



Comportamento dei dispositivi HDRB sotto grandi spostamenti ed elevati carichi assiali

Laura Ragni^a, Fabio Micozzi^b, Giuseppe Brandonisio^c, Andrea Dall'Asta^b, Antonello De Luca^c, Antonio Di Cesare^d, Antonello Mossucca^d, Domenico Nigro^d & Felice C. Ponso^d.

^a Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Via Breccie Bianche, 60131 Ancona

^b Scuola di Ateneo di Architettura e Design, Università di Camerino, Viale della Rimembranza, 63100 Ascoli Piceno

^c Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Piazzale Tecchio 80, Fuorigrotta, 80125 Napoli

^d Scuola di Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano, 85100 Potenza, Italy

Parole chiave: isolatori elastomerici; carico critico; comportamento post-critico; scragging o effetto Mullins

SOMMARIO

Gli isolatori elastomerici ad elevato smorzamento (HDRB) sono stati studiati in modo approfondito, sia dal punto di vista sperimentale che da quello numerico, solo in condizioni di servizio, mentre esistono pochi studi orientati a caratterizzare la risposta per deformazioni maggiori, fino al raggiungimento di condizioni critiche. In questo articolo vengono riportati e discussi i risultati di un'ampia campagna sperimentale condotta su 3 isolatori aventi fattori di forma e mescola in gomma tipicamente utilizzati per l'isolamento sismico di edifici multipiano. Tali dispositivi sono stati sottoposti ad una serie di test a carichi verticali e spostamenti orizzontali crescenti, fino al raggiungimento di valori di deformazione utili alla comprensione della risposta in condizioni estreme. La sequenza di prove ha messo in risalto come la tipica variazione delle proprietà a taglio dovuta alla successione di prove cicliche influenzi le condizioni di instabilità e il comportamento post-critico di questi dispositivi. La seconda parte dell'articolo è dedicata alla simulazione del comportamento degli isolatori elastomerici in condizioni estreme sulla base del modello tridimensionale sviluppato da Kikuchi e disponibile nella piattaforma OpenSees. Questo modello tiene conto degli effetti geometrici non lineari ed è in grado di simulare l'accoppiamento tra la risposta in direzione orizzontale e verticale, che diventa molto significativo per grandi spostamenti e/o grandi carichi assiali.

1 INTRODUZIONE

Il comportamento degli isolatori in condizione critiche, sensibilmente lontane da quelle di progetto, sta trovando un interesse crescente negli ultimi anni (Ponso e Serino 2018) in quanto fondamentale per studiare il rischio sismico di edifici isolati alla base (Ragni et al. 2018). In questo articolo vengono ripresi e commentati i risultati di un'ampia campagna di prove sperimentale condotta presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture dell'Università degli Studi della Basilicata (Brandonisio et al. 2017) su tre isolatori elastomerici ad elevato smorzamento (HDRB) con diversi fattori di forma e soggetti a diversi livelli di carichi verticali. In particolare la rielaborazione dei risultati è stata fatta al fine di

mettere in luce come il danneggiamento della gomma dovuto ai carichi ciclici (Mullins 1969) influenzi in maniera significativa il raggiungimento della condizione limite di carico critico, corrispondente alla perdita di rigidità orizzontale del dispositivo. La seconda parte dell'articolo è dedicata invece alla simulazione del comportamento degli isolatori elastomerici fino a condizioni di instabilità tramite un modello numerico di tipo fenomenologico. In particolare è stato utilizzato il modello tridimensionale di Kikuchi (Ishii e Kikuchi 2018) disponibile nella piattaforma OpenSees (Mc Kenna et al. 2010) che consiste in molle multi-assiali combinate con molle a taglio multidirezionali e che, tenendo conto degli effetti geometrici non lineari, è in grado di simulare l'accoppiamento tra la risposta in direzione orizzontale e verticale, che diventa molto significativo per grandi spostamenti e/o

