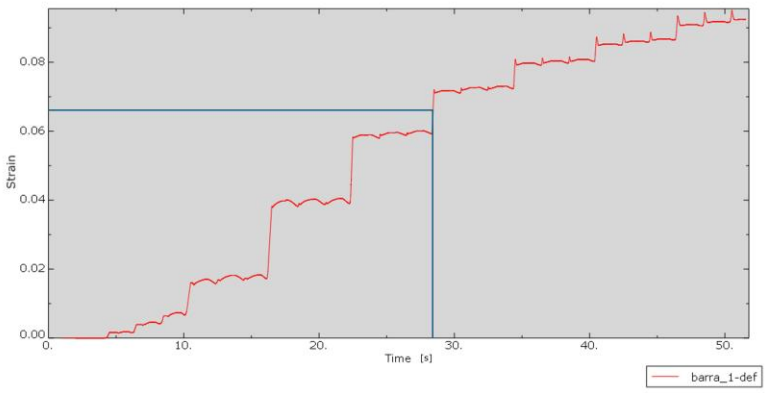
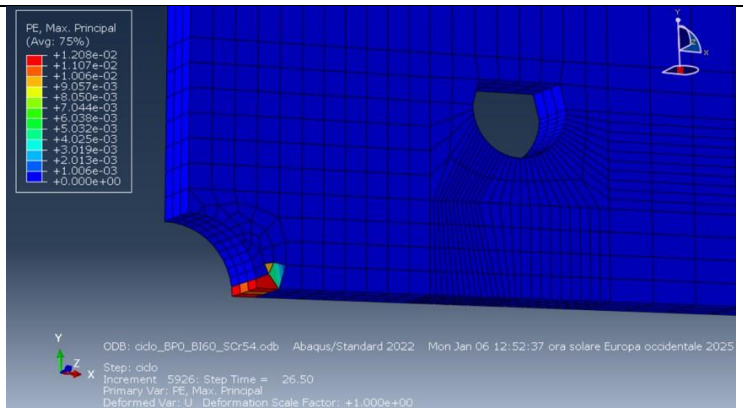
BP0_BI60_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

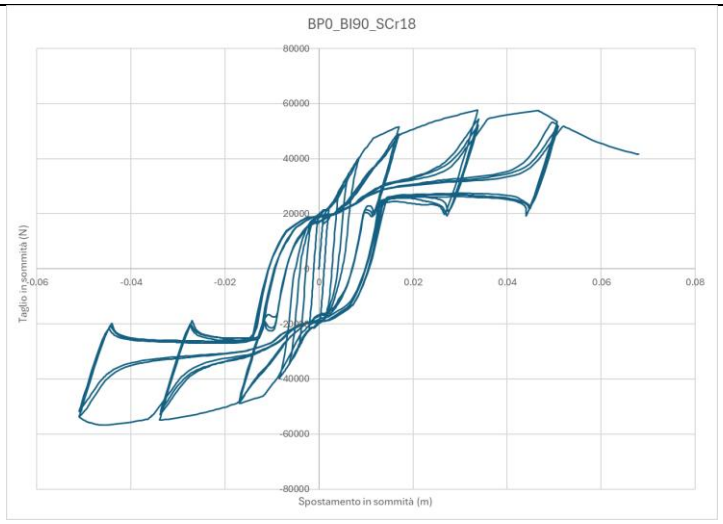
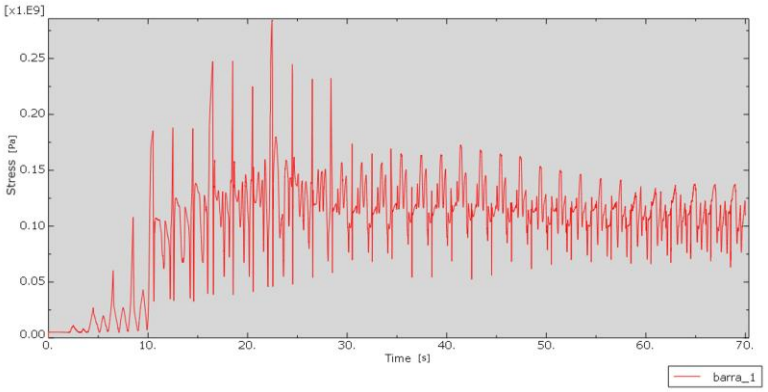
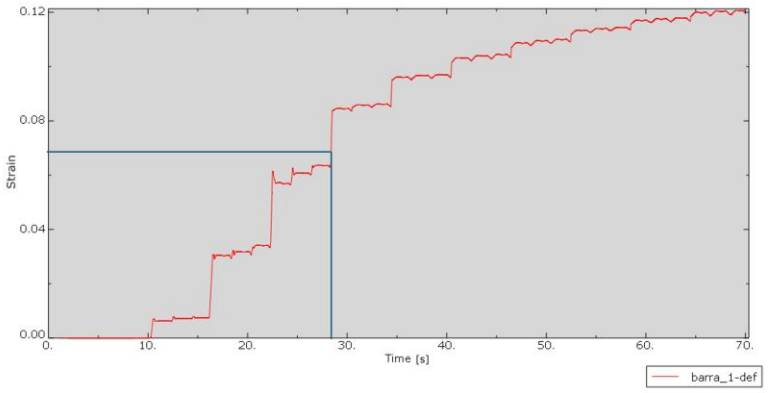
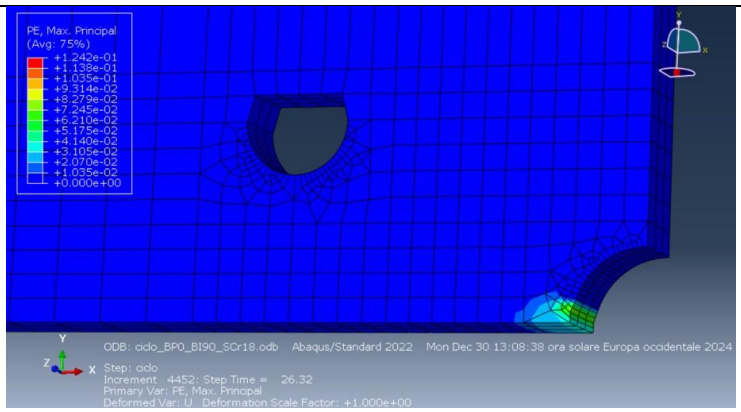
BP0_BI60_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

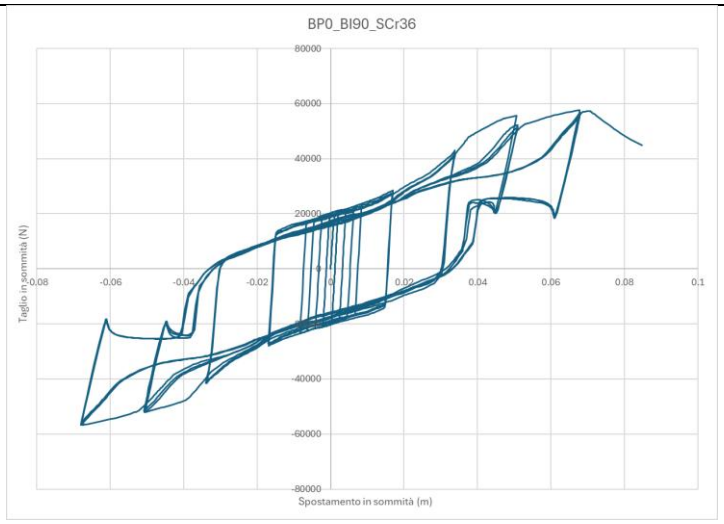
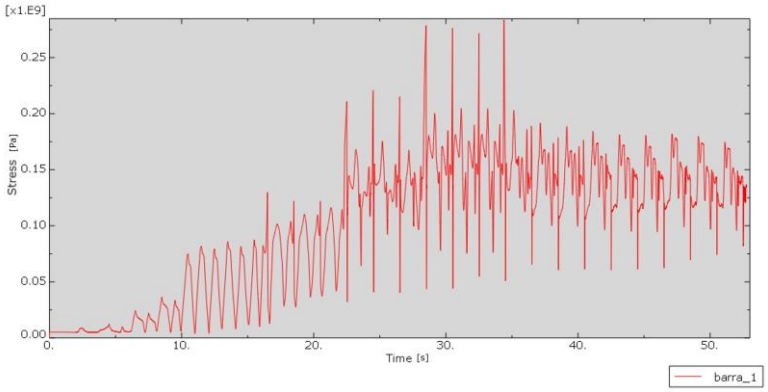
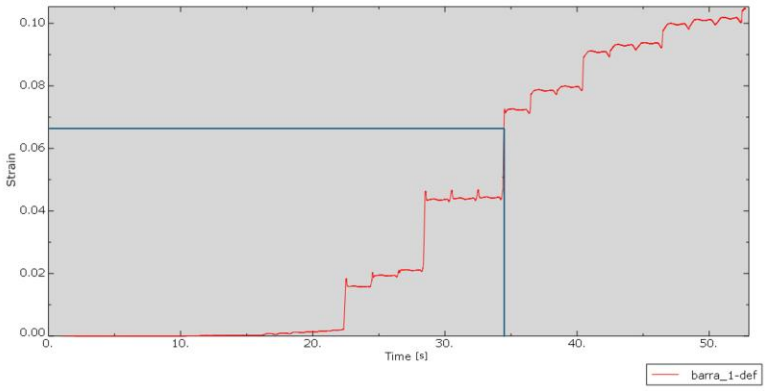
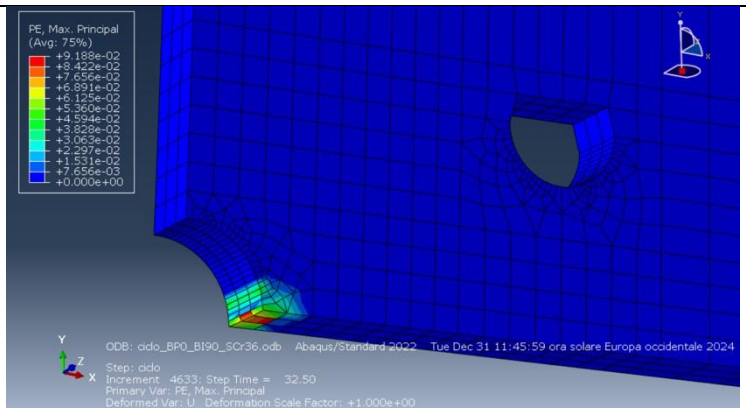
BP0_BI60_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

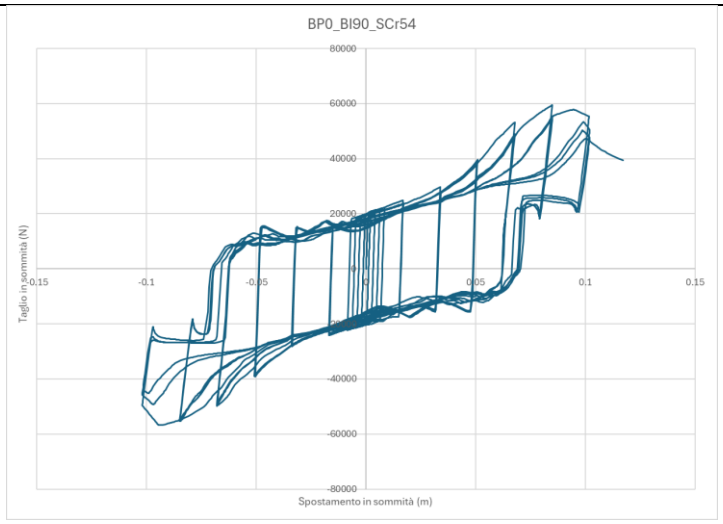
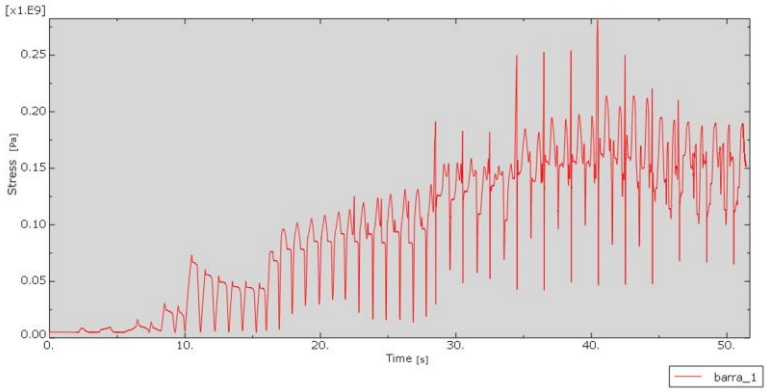
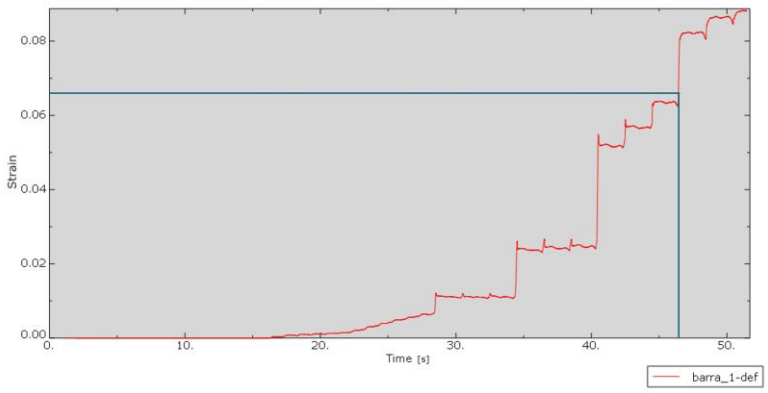
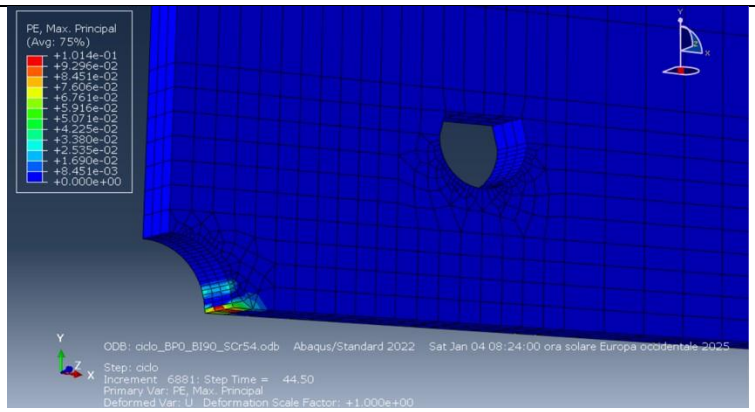
BP0_BI90_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

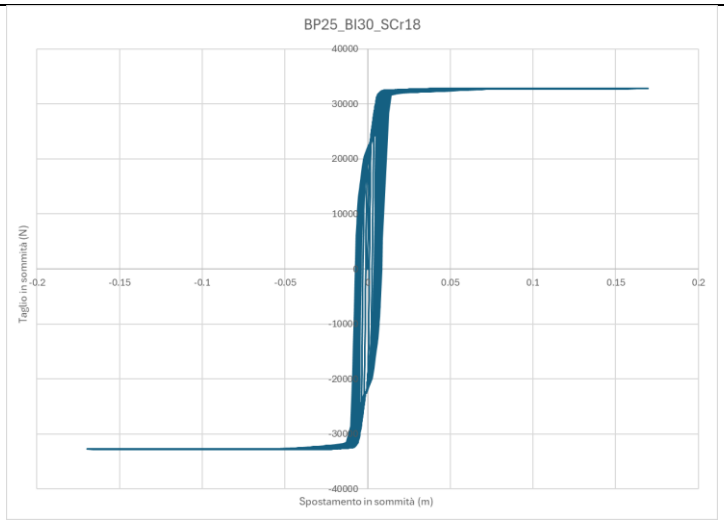
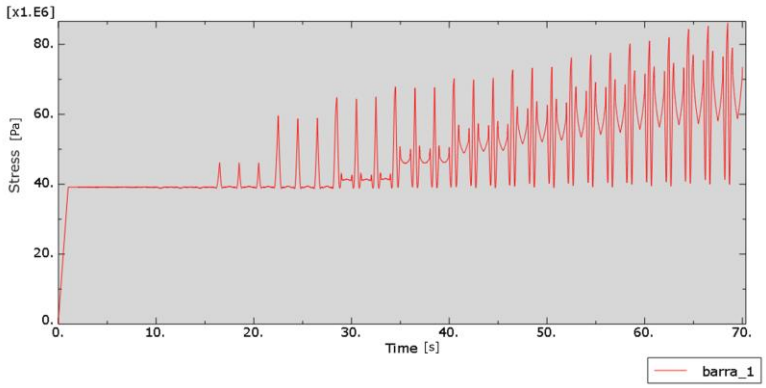
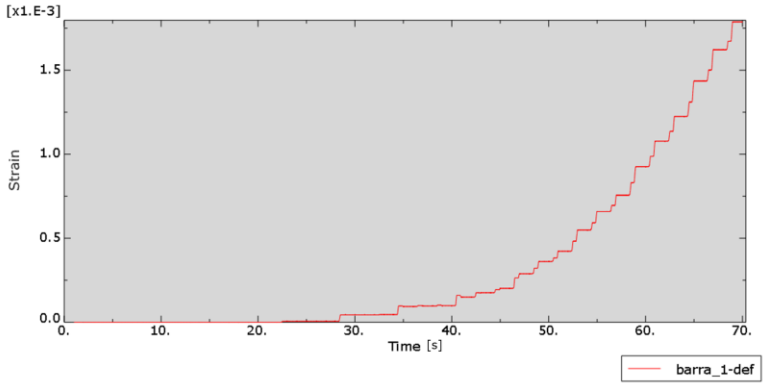
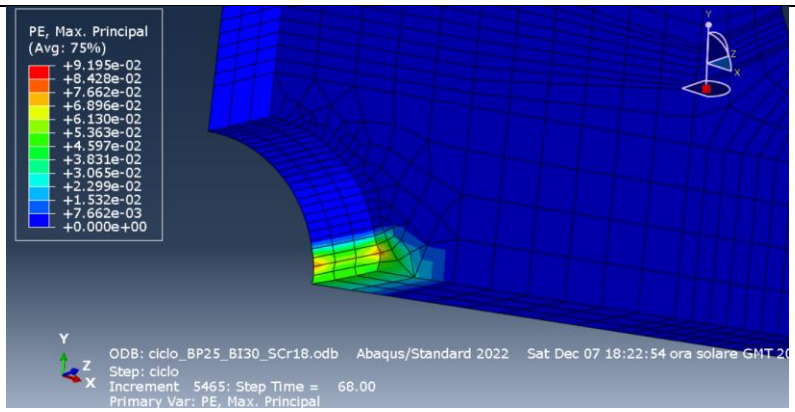
BP0_BI90_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