grandi carichi assiali. Tuttavia, il modello utilizzato non descrive il danneggiamento della gomma dovuto a cicli successivi di carico, a differenza di altri modelli disponibili in letteratura (Grant et al. 2004, Tubaldi et al. 2017, Ragni et al. 2018). Pertanto per la simulazione delle prove sperimentali, oltre alla calibrazione iniziale dei parametri per la gomma non danneggiata, si è dovuto procedere ad una modifica di alcuni di essi al fine di simulare il danneggiamento accumulato nelle diverse sequenze di prova e la sua influenza sul comportamento degli isolatori in condizioni limite.

2 PROVE SPERIMENTALI

La campagna di prove sperimentali condotte presso il Laboratorio di Materiale e Strutture dell'Università degli studi della Basilicata ha riguardato tre isolatori elastomerici realizzati con miscela morbida ($G_{nom}=0.4$ MPa) ad elevato smorzamento ($\xi_{nom}=0.15$) e con diversi fattori di forma primario $S_1=D'/4t_r$ (dove D' è il diametro delle piastre di acciaio e t_r lo spessore del singolo strato di gomma) e secondario $S_2=D/t_e$, (pari al rapporto fra il diametro D del dispositivo e l'altezza totale della gomma t_e). Le caratteristiche sono riassunte in Tabella 1 (Brandonisio et al. 2017).

Tabella 1. caratteristiche geometriche degli isolatori

Isolatore	Φ [m]	t_r [mm]	t_e [mm]	S_1	S_2
SI-S-500-176	500	5.5	176	22.7	2.8
SI-S-600-217	600	7	217	21.4	2.8
SI-S-700-207	700	9	207	19.5	3.4

Nel seguito si riporta un'elaborazione delle prove condotte sull'isolatore SI-S700-207. Le prove sono state effettuate in sequenza secondo la numerazione corrispondente al nome associato alla prova e comprendono sia prove cicliche a taglio (Shear Cyclic Tests, SCTs) condotte ad una frequenza di 0.5 Hz e a deformazioni di taglio massime (γ_{max}) pari a 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 con pressione verticale agente (σ) pari a 6 MPa, sia prove quasi-statiche (Shear Quasistatic Tests, SQTs) costituite da un solo ramo di carico e scarico effettuato a deformazioni positive fino a $\gamma_{max}=2$ e a diverse pressioni verticali comprese tra 6MPa e 20 MPa. Si analizzano in primo luogo i test ciclici (Test 3, 6, 16) riportati in Figura 1a, da cui risulta evidente il comportamento degradante dell'isolatore dovuto sia alla ripetizione dei cicli di carico all'interno di ogni singola prova sia alle prove quasi-statiche (Figura 1 b-c-d) condotte tra una prova e l'altra.

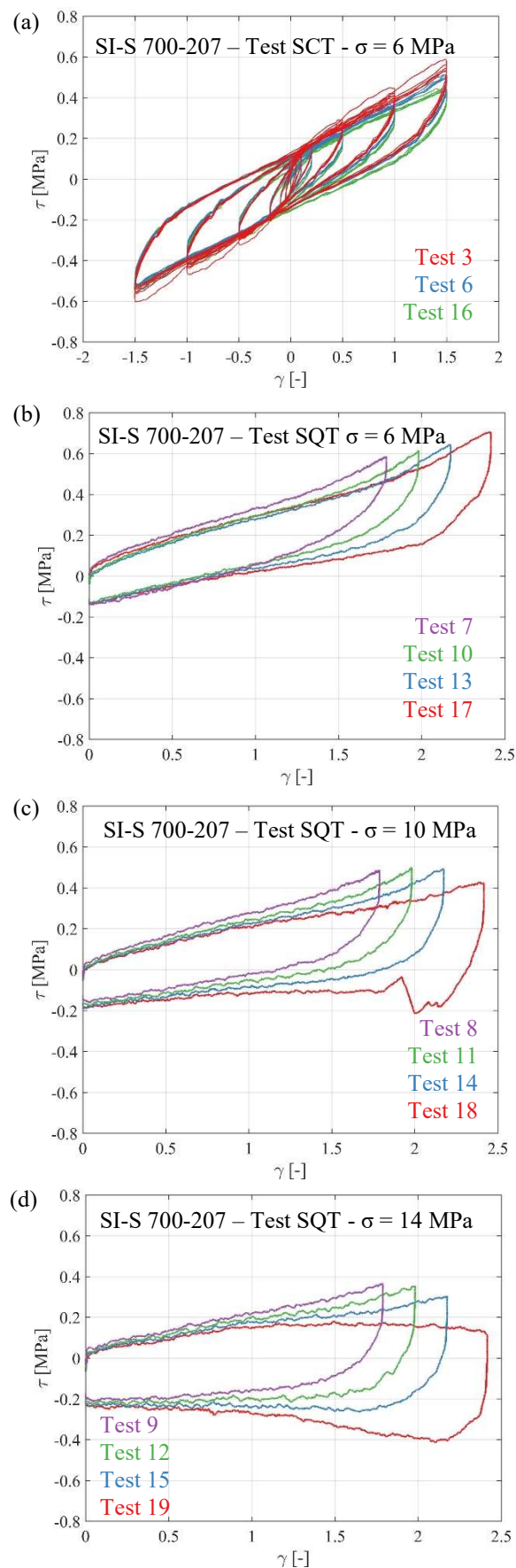


Figura 1. Prove cicliche e prove quasi-statiche condotte sul dispositivo SI-S 700-207

Si osserva inoltre il marcato danneggiamento asimmetrico (solo per deformazioni positive) dovuto proprio alla serie di prove quasi-statiche

effettuate solo nella direzione positiva, come già evidenziato in (Tubaldi et. al 2017, Ragni et al. 2018). In Figura 2 sono riportati i risultati delle elaborazioni dei test ciclici in termini di modulo a taglio della gomma (G) e coefficiente di smorzamento (ξ) calcolati secondo le EN 15129 (ECS 2009) e relativi alle diverse deformazioni a taglio e ai vari cicli di carico.

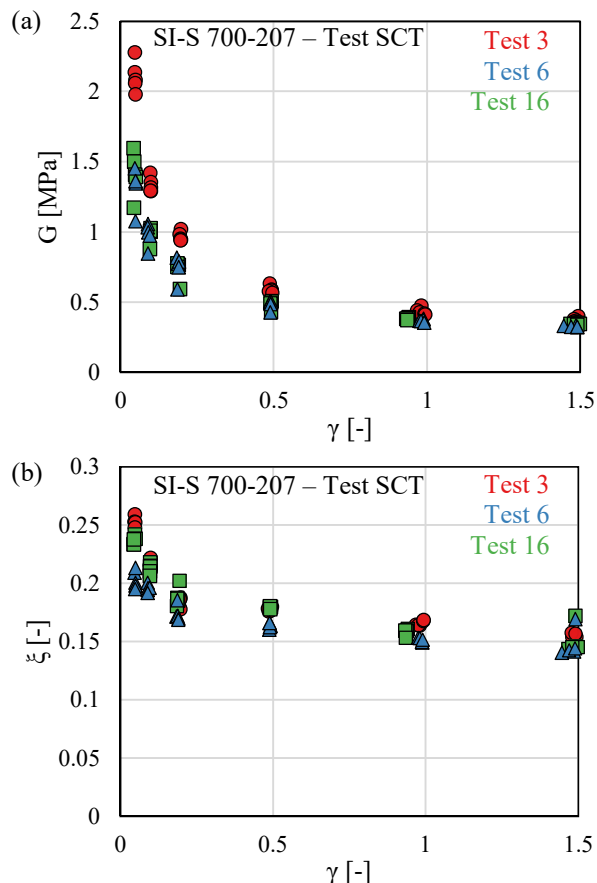


Figura 2. Risultati delle elaborazioni dei test ciclici: (a) modulo a taglio G , (b) coefficiente di smorzamento ξ