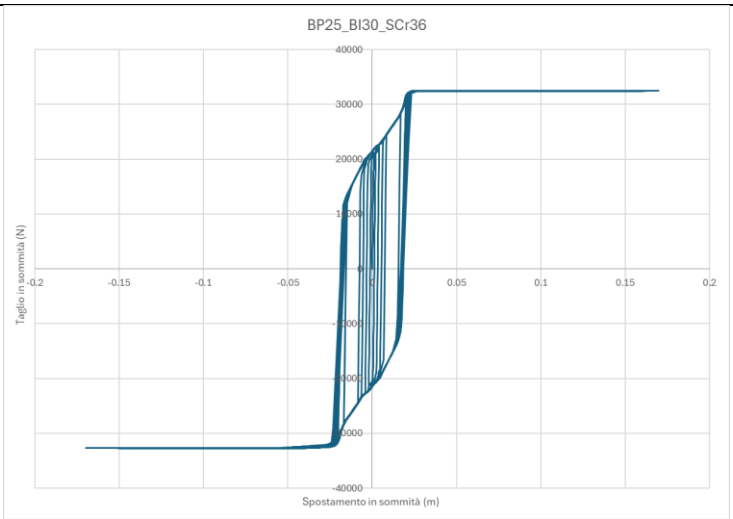
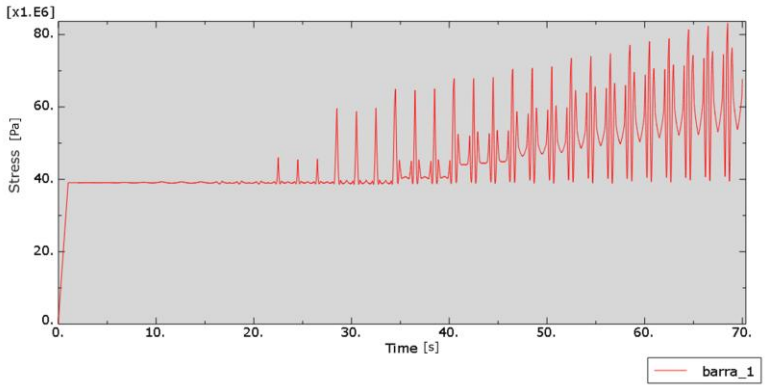
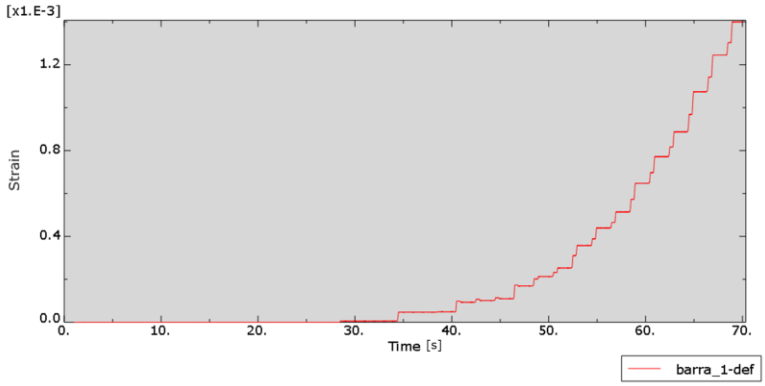
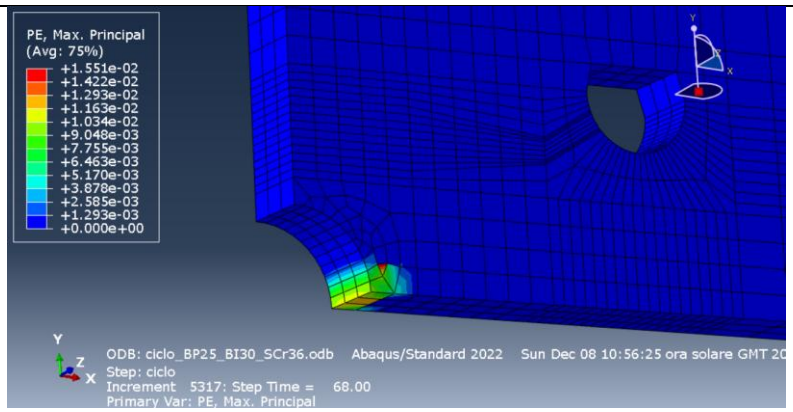
BP0_BI90_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

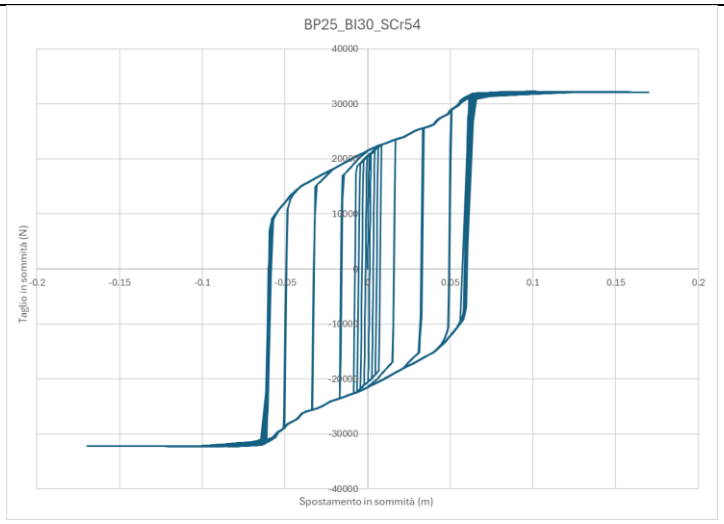
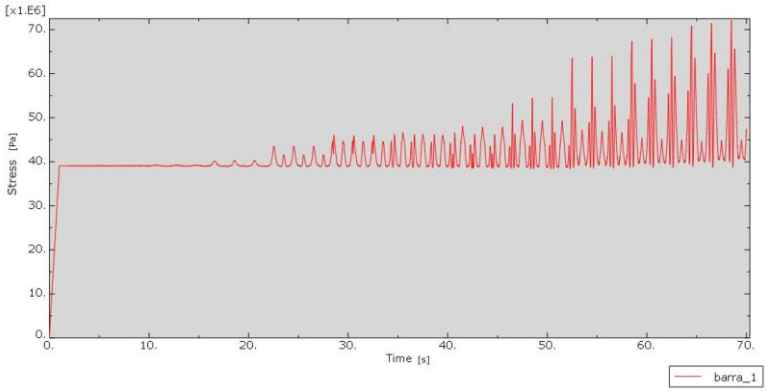
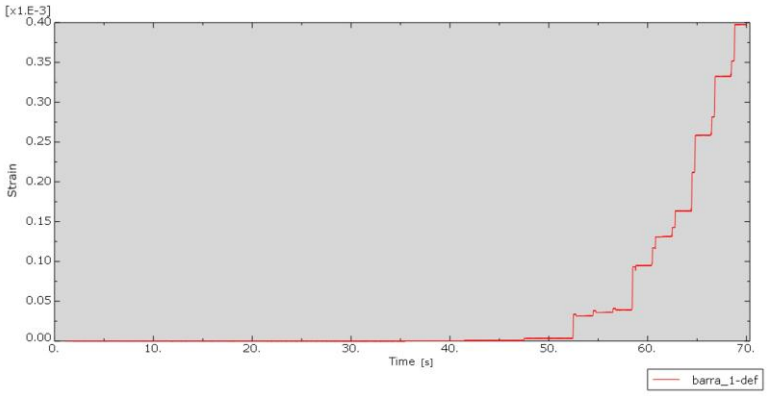
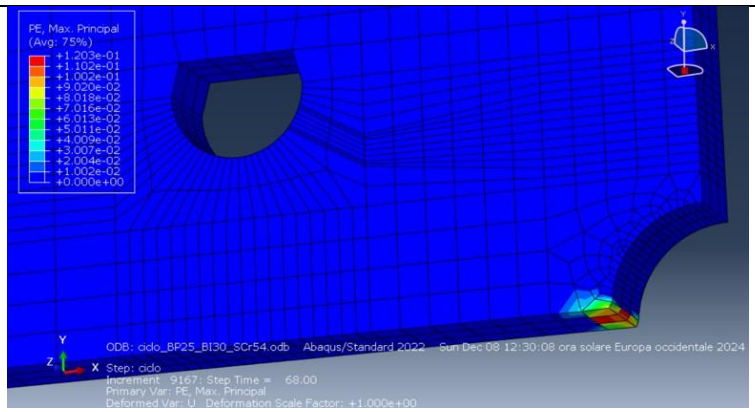
BP25_BI30_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

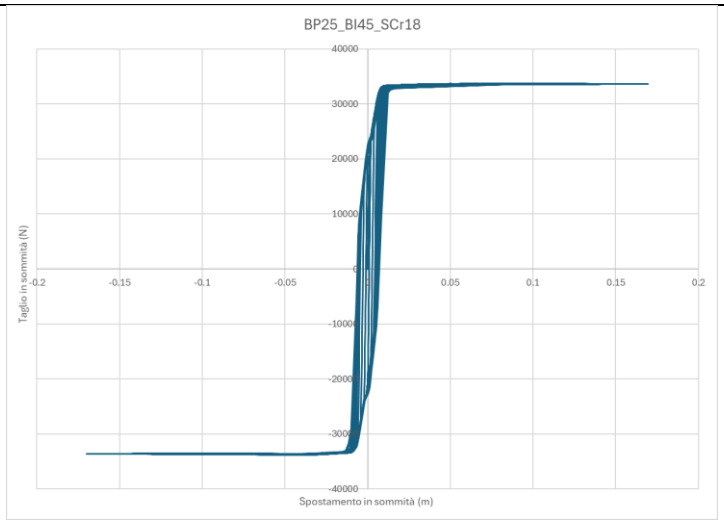
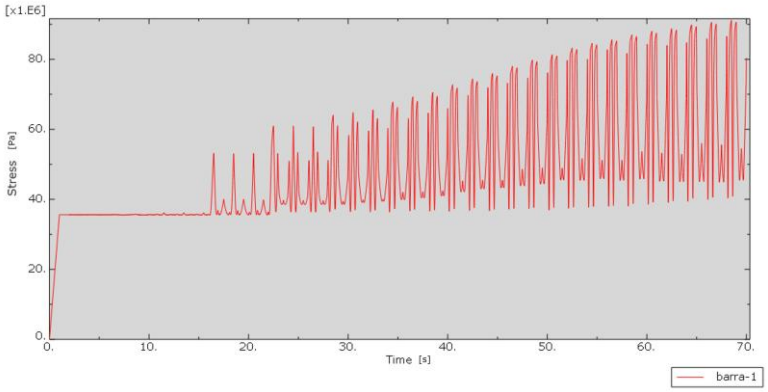
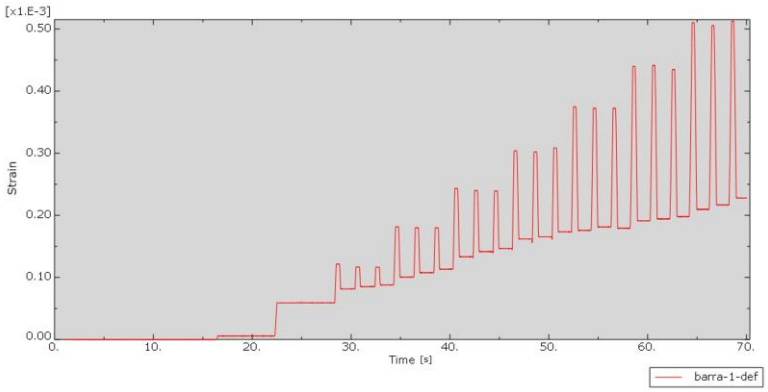
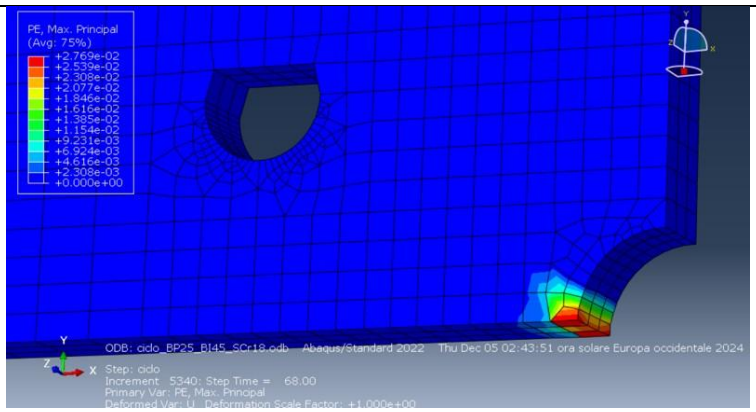
BP25_BI30_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

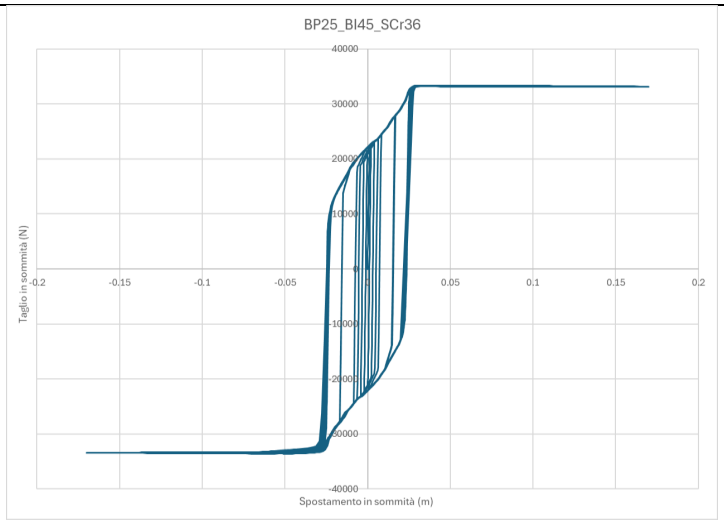
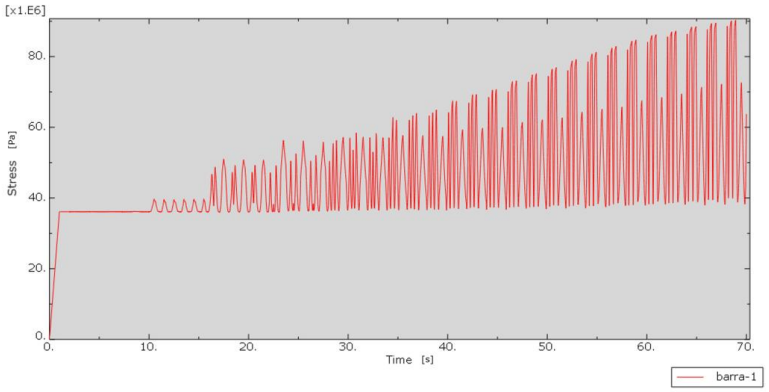
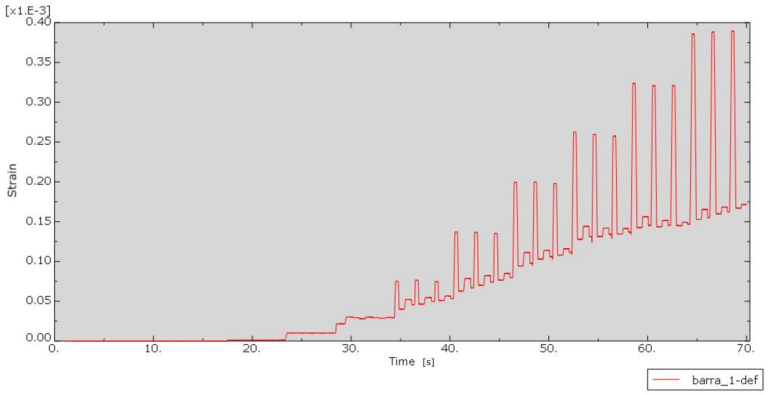
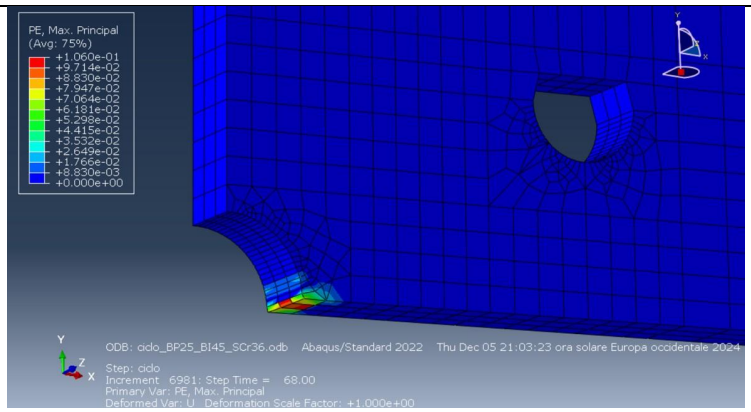
BP25_BI30_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

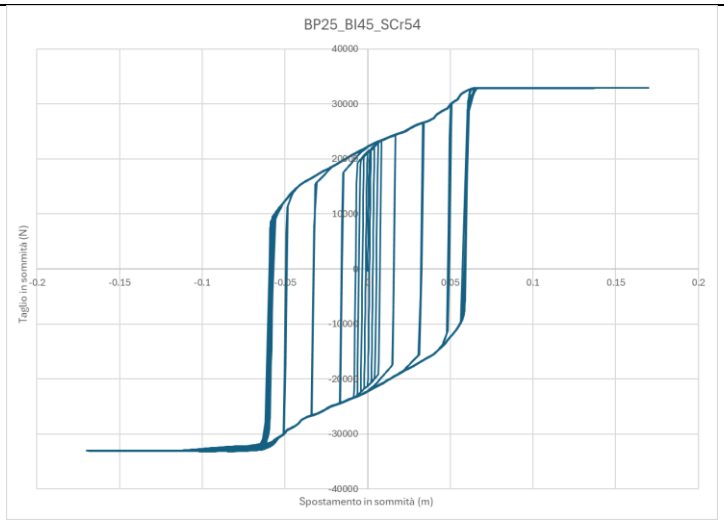
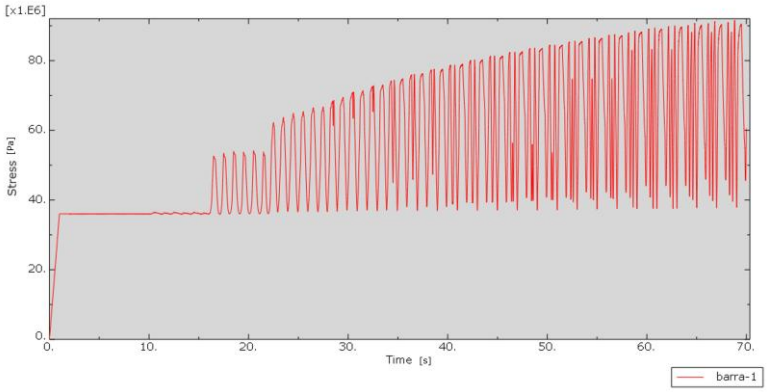
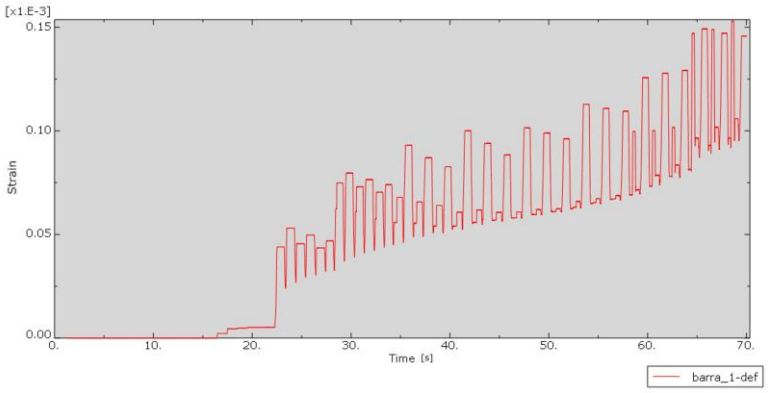
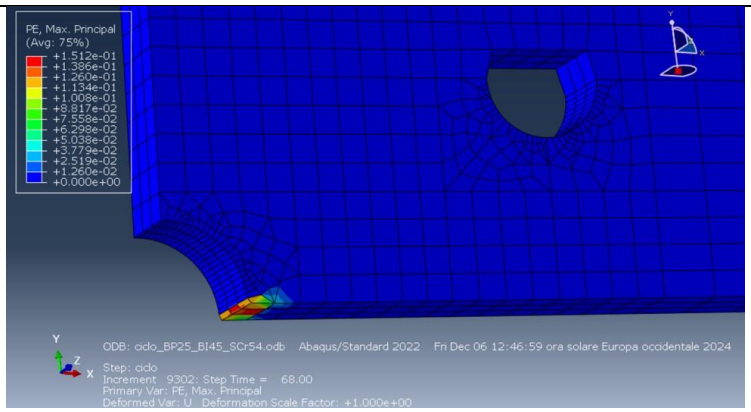
BP25_BI45_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