Le prove quasi-statiche a taglio sono state condotte per diversi valori di deformazione a taglio e per diversi valori della pressione verticale. In particolare, per il dispositivo in oggetto la sequenza di prova è costituita da test a $\gamma_{\max}=1.75$ eseguiti prima a $\sigma=6\text{MPa}$ poi $\sigma=10\text{MPa}$ ed infine $\sigma=14\text{MPa}$. Successivamente le prove sono state ripetute a γ_{\max} pari a 2, 2.2 e 2.4, sempre ripetendo ogni volta la prova per i tre valori di pressione verticale. Nelle figure 1b, 1c, 1d i risultati sono stati rappresentati raggruppando i test in base al valore di pressione verticale. Il fenomeno interessante da osservare è sempre legato al danneggiamento della gomma che si manifesta come una diminuzione complessiva della rigidezza del ciclo. Osservando le figure risulta evidente come in tutti i casi passando dai primi cicli a $\gamma_{\max}=1.75$ ai successivi a deformazioni massime superiori la rigidezza del ciclo

diminuisce in quanto, considerando la sequenza delle prove, la gomma subisce tre cicli di carico ad una certa γ_{\max} prima di passare alla prova con deformazione maggiore. E' interessante osservare che nel caso di prove a compressione elevata (10MPa e, in misura più evidente, 14MPa) il fenomeno appena descritto influenza in maniera significativa il comportamento a grandi deformazioni. Infatti, mentre nei Test 11 e 15 si osserva un comportamento ancora "stabile", nel senso che il ciclo mostra rigidezza positiva fino alla deformazione massima, nei Test 18 e 19, effettuati con gli stessi livelli di deformazione, si inizia ad osservare una riduzione della rigidezza importante dovuta agli effetti geometrici.

3 SIMULAZIONE NUMERICA

Per la simulazione delle prove sperimentali è stato utilizzato il modello originariamente sviluppato in Kikuchi (Kikuchi et al. 2010) e implementato in Opensees (Mc Kenna et al. 2010) secondo Ishii e Kikuchi 2018. Il modello di isolatore è composto da due modelli di materiale che descrivono rispettivamente il comportamento mono-dimensionale a taglio fino ad alti livelli di deformazione (Kikuchi e Aiken 1997) e il comportamento assiale che, nella formulazione originale, è elastico lineare a compressione fino a valori di pressione pari a circa 100MPa ed elastoplastico incrudente a trazione per tener conto del fenomeno della cavitazione. I due materiali sono richiamati dall'elemento "Kikuchi Bearing element" che simula il comportamento tridimensionale dell'isolatore attraverso una distribuzione spaziale di molle assiali e una distribuzione radiale molle a taglio. Inoltre, l'elemento si basa su una formulazione della cinematica in grandi spostamenti e permette di cogliere l'influenza dello sforzo assiale sul comportamento a taglio, fornendo quindi una stima degli spostamenti accoppiati verticali e orizzontali degli isolatori. Più in dettaglio, il comportamento a taglio è definito da un ciclo isteretico descritto da tre coefficienti (c_g , c_h e c_u) che controllano rispettivamente la rigidezza, la dissipazione e le caratteristiche del ramo di scarico. I modelli di risposta delle molle assiali e delle molle a taglio non considerano alcun effetto di danneggiamento progressivo della gomma con conseguente riduzione di rigidezza o smorzamento del ciclo, come invece si può trovare in altri modelli bi-dimensionali o tri-dimensionali di

isolatore presenti in letteratura (Grant et al. 2004, Tubaldi et al. 2017 Ragni e al. 2018).

3.1 Modello originale Kikuchi

Il materiale di base utilizzato per la gomma è il materiale X0.4-0MPa (Bridgestone Corporation, 2017) modificata per ottenere un comportamento compatibile alla gomma degli isolatori testati. In particolare, sono stati assunti i seguenti parametri: una rigidità nominale a taglio $G = 0.4$ MPa, una rigidità volumetrica $K_{bulk} = 2000$ MPa e una tensione di cavitazione a trazione pari a $3G = 1.2$ MPa (Kumar et al. 2015). In Figura 3 è riportata la simulazione della prova a compressione. Inoltre, per quanto riguarda il materiale a taglio, sono stati calibrati i parametri c_g , c_h e c_u pari rispettivamente a 1.15, 0.75 e 0.75, in modo tale da riprodurre correttamente il terzo ciclo di carico del primo test ciclico effettuato sull'isolatore (Test 3), come richiesto dalle normative vigenti sui dispositivi antisismici EN 15129 (ECS, 2009).

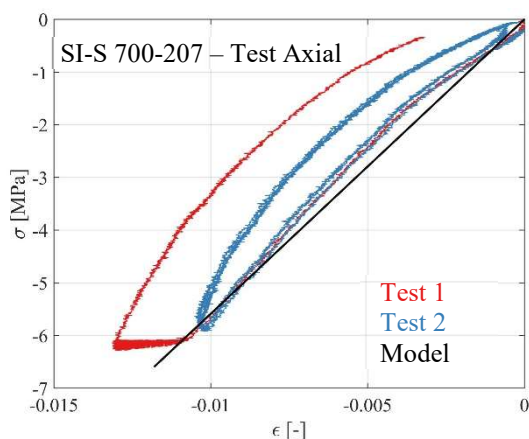


Figura 3. Simulazione delle prove assiali a compressione

Successivamente, al fine della corretta simulazione dei test, il solo coefficiente c_g è ridotto di una percentuale pari al 91% e dell'83% rispetto a quella iniziale. Utilizzando queste impostazioni le prove cicliche del Test 6 sono correttamente simulate (Figura 4a), ma le prove cicliche successive con rigidità ridotta per effetto del danneggiamento mostrano alcune differenze significative (Figure 4b e 4c). La causa di tale fenomeno risiede nell'utilizzo di una tensione di cavitazione pari a $3G$ per molle assiali, che sembra non essere corretta. A supporto di tale affermazione si rimanda ad alcuni risultati relativi a campagne sperimentali (Figura 5) condotte su HDRBs (Kumar et al. 2015), dalle quali è risultato che la cavitazione alla tensione di $3G$ può avvenire solamente a deformazioni a taglio basse o nulle, mentre. Per prove di trazione effettuate a

spostamenti orizzontali più grandi tale fenomeno non avviene come riportato anche in Kelly e Kostantinidis 2011.