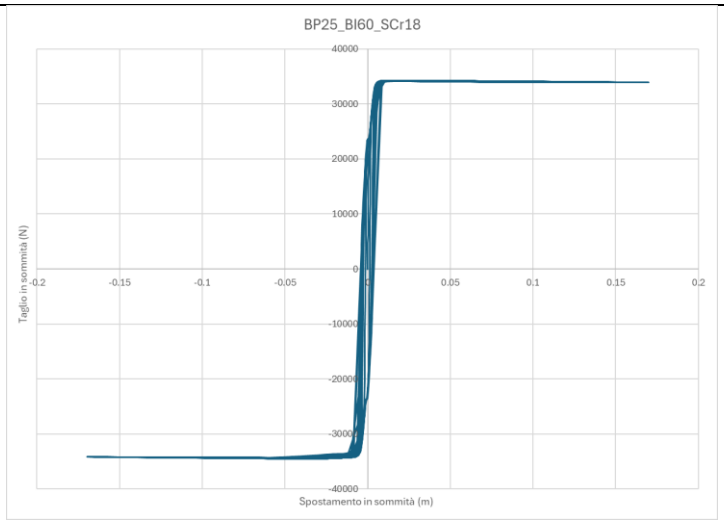
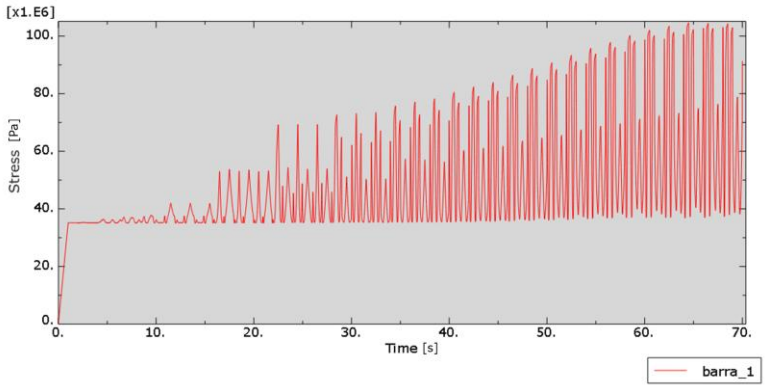
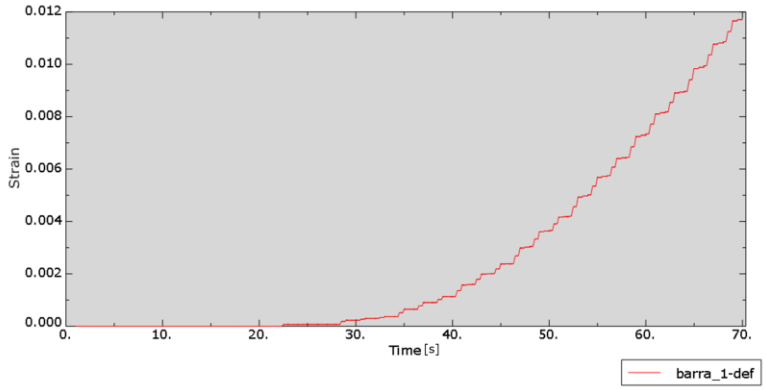
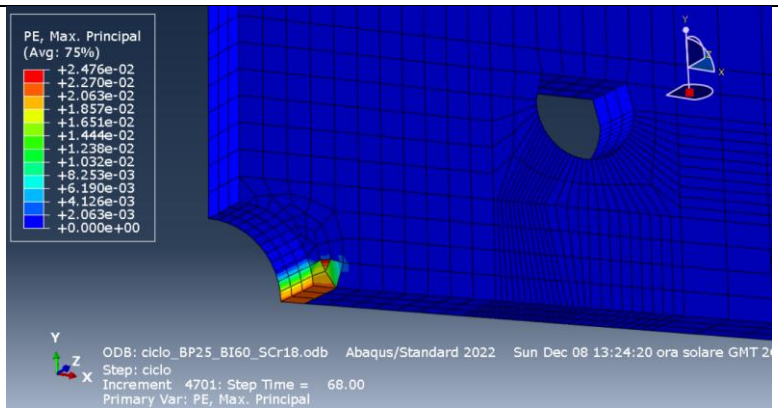
BP25_BI45_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

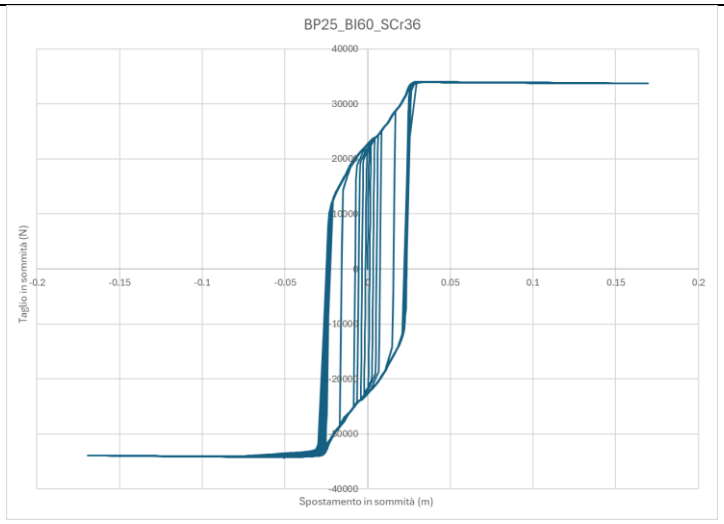
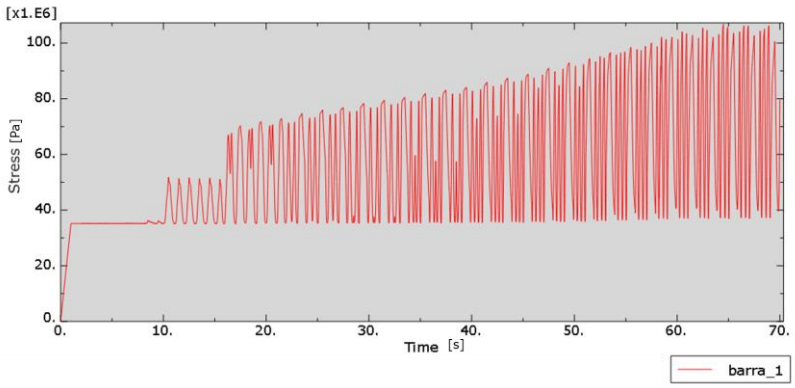
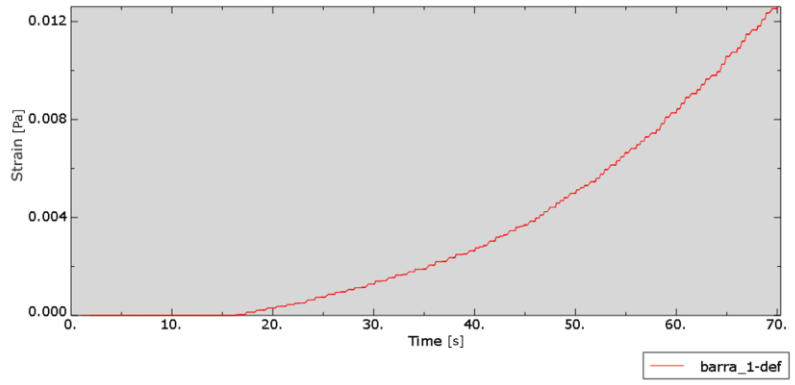
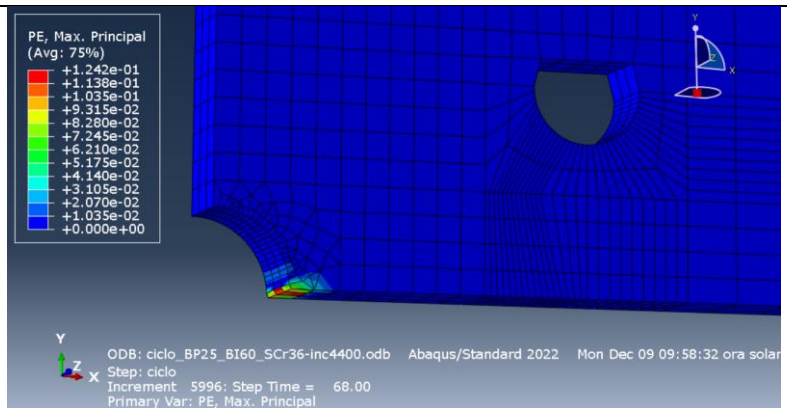
BP25_BI45_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

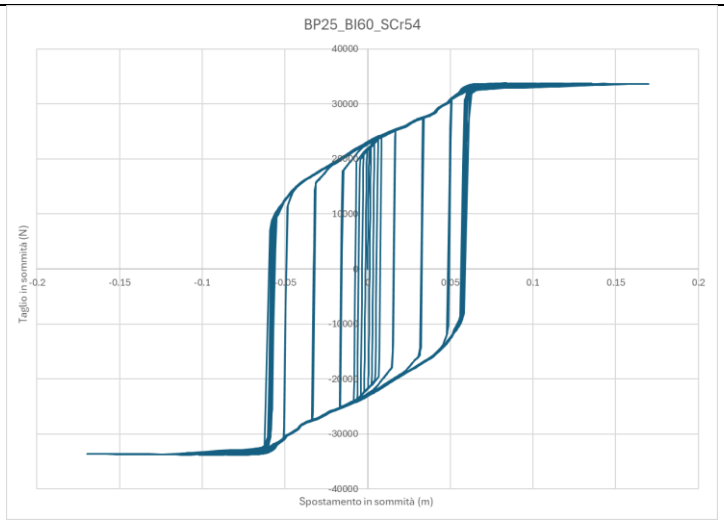
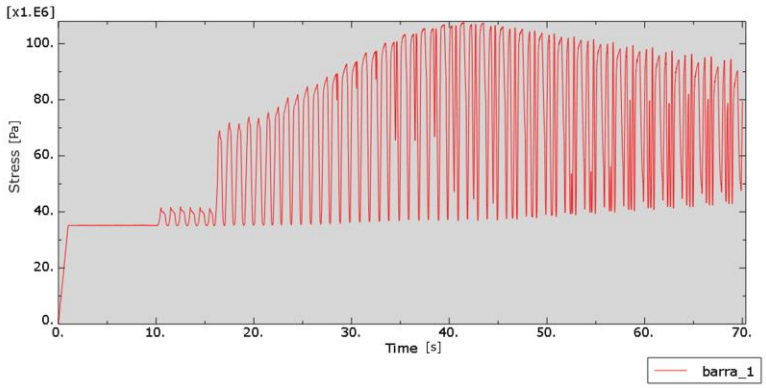
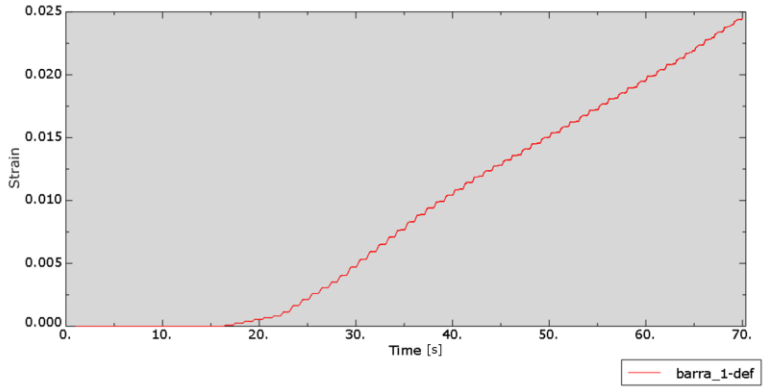
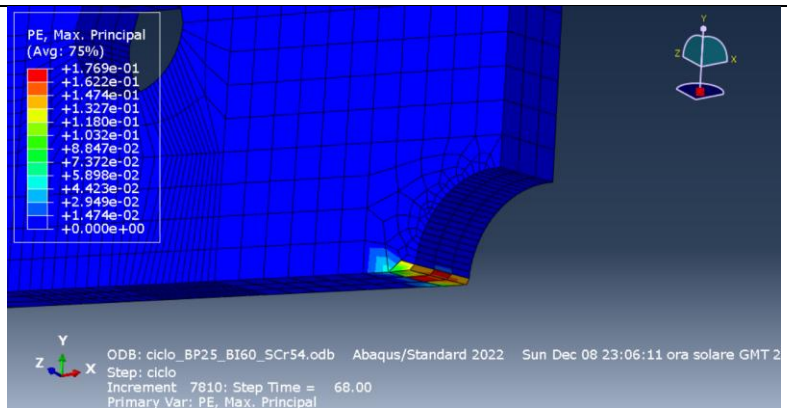
BP25_BI60_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

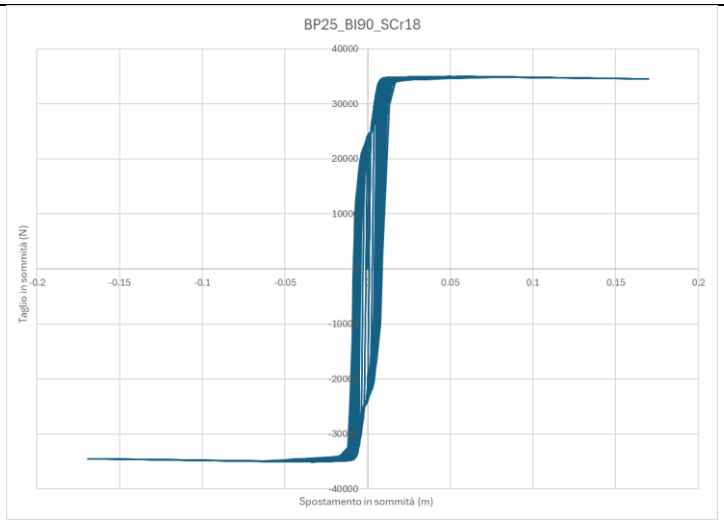
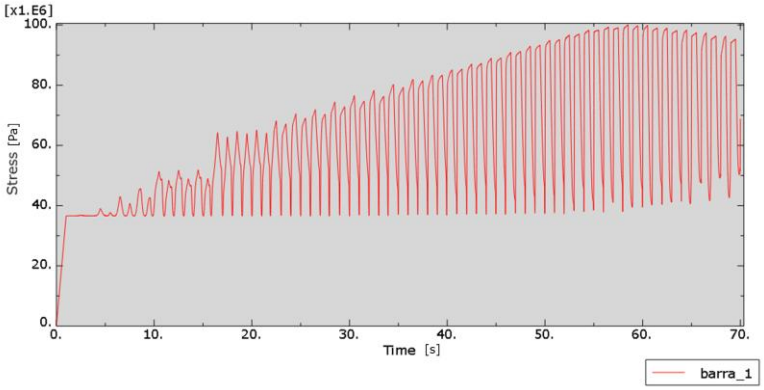
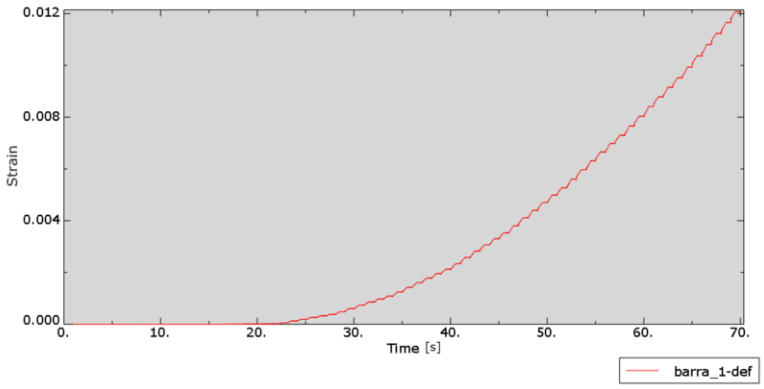
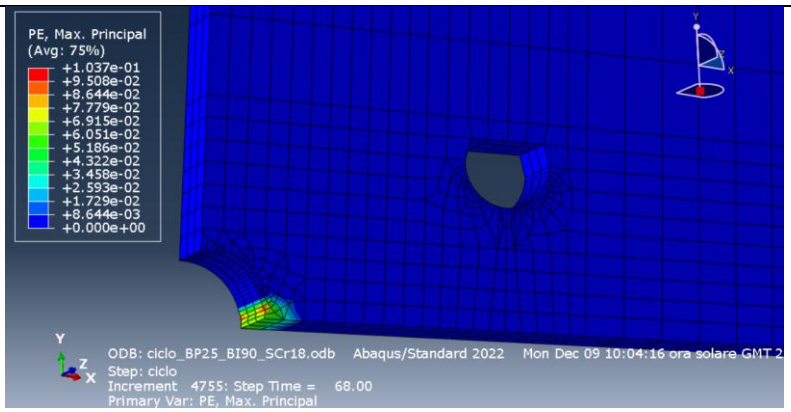
BP25_BI60_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

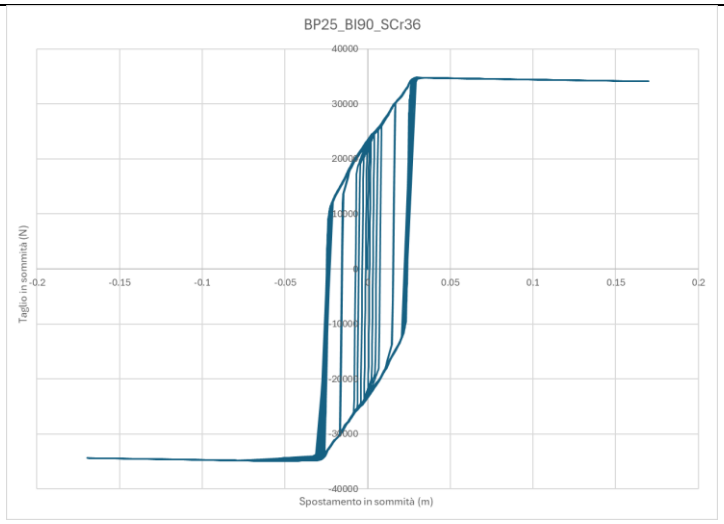
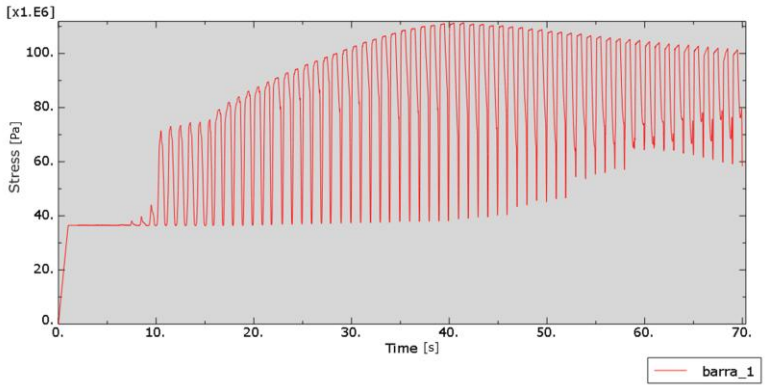
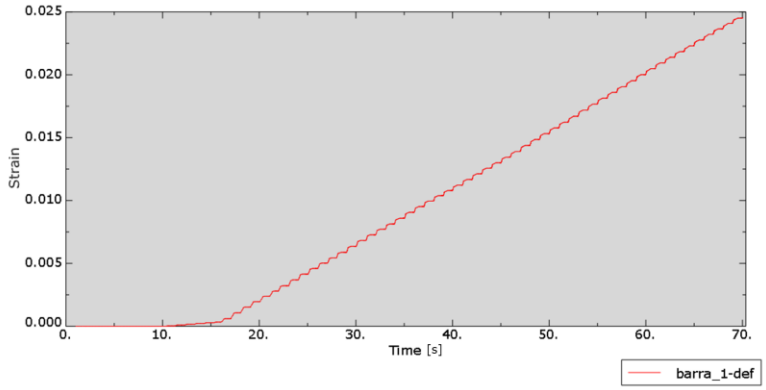
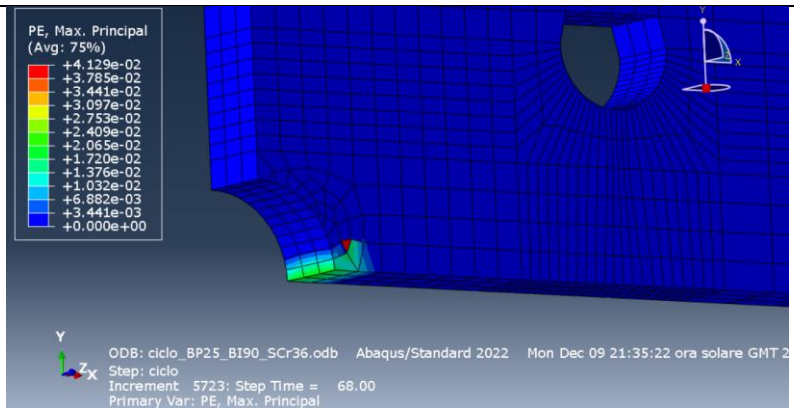
BP25_BI60_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