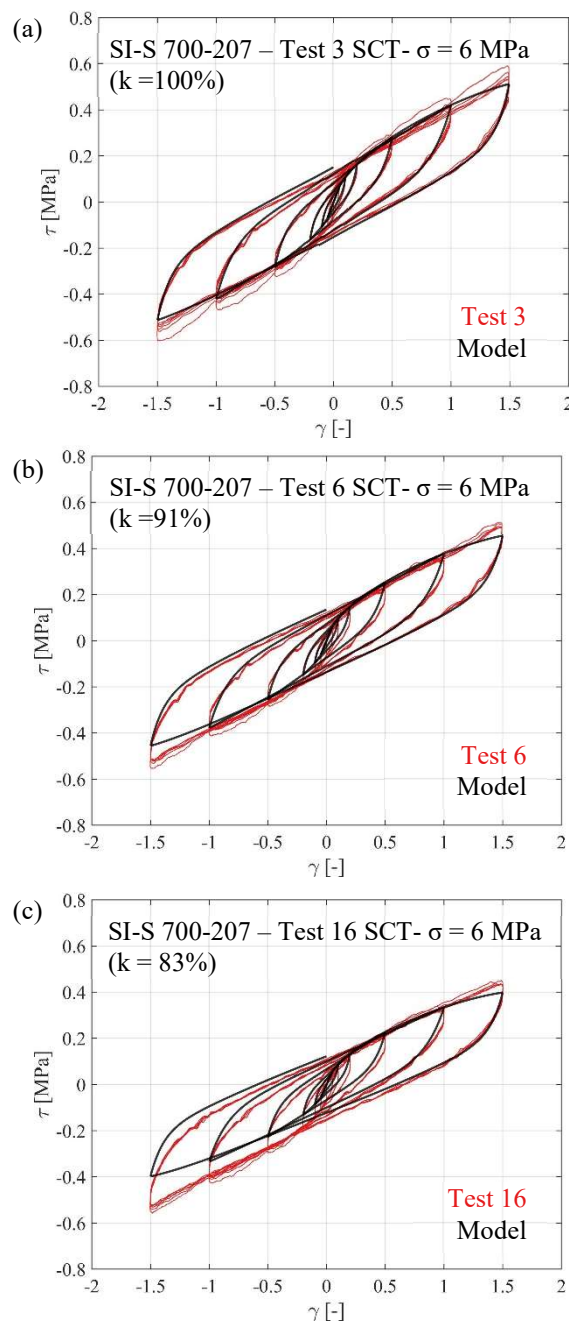


Figura 4. Simulazione delle prove cicliche (modello con limite di cavitazione pari a 1.2MPa)

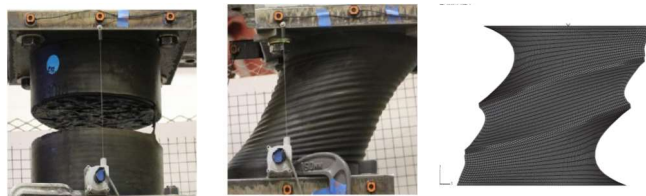


Figura 5. Prova a trazione e taglio-trazione (Kumar 2015) e modellazione numerica (Kelly Kostantinidis 2011)

Per lo stesso motivo, anche le prove quasi-statiche mostrano tutte delle differenze importanti tra i risultati numerici e sperimentali, in particolare il modello sembra sottostimare costantemente la reale capacità di portare i carichi verticali degli

isolatori (Figura 6), mostrando un effetto P- Δ molto più marcato di quello reale.

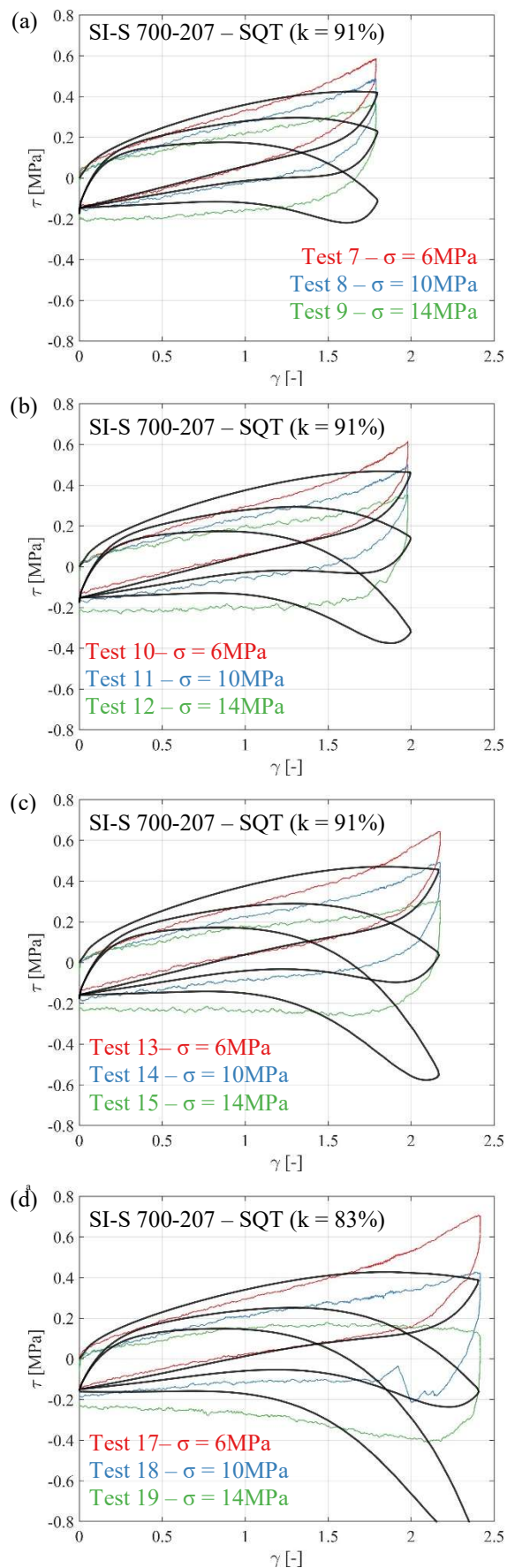


Figura 6. Simulazione delle prove quasi-statiche (modello con limite di cavitazione pari a 1.2MPa)

3.2 Modello modificato Kikuchi

Impedendo la cavitazione locale delle molle assiali, tramite la loro modellazione come molle elastiche lineari, in accordo con la teoria originale di Kelly (Kelly 1997), i cicli sperimentali e numerici sono in buon accordo, come riportato nella Figure 7 (test ciclici) e nella Figura 8 (prove quasi-statiche). Anche in questo caso è stata considerata una rigidezza orizzontale ridotta del 91% (Test 6) e dell'83% (Test 16) rispetto a quella iniziale. Si precisa che anche la rigidezza verticale è stata progressivamente ridotta in accordo con quella orizzontale.