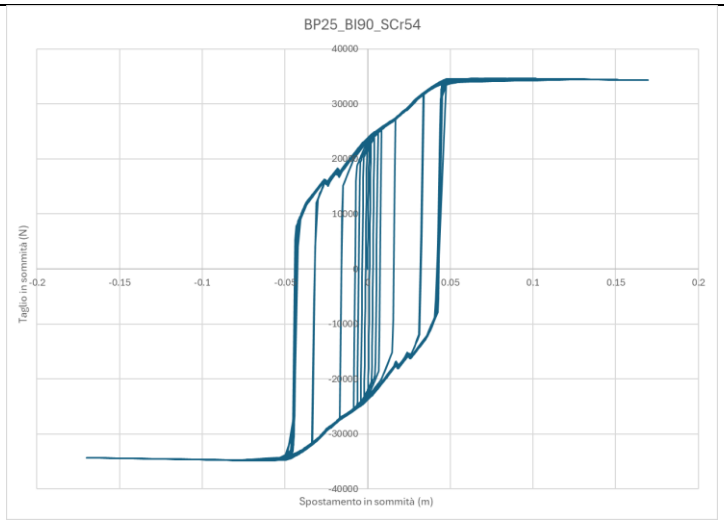
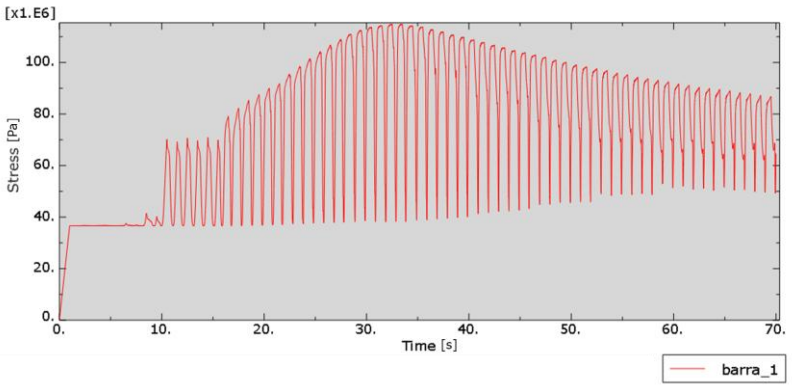
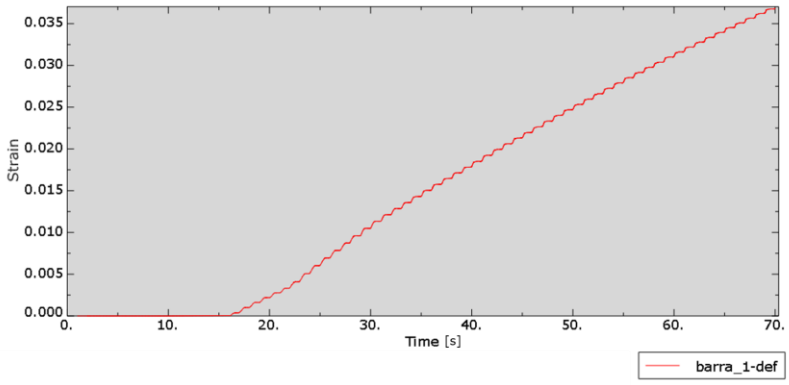
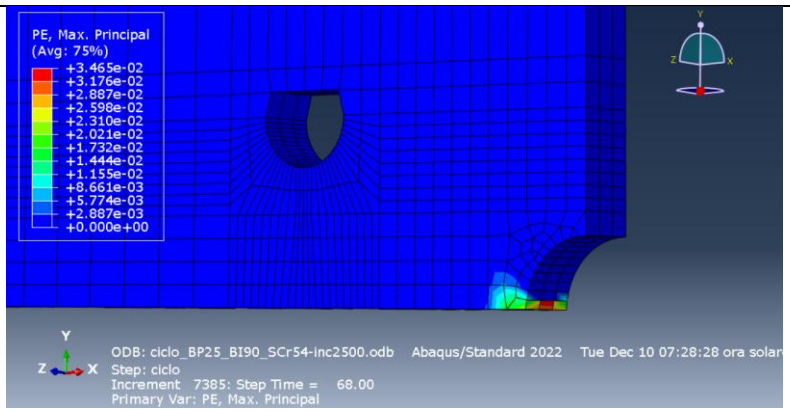
BP25_BI90_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

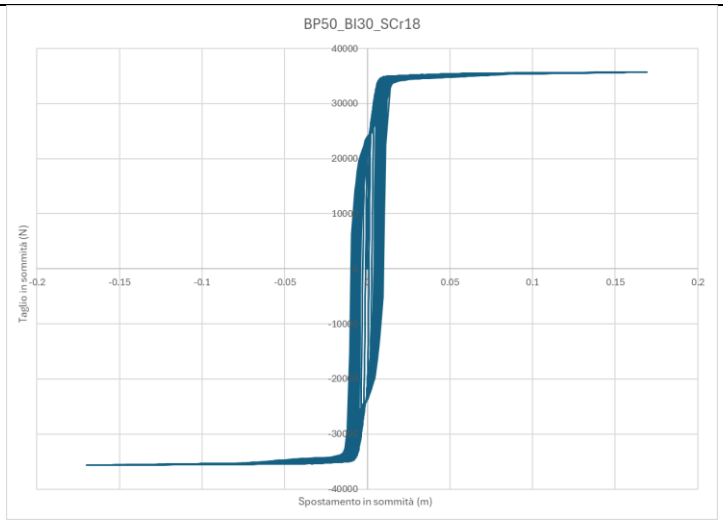
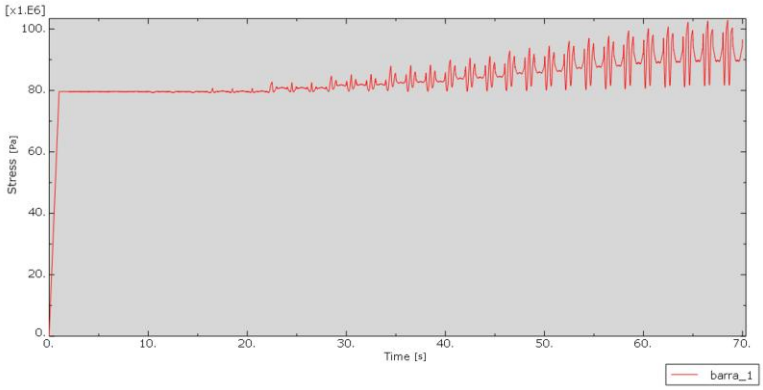
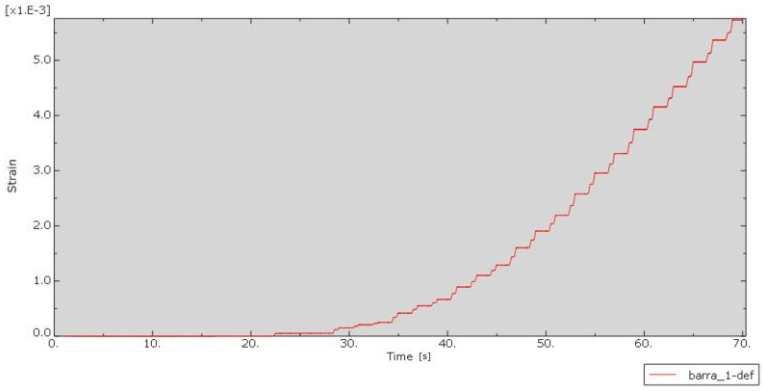
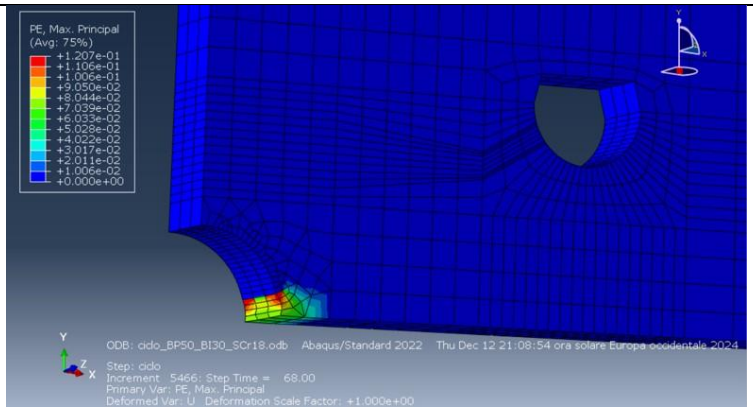
BP25_BI90_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

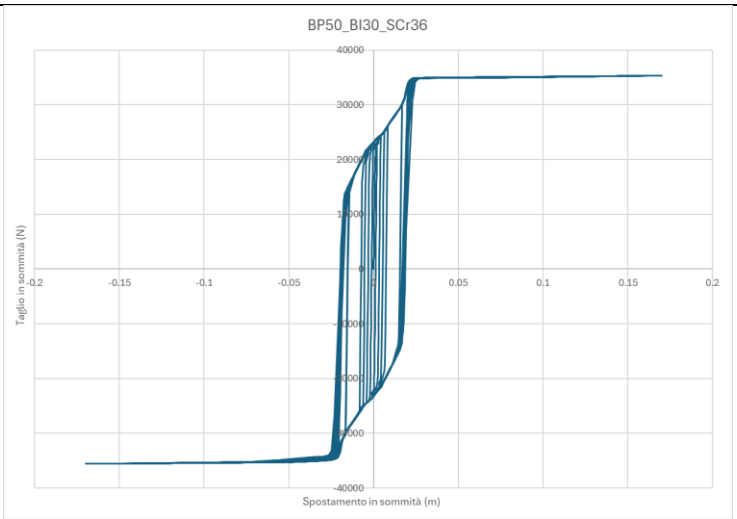
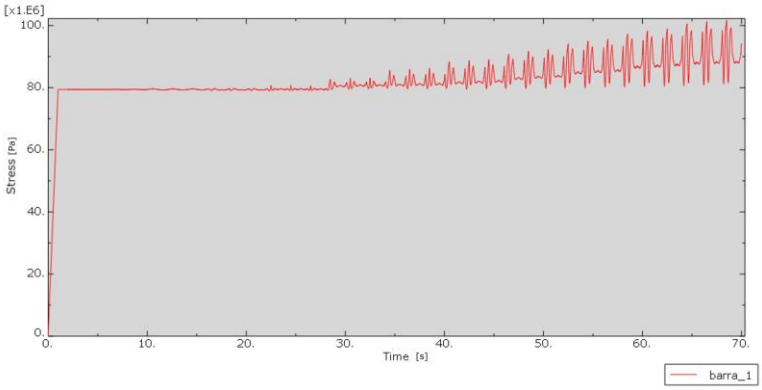
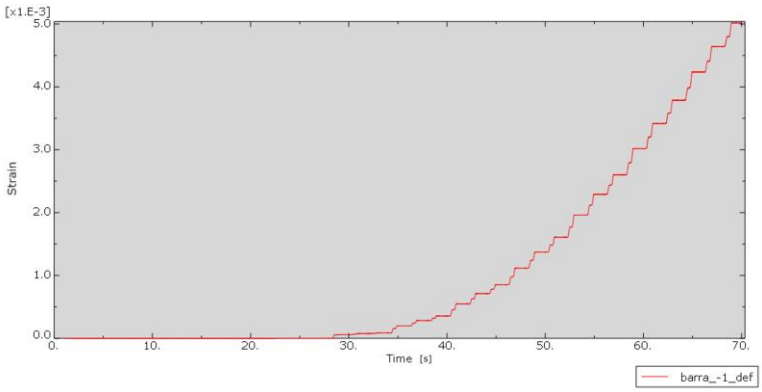
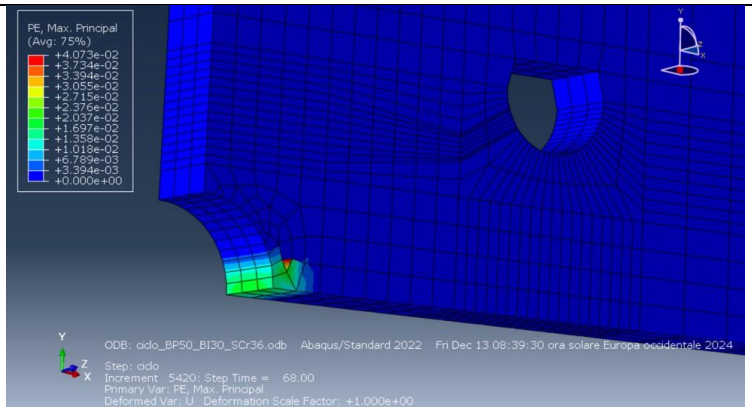
BP25_BI90_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

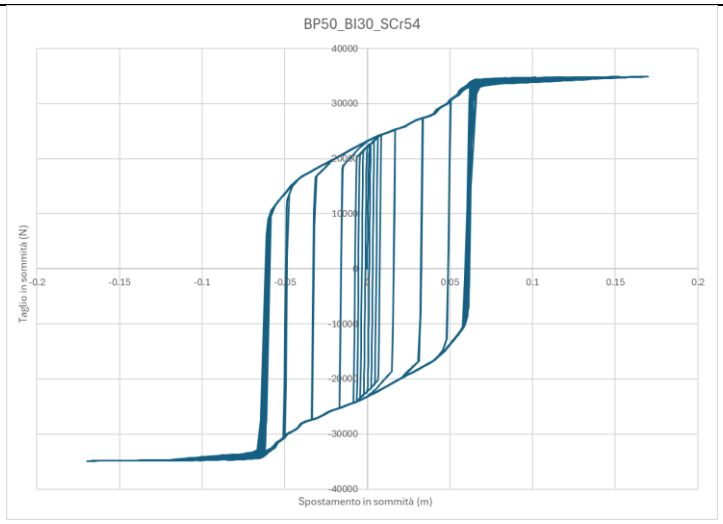
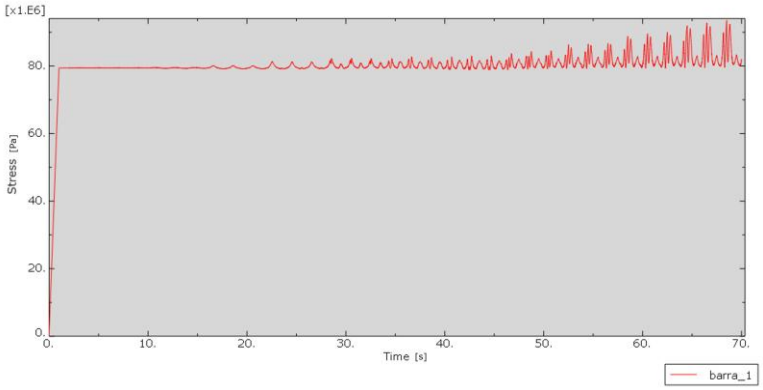
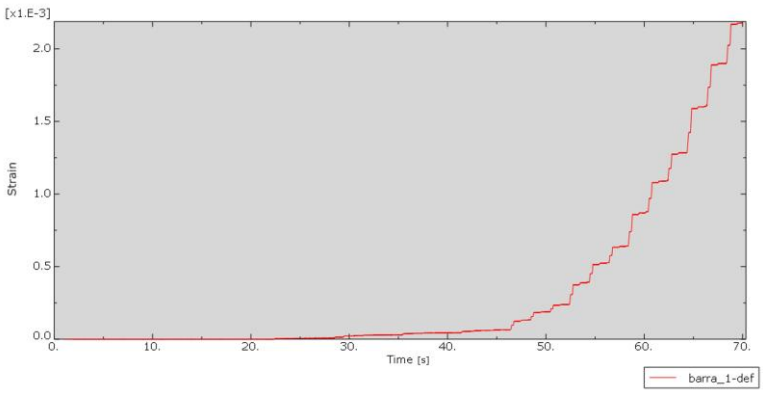
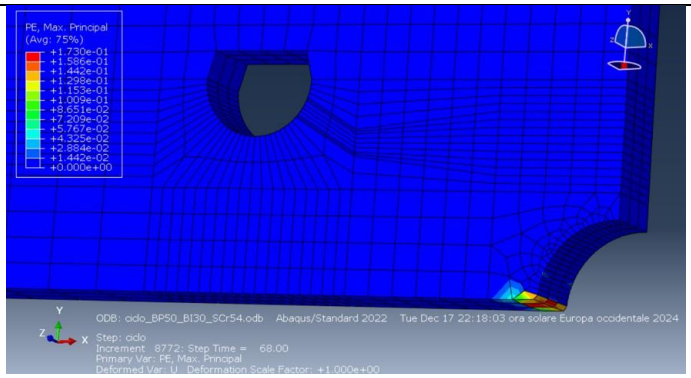
BP50_BI30_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

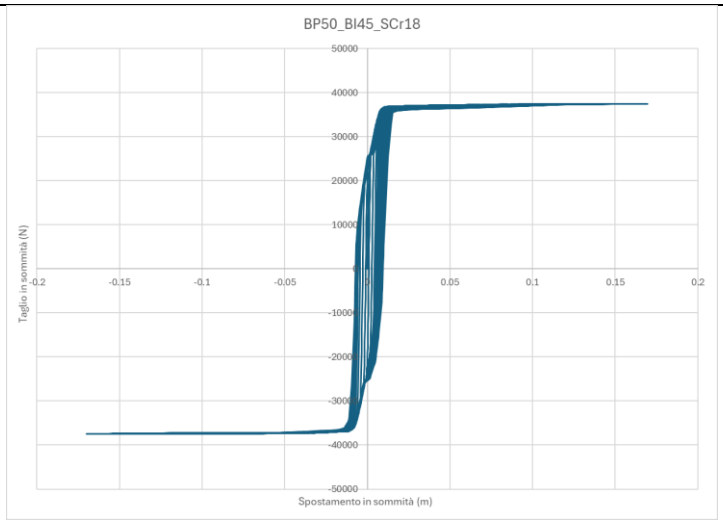
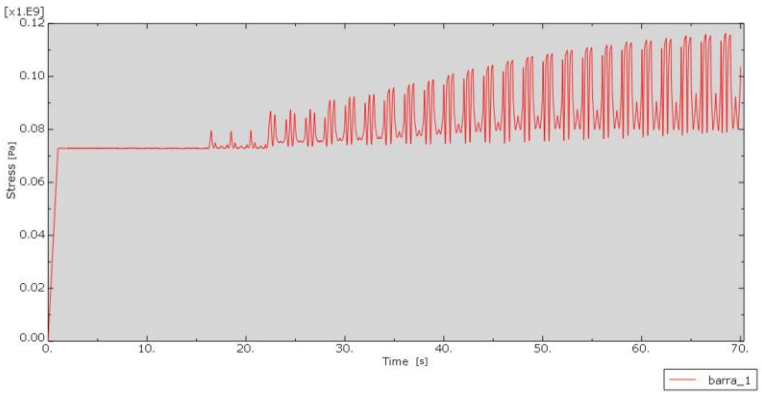
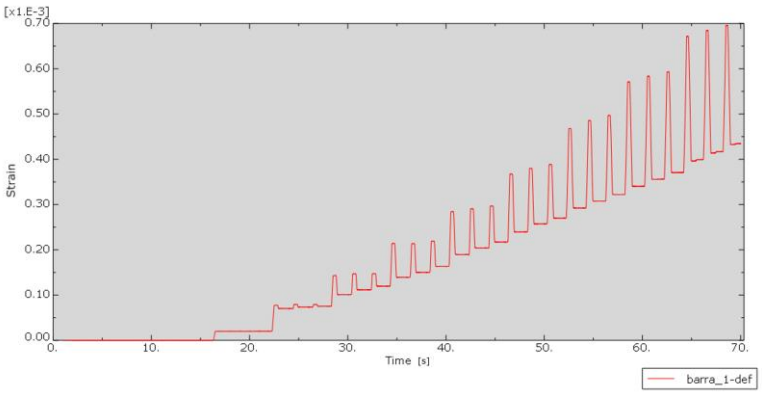
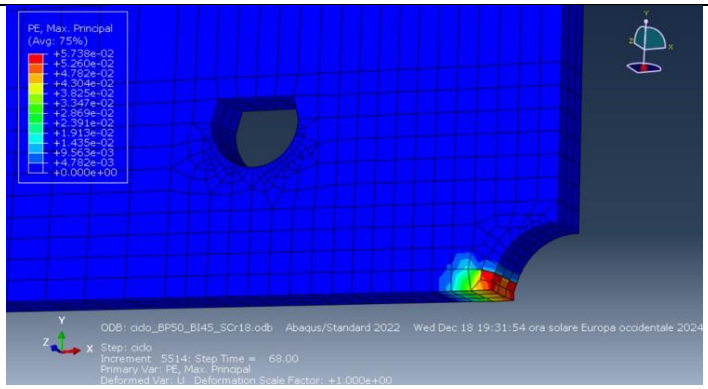
BP50_BI30_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

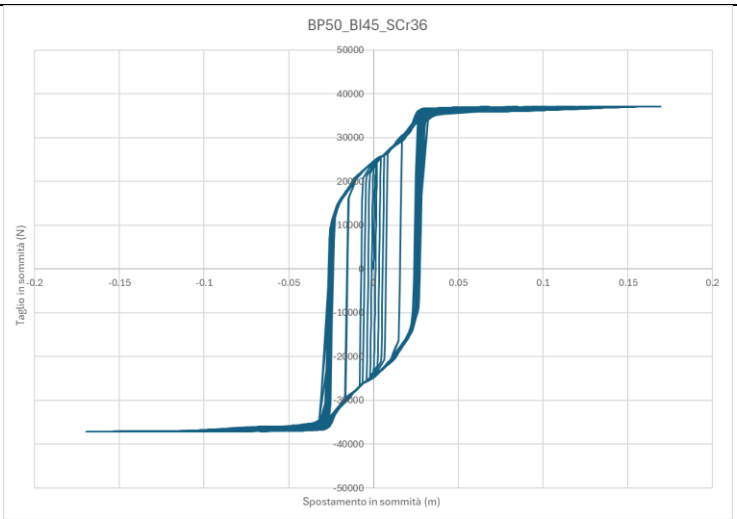
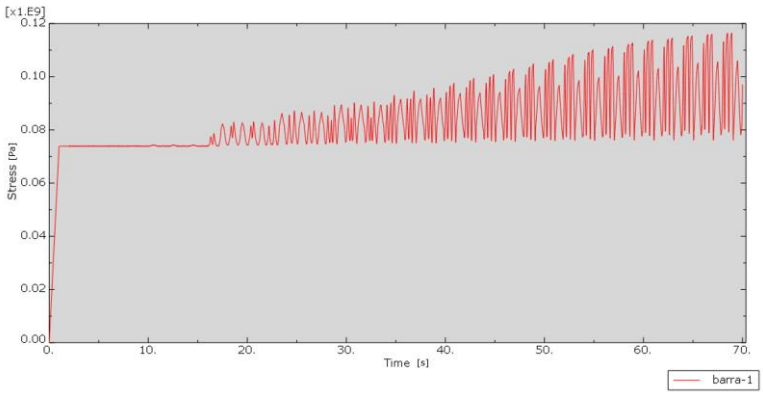
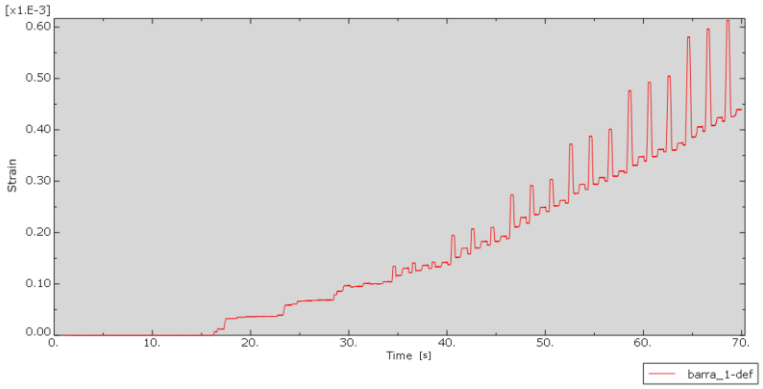
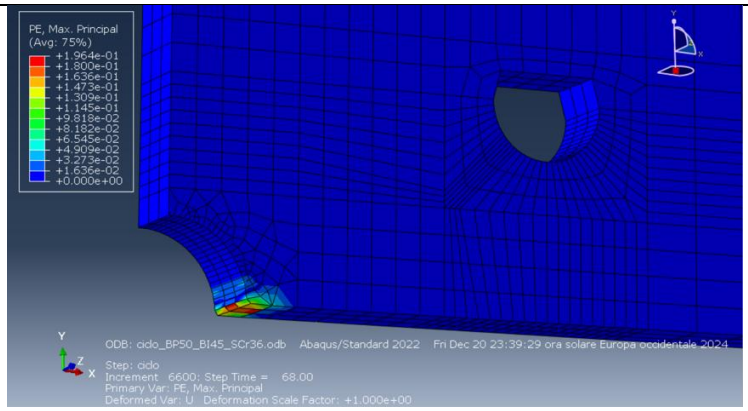
BP50_BI30_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

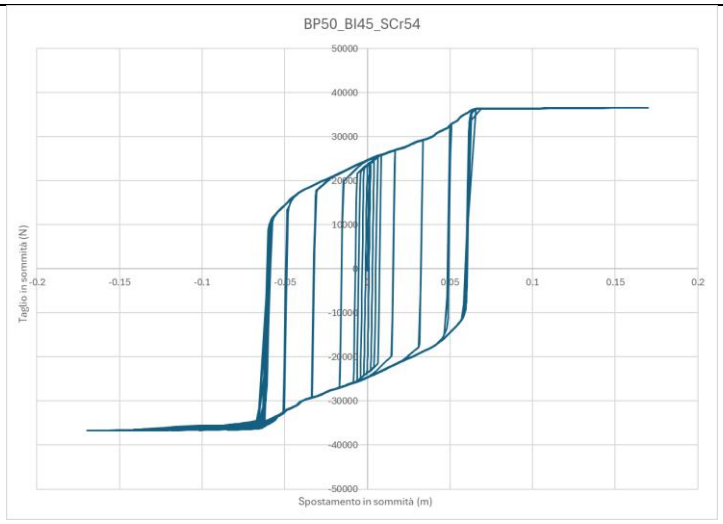
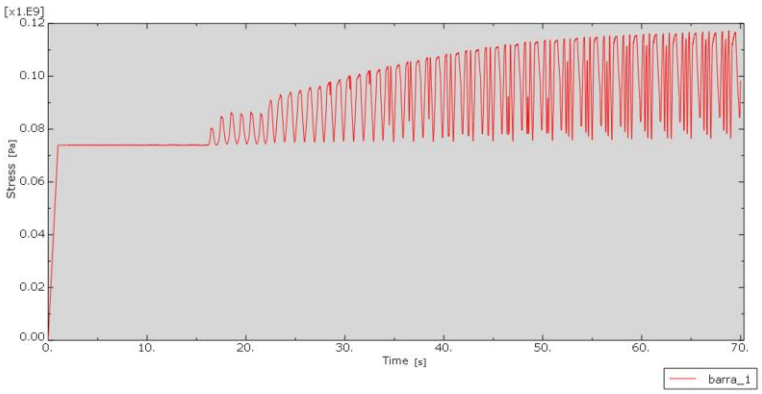
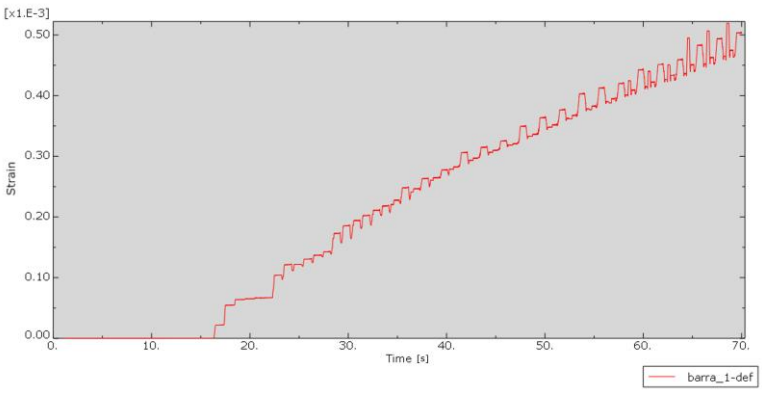
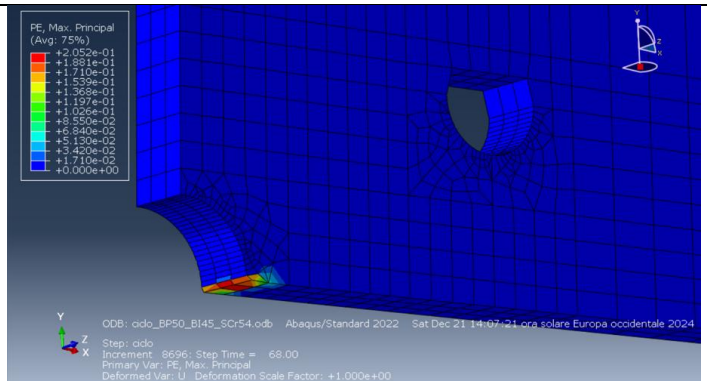
BP50_BI45_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

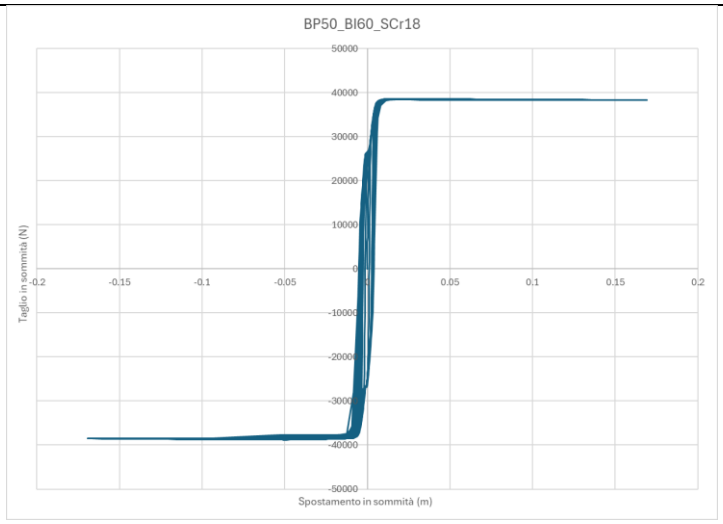
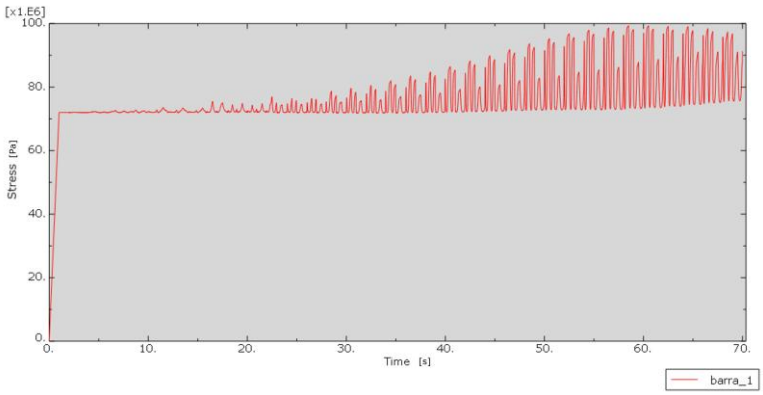
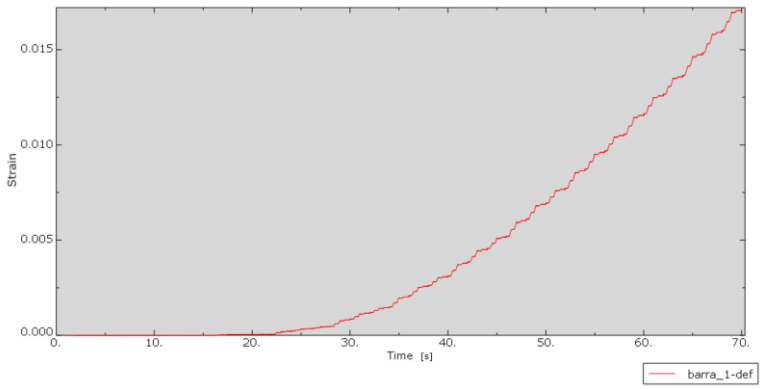
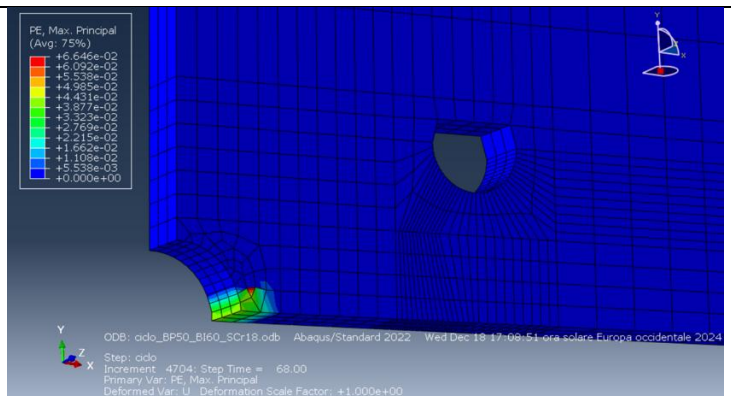
BP50_BI45_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

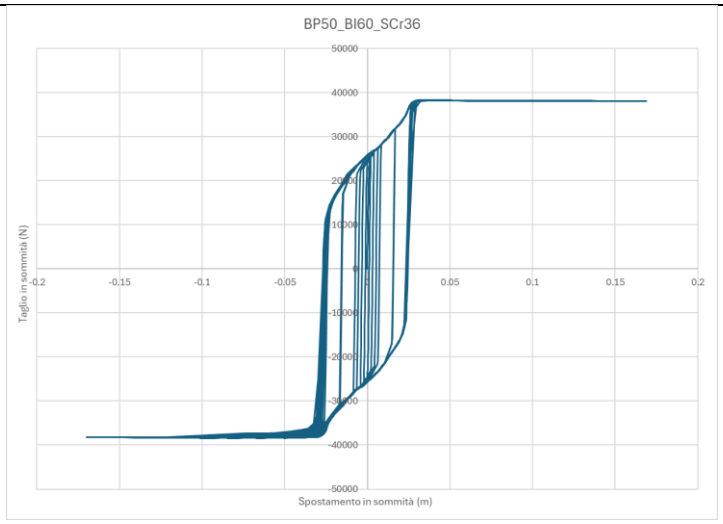
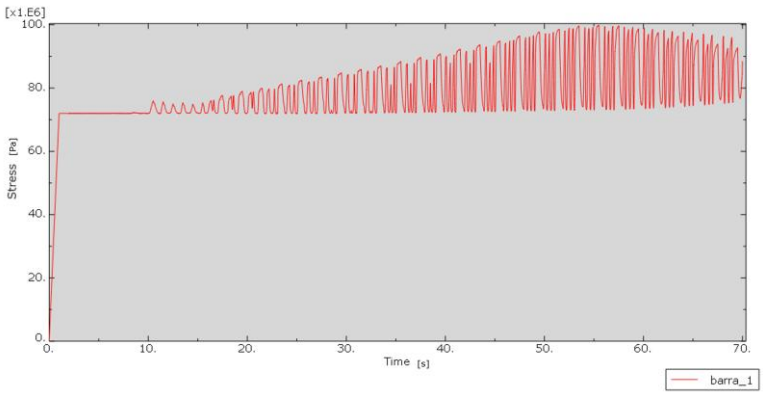
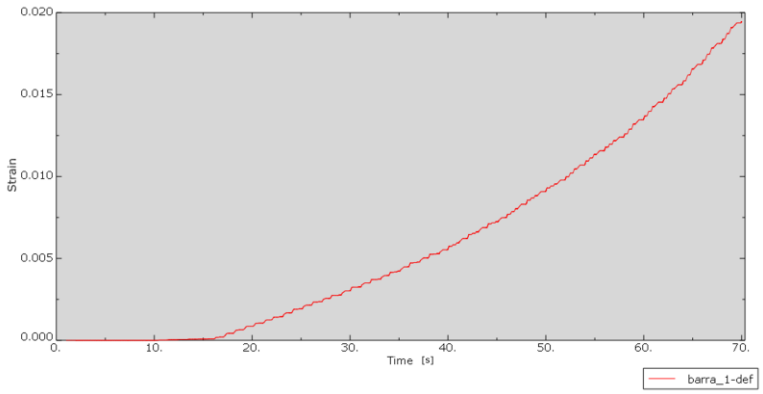
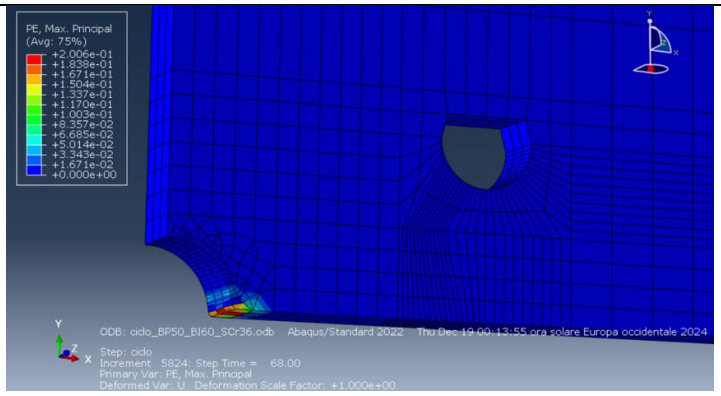
BP50_BI45_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

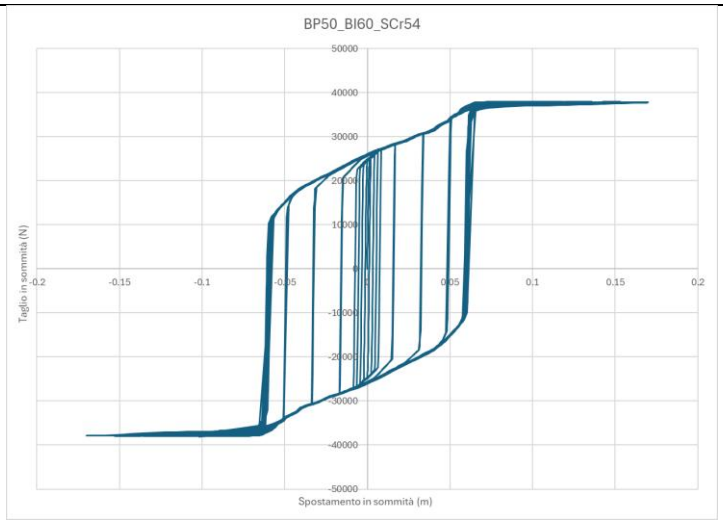
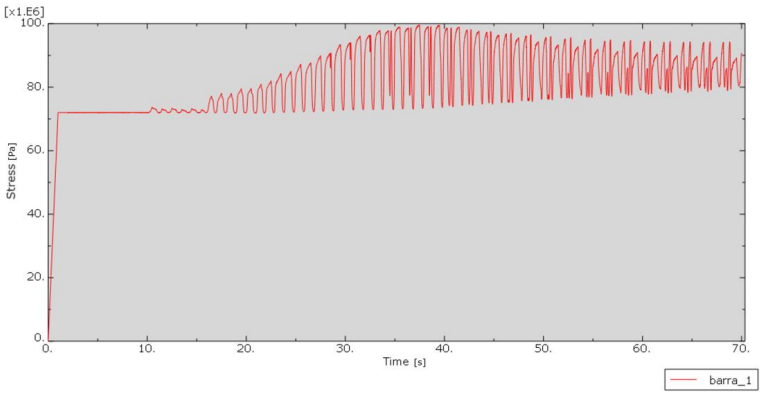
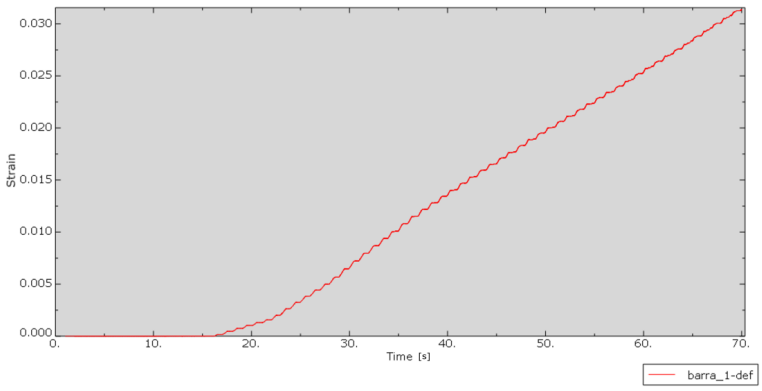
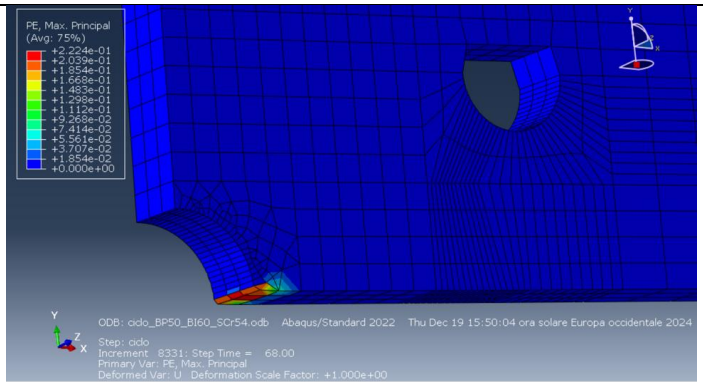
BP50_BI60_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

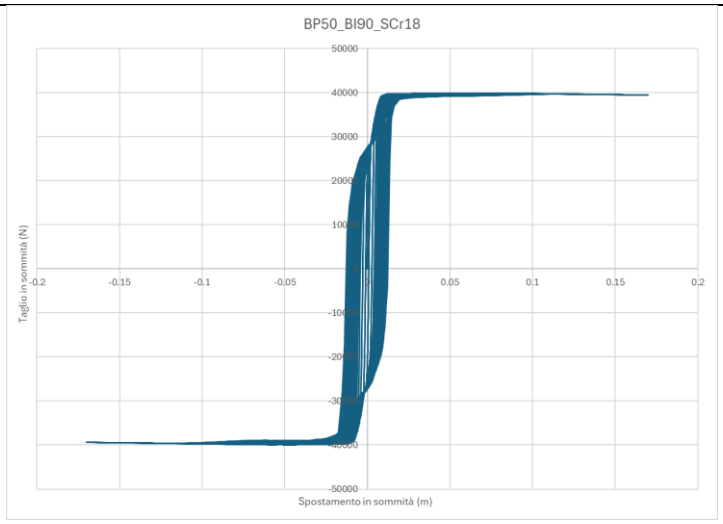
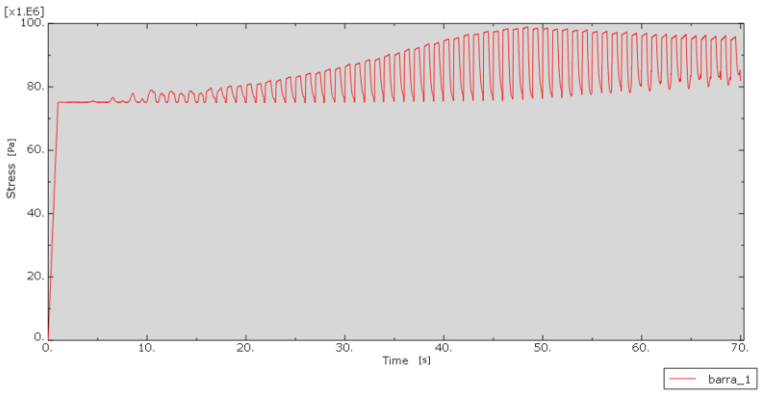
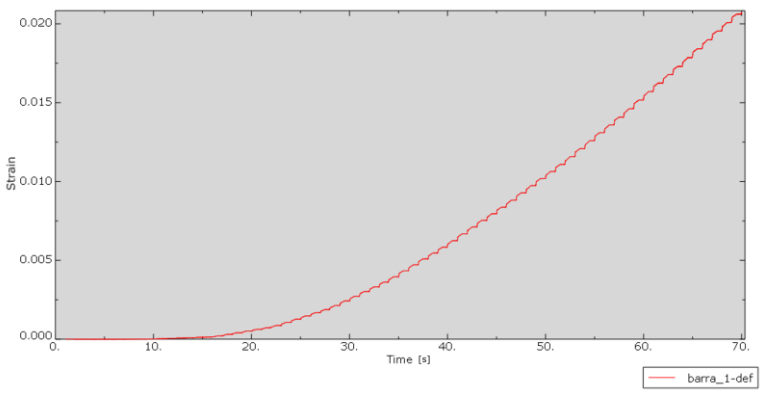
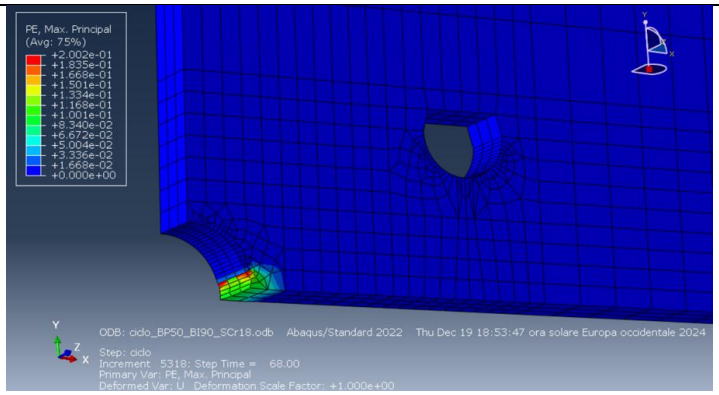
BP50_BI60_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

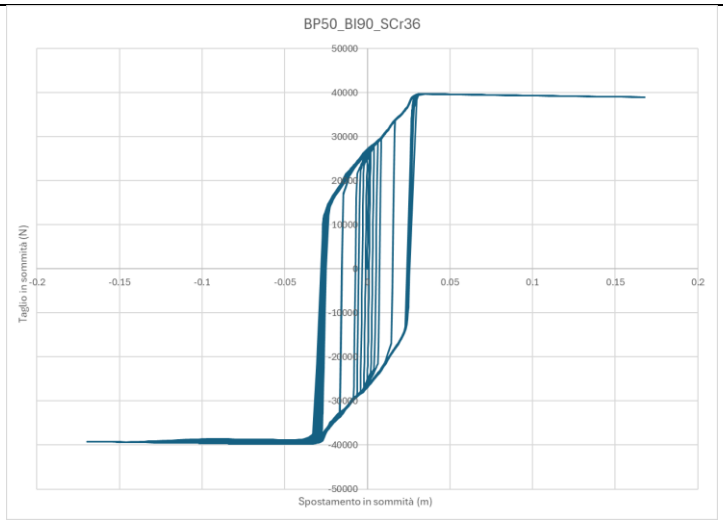
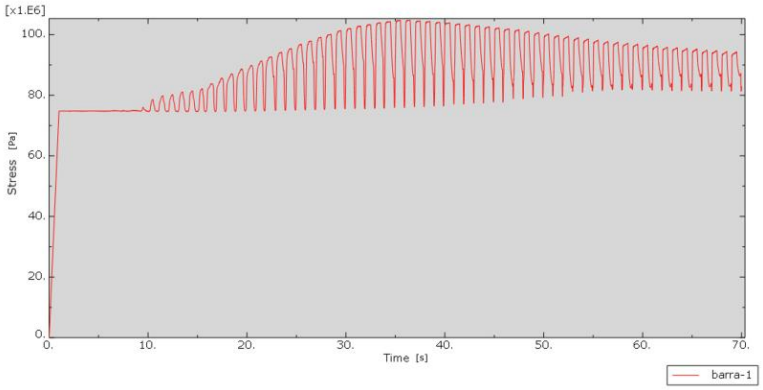
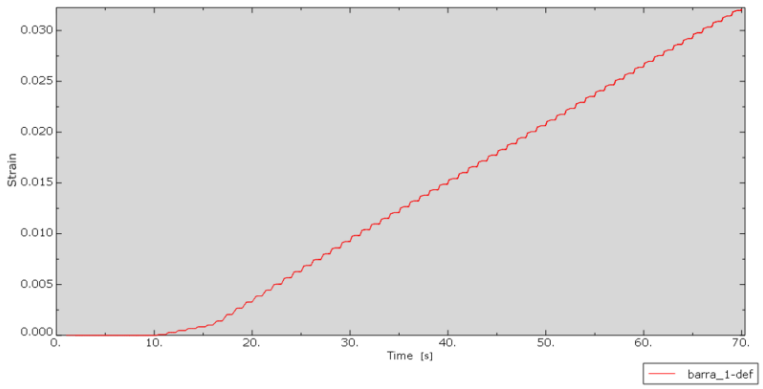
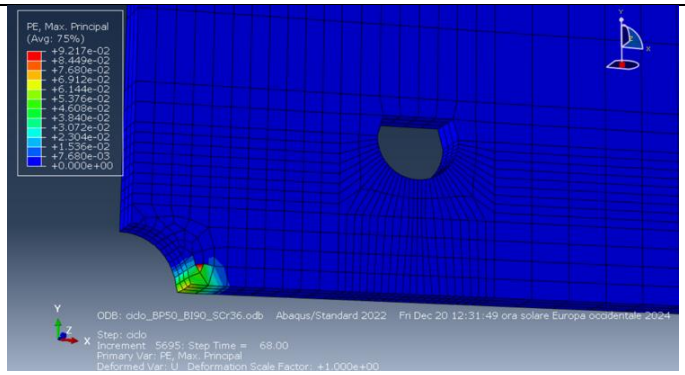
BP50_BI60_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

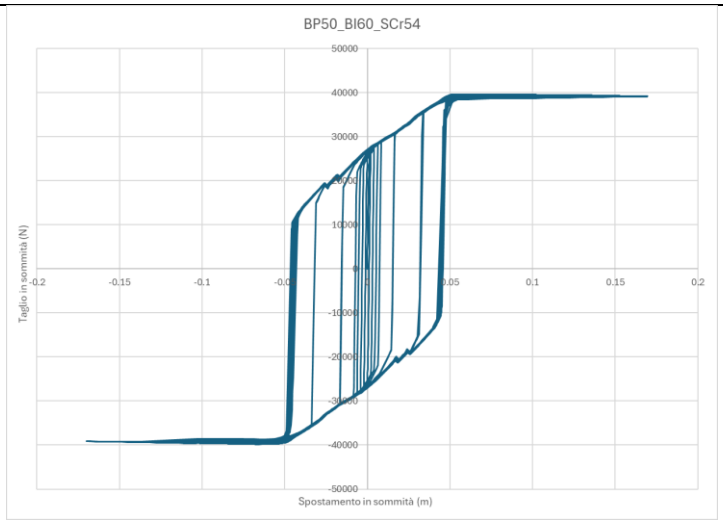
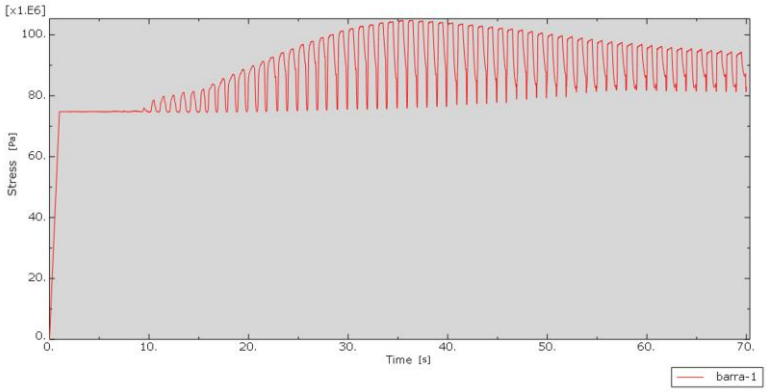
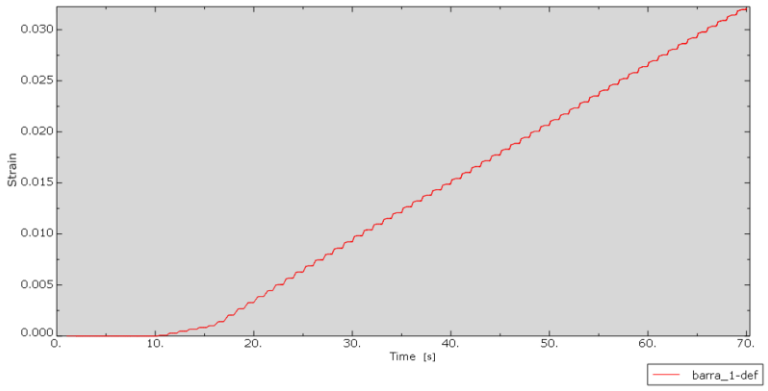
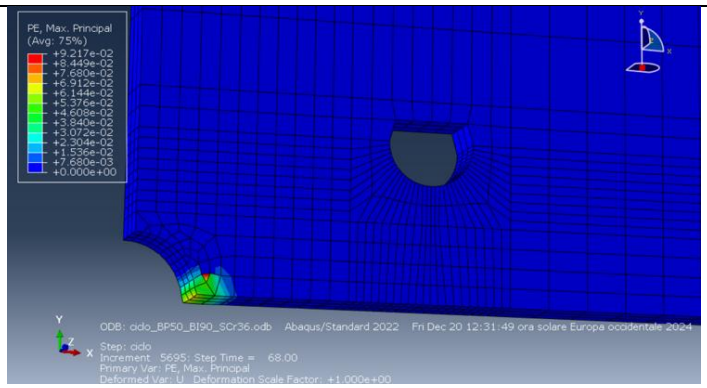
BP50_BI90_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

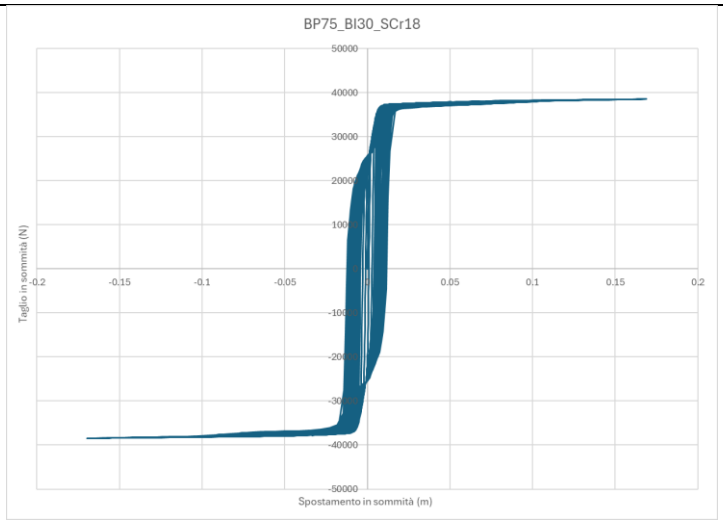
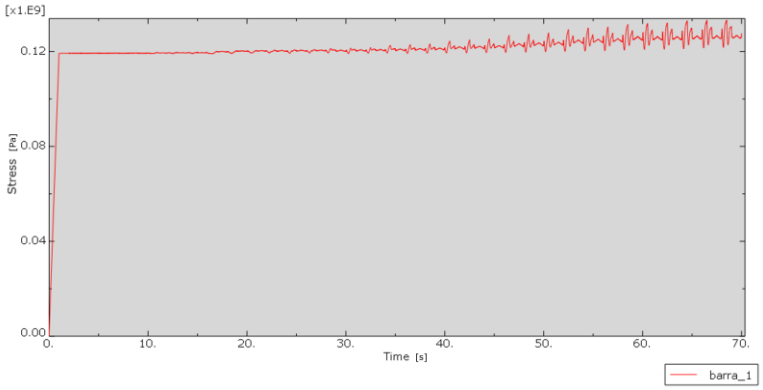
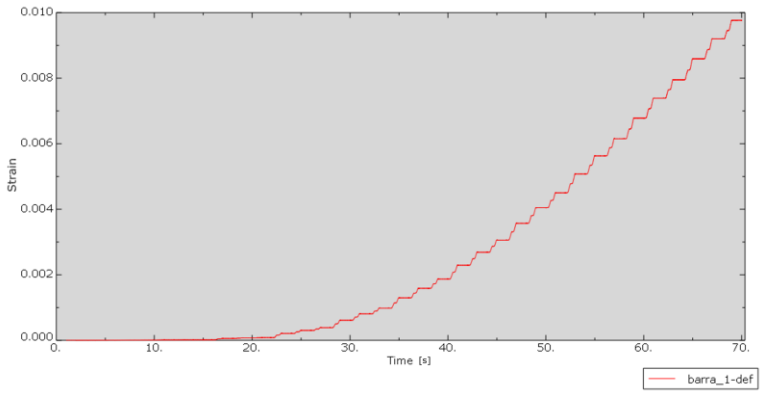
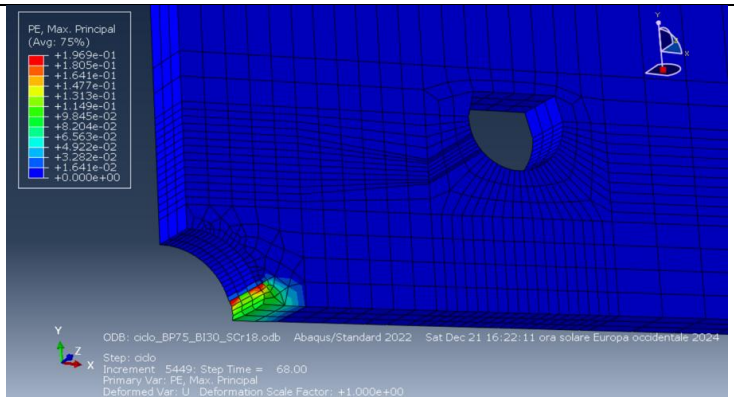
BP50_BI90_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

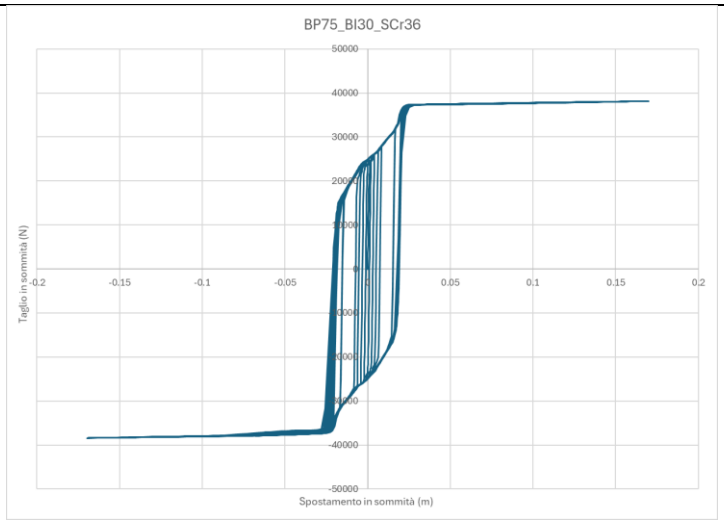
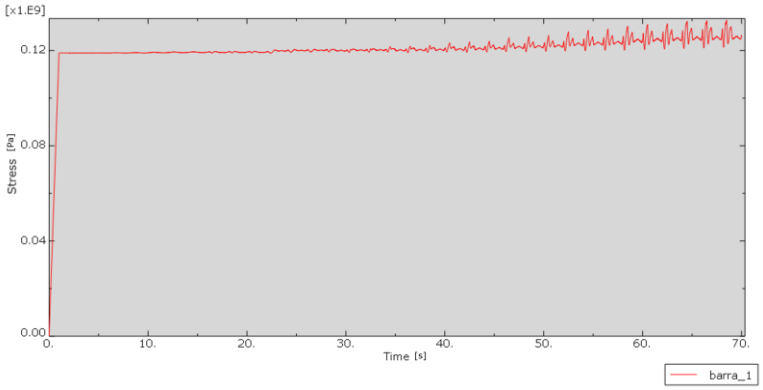
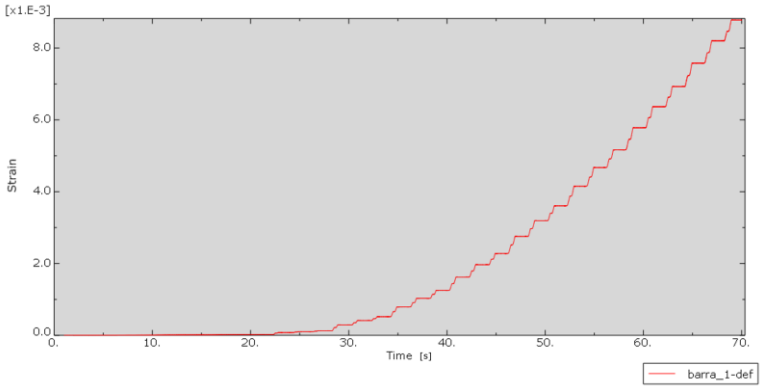
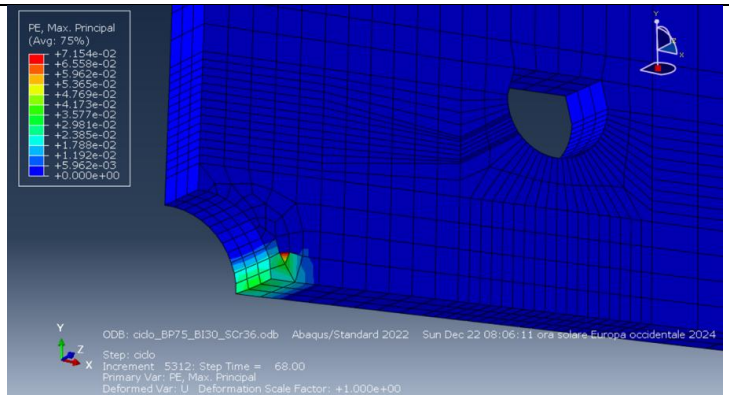
BP50_BI90_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

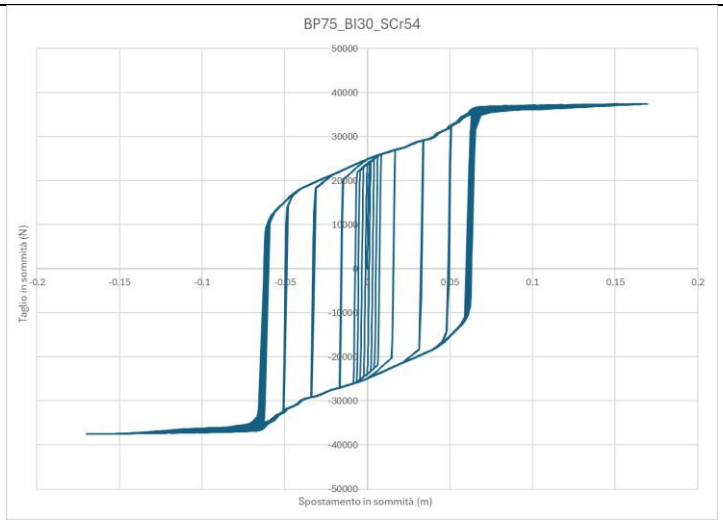
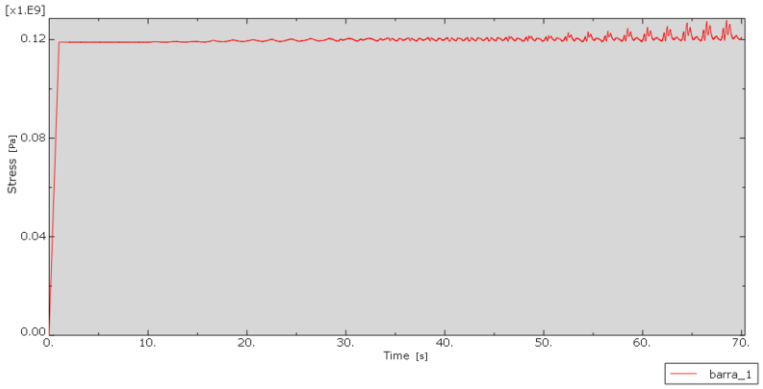
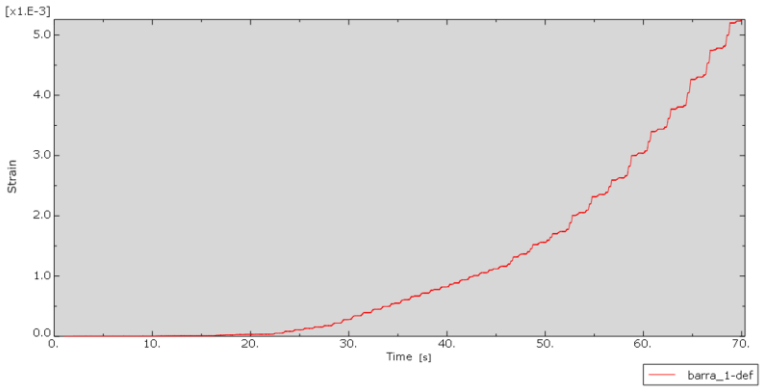
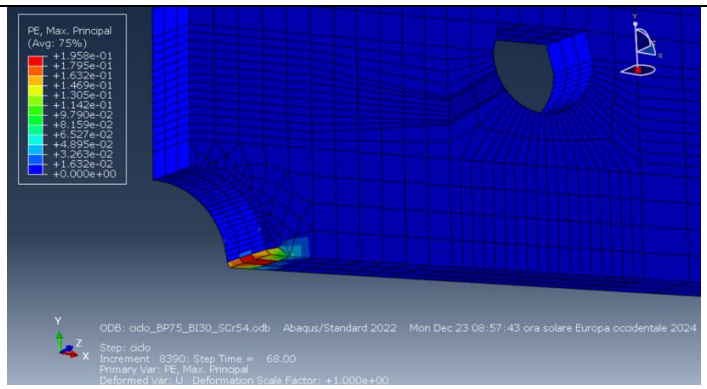
BP75_BI30_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

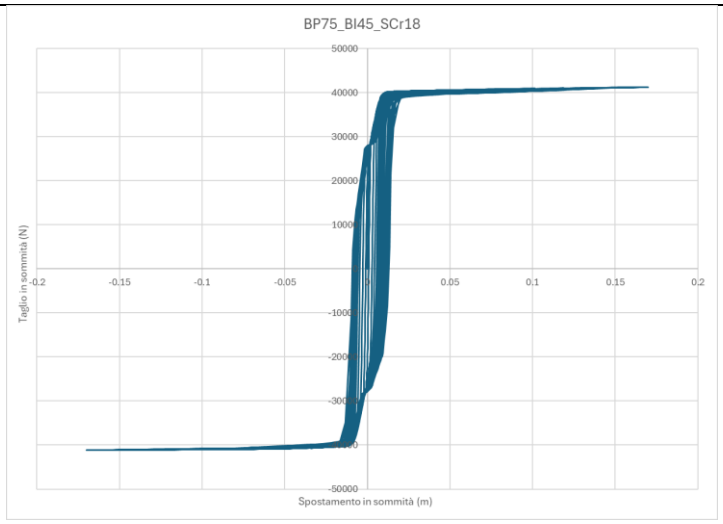
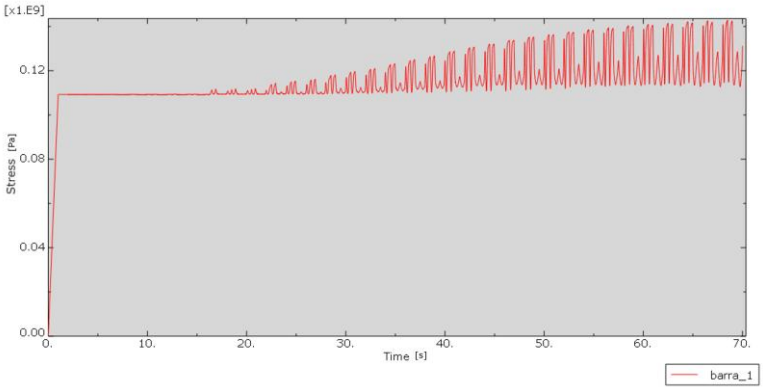
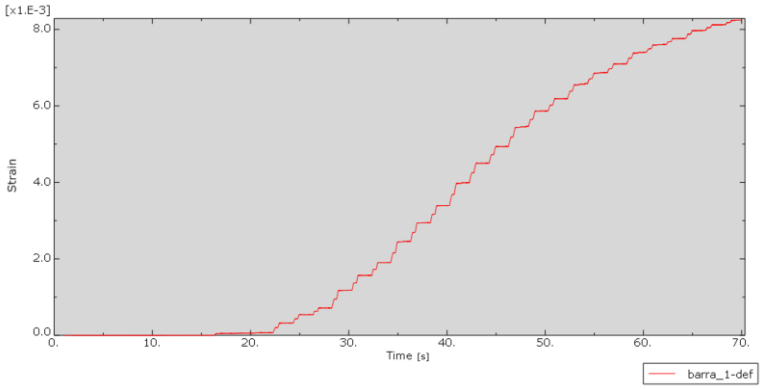
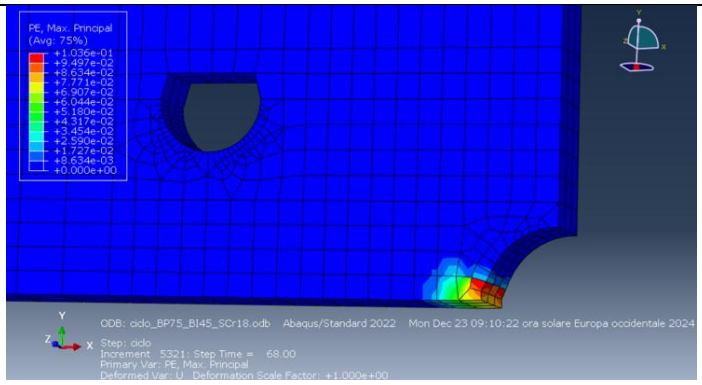
BP75_BI30_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

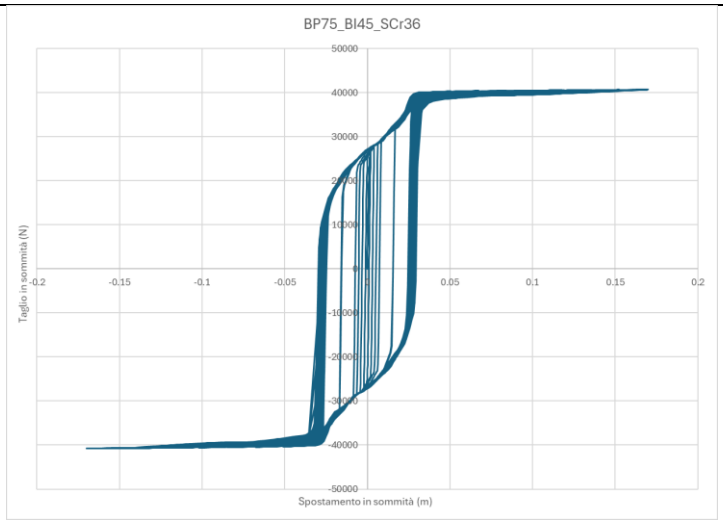
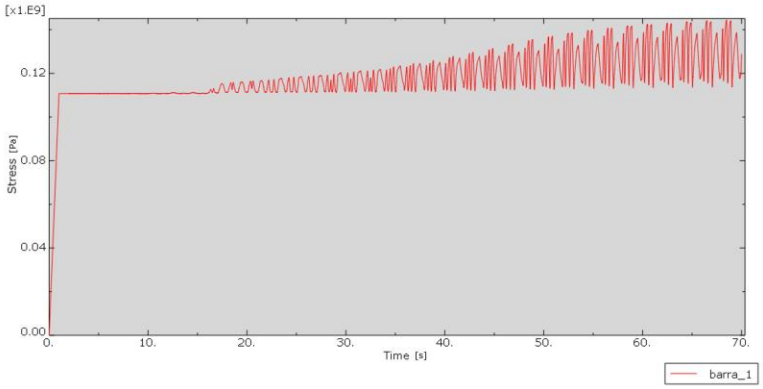
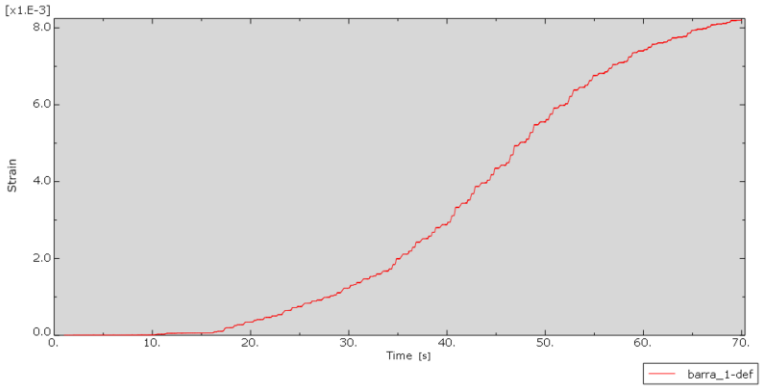
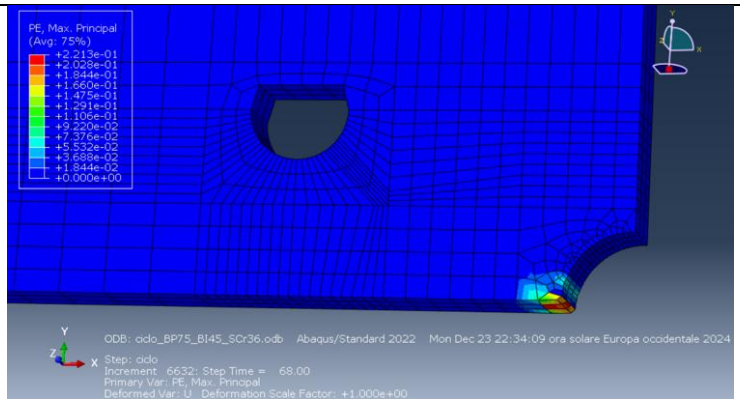
BP75_BI30_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

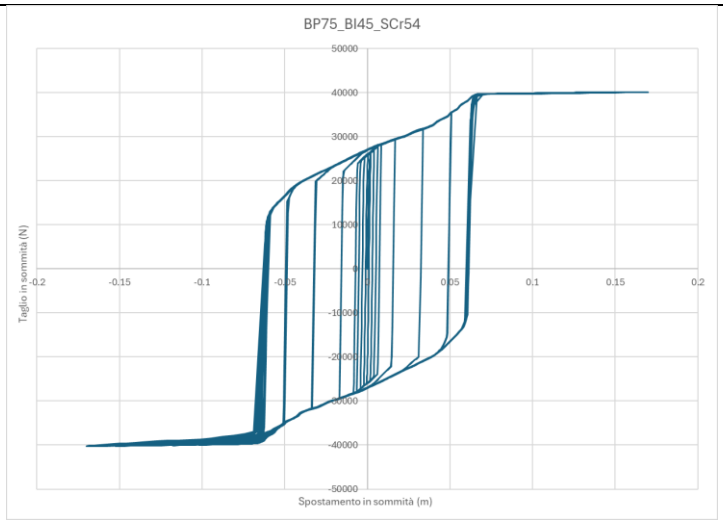
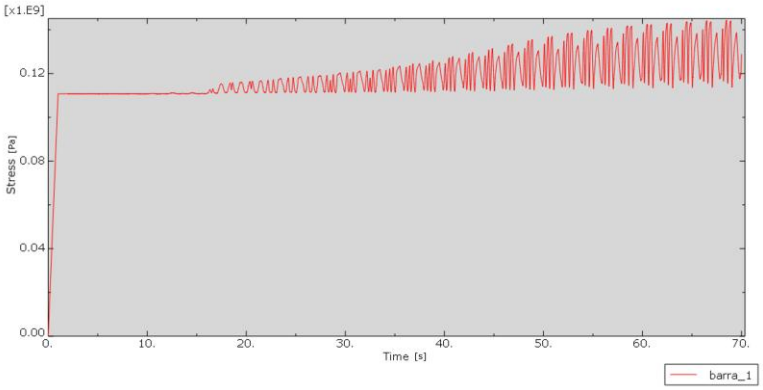
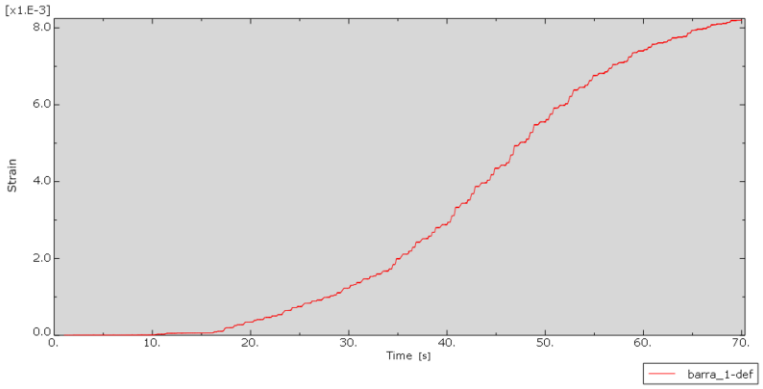
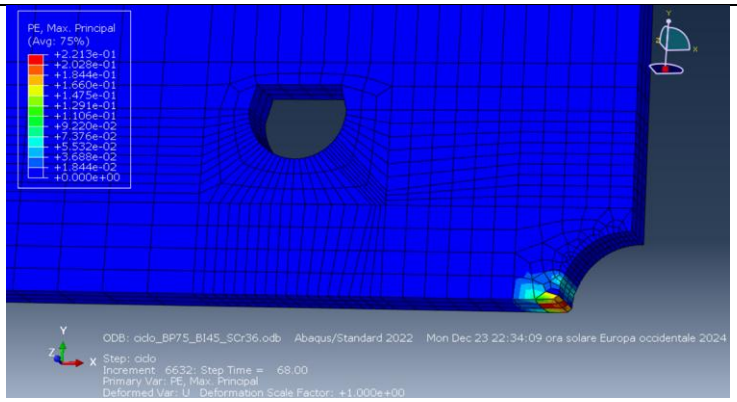
BP75_BI45_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

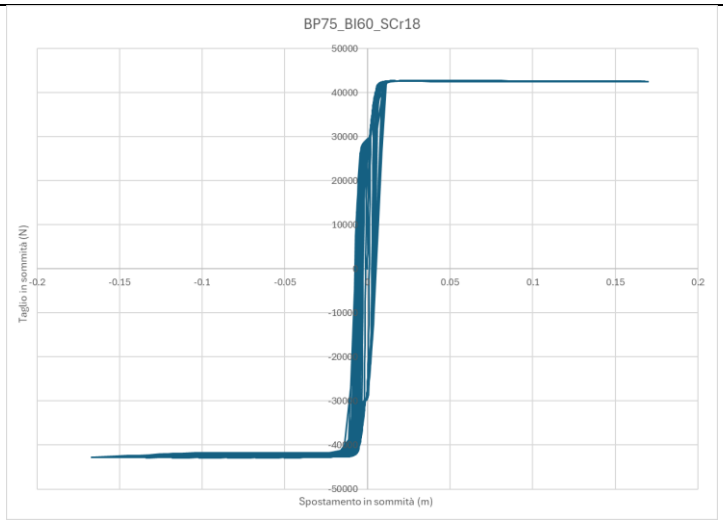
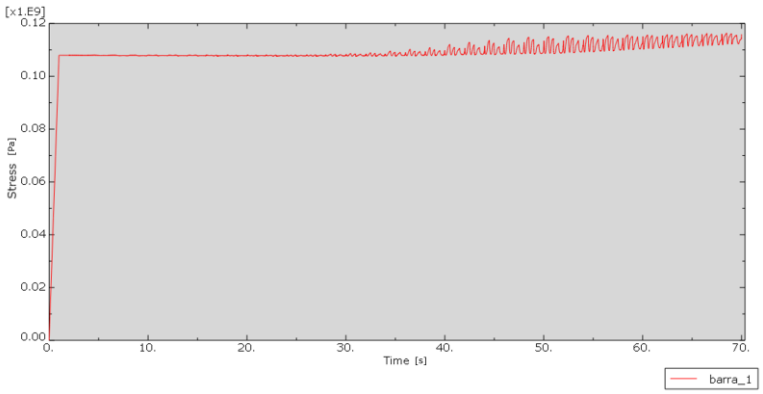
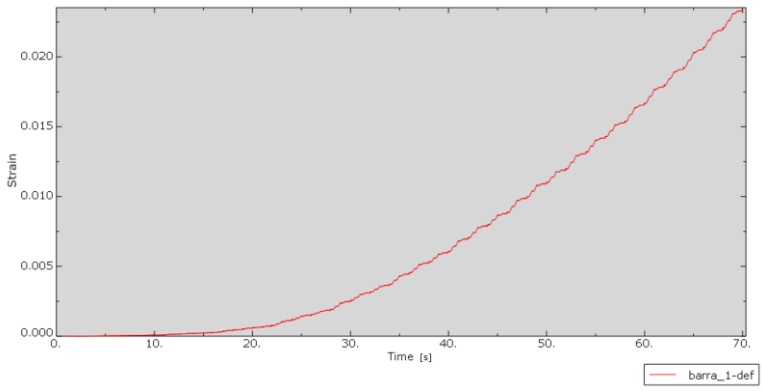
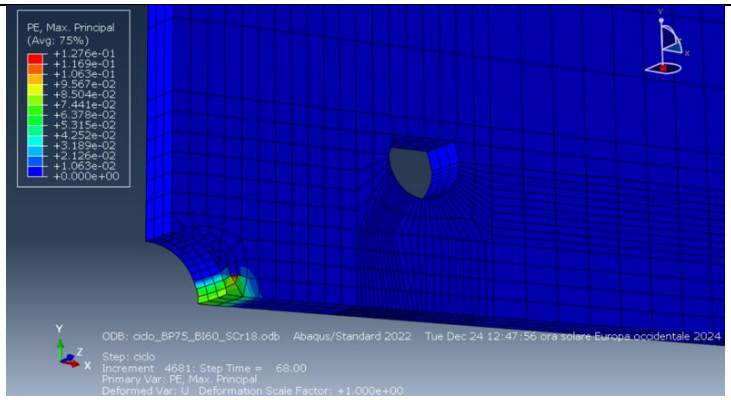
BP75_BI45_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

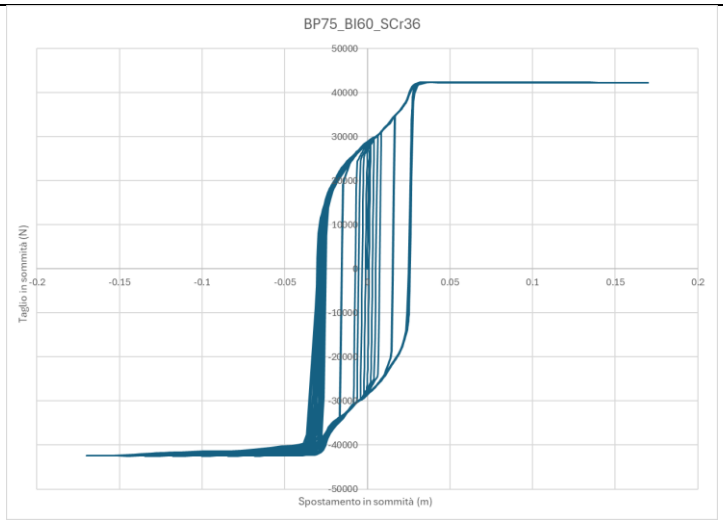
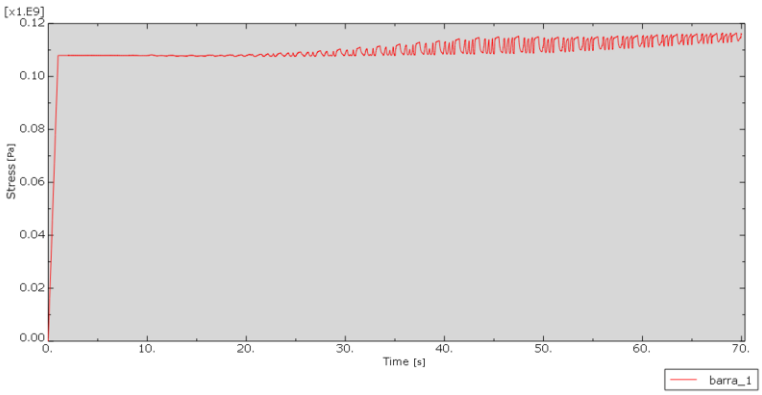
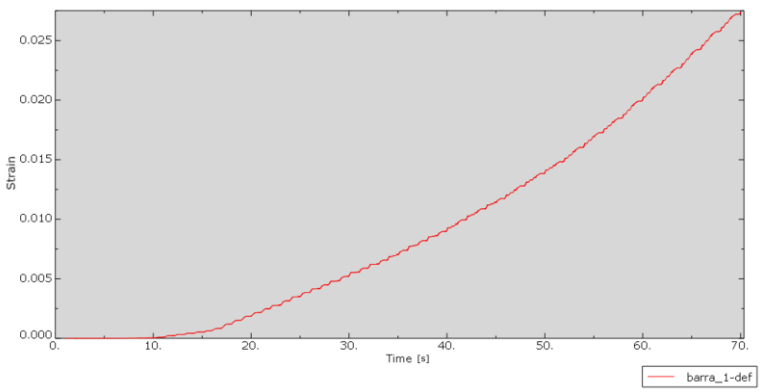
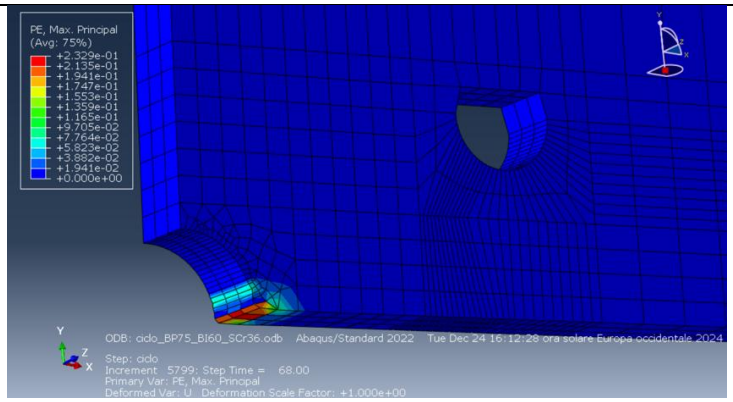
BP75_BI45_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

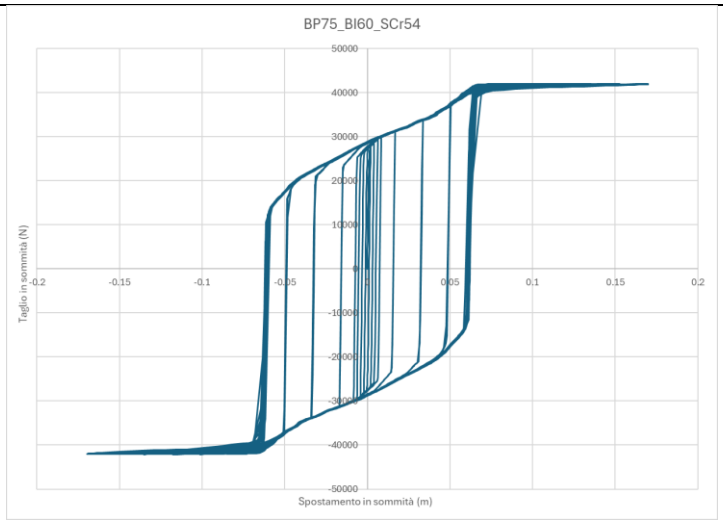
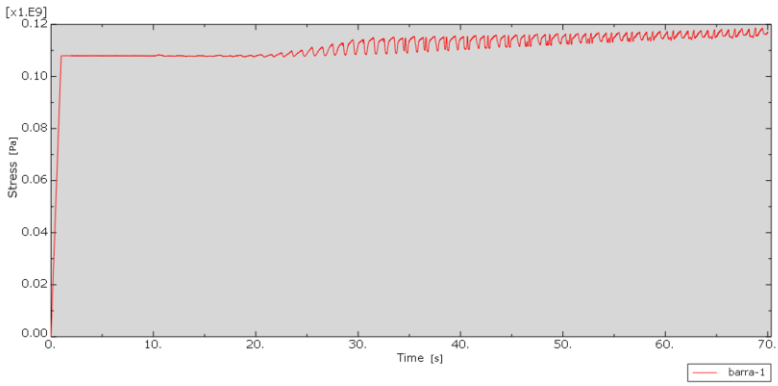
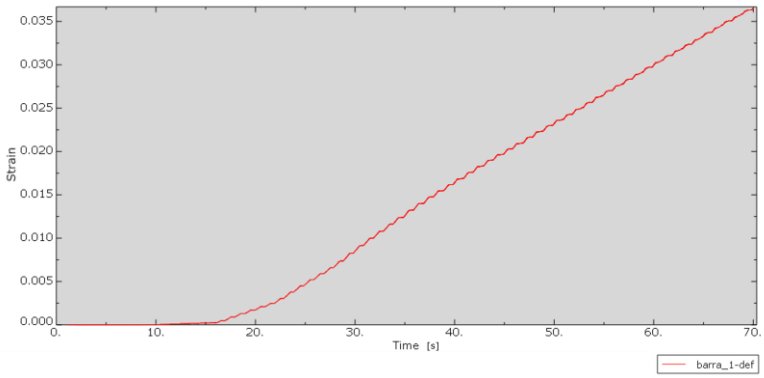
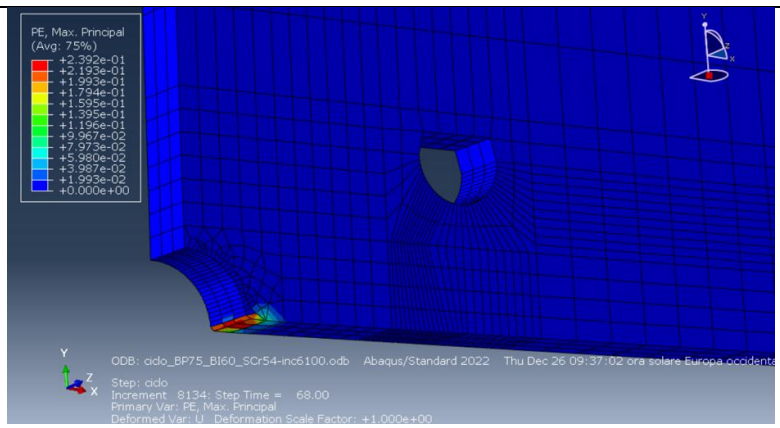
BP75_BI60_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

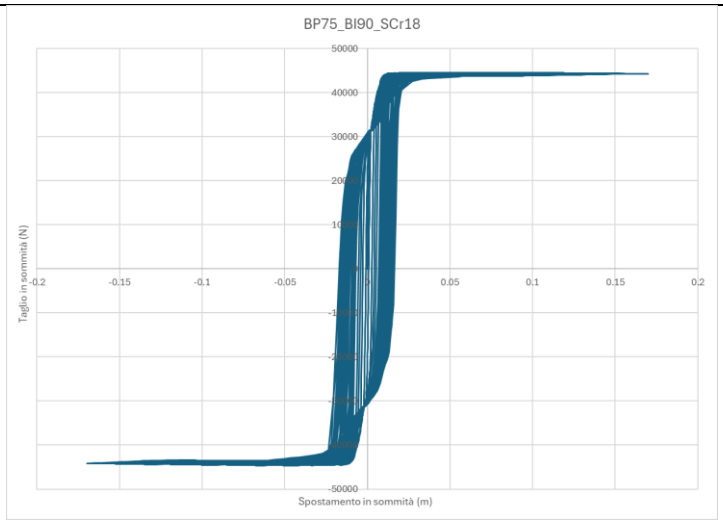
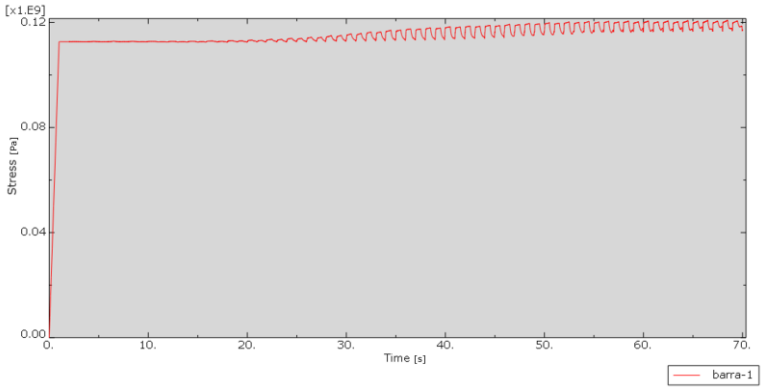
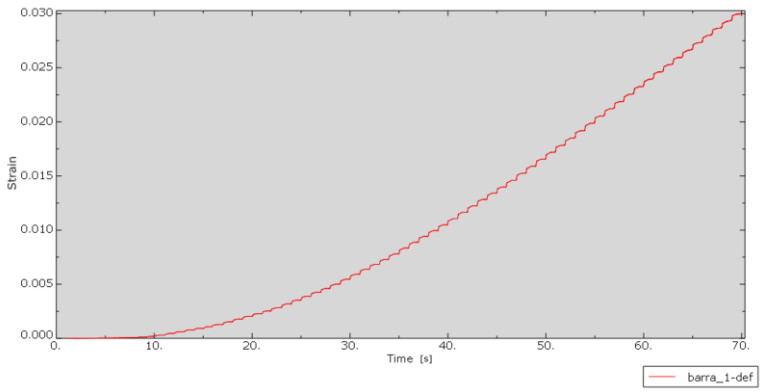
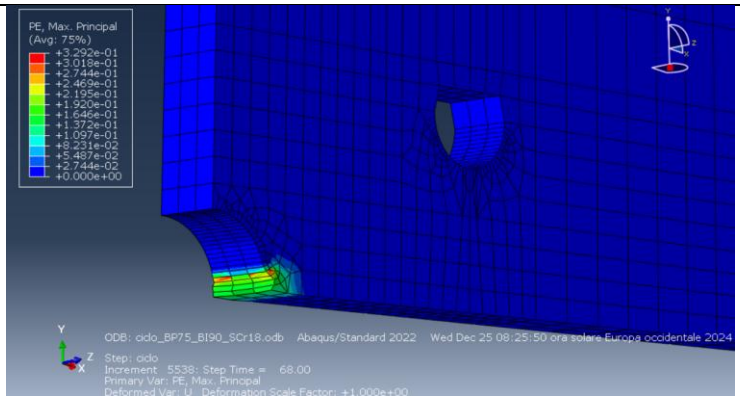
BP75_BI60_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

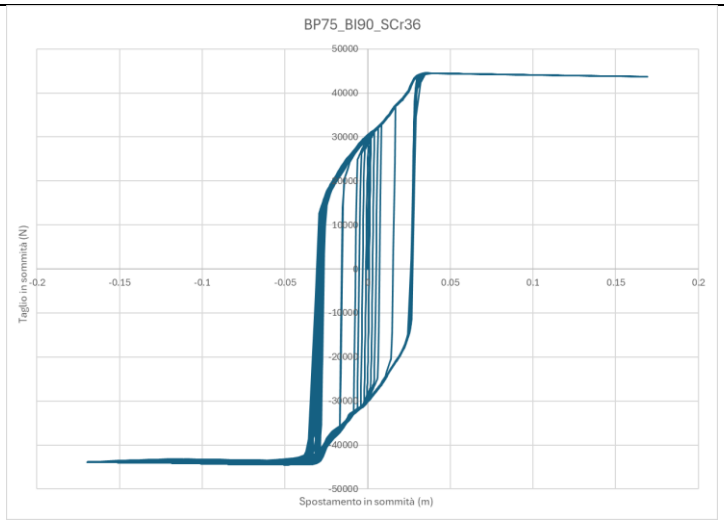
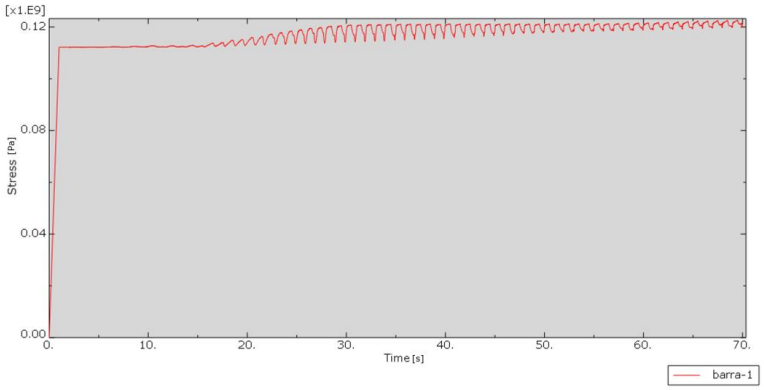
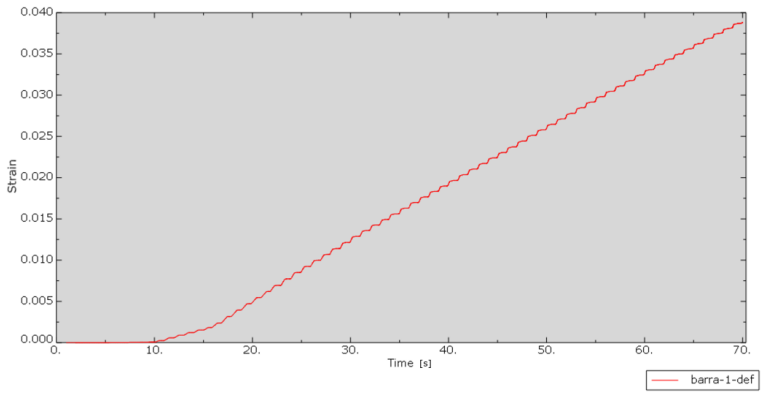
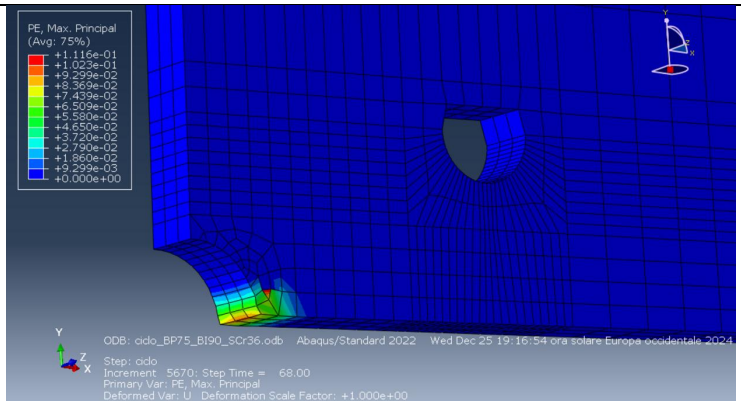
BP75_BI60_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

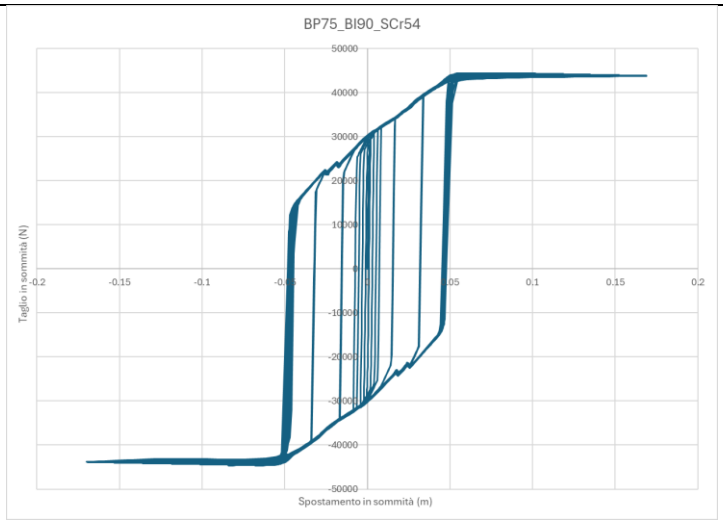
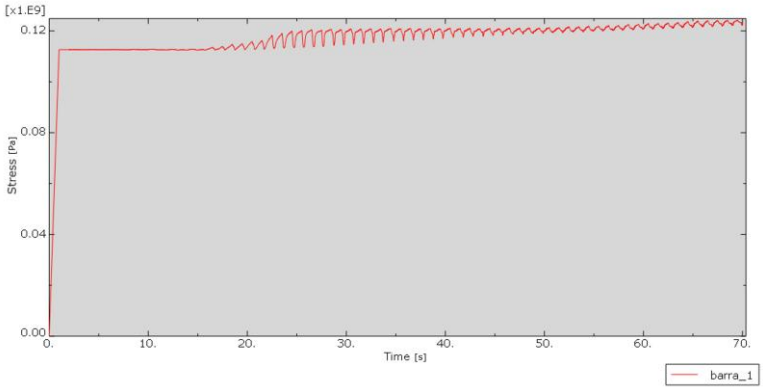
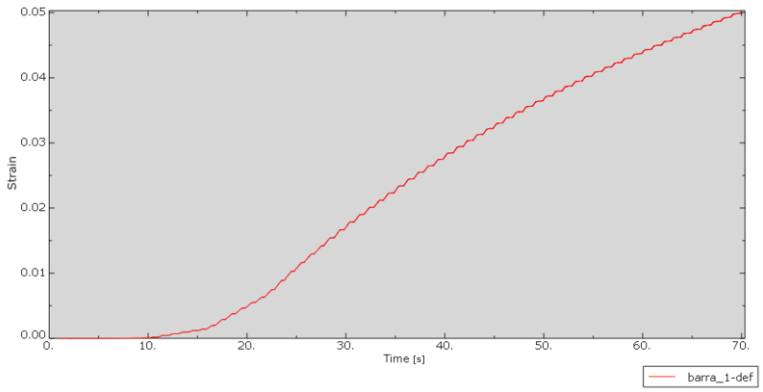
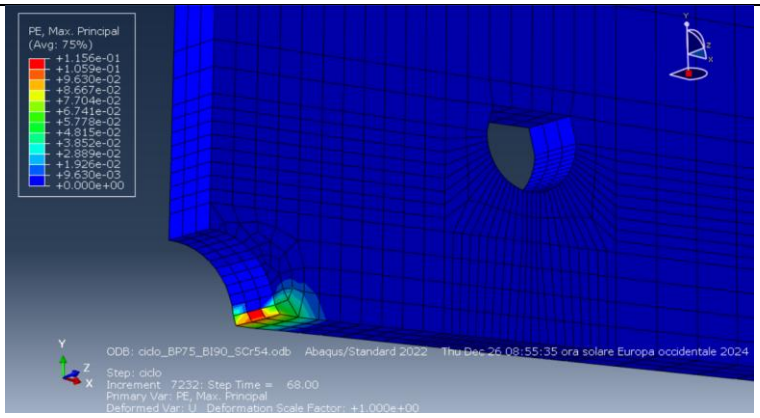
BP75_BI90_SCr18

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP75_BI90_SCr36

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

BP75_BI90_SCr54

Analisi ciclica forza-spostamento	
Andamento medio tensioni barra	
Andamento medio deformazioni barra	
Danneggiamento pannello a fine analisi	

La borsa di dottorato è stata cofinanziata con risorse del Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020, risorse FSE REACT-EU Azione IV.4 “Dottorati e contratti di ricerca su tematiche dell’innovazione” e Azione IV.5 “Dottorati su tematiche Green”.