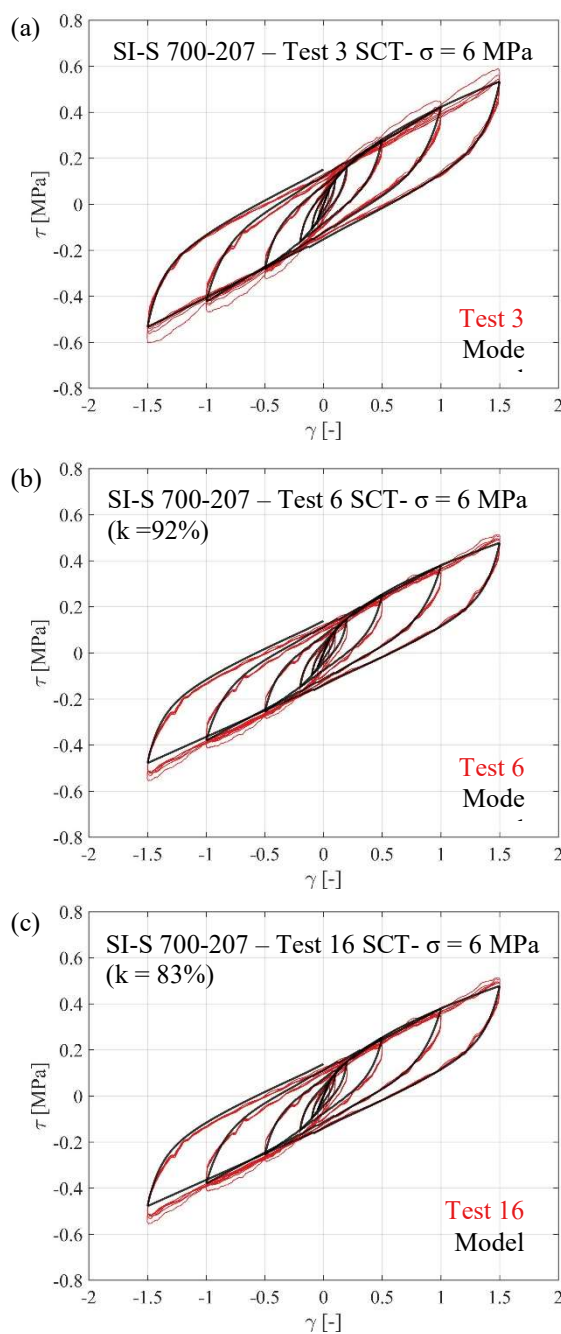


Figura 7. Simulazione delle prove cicliche (modello con molle elastiche a trazione)

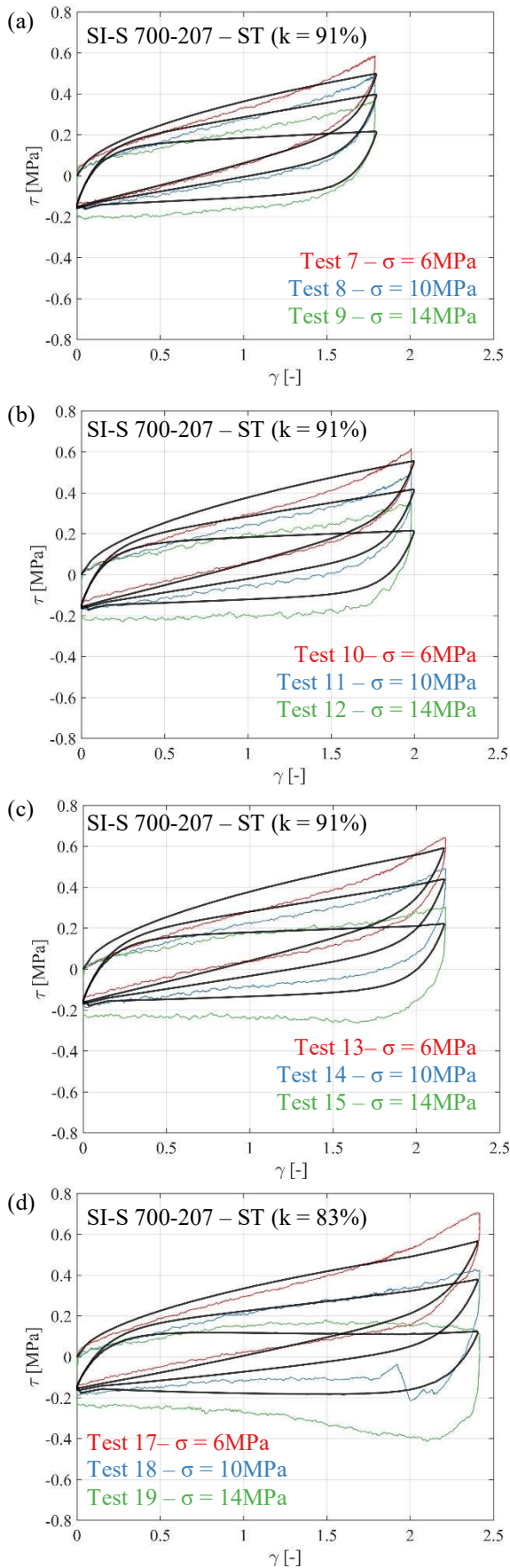


Figura 8. Simulazione delle prove quasi-statiche (modello con molle elastiche a trazione)

L'assunzione di molle assiali elastiche nel modello di Kikuchi ha il vantaggio di non richiedere la calibrazione di nessun parametro,

tuttavia non permette di simulare esattamente il comportamento post-critico fortemente non lineare e con rigidezza negativa, per il quale sono necessarie molle a trazione elastoplastiche con limite elastico opportunamente tarato. Si riporta a titolo puramente di esempio (Figura 9), la simulazione numerica delle prove con limite elastico tarato a 30G e coefficiente di incrudimento pari a 0.001.

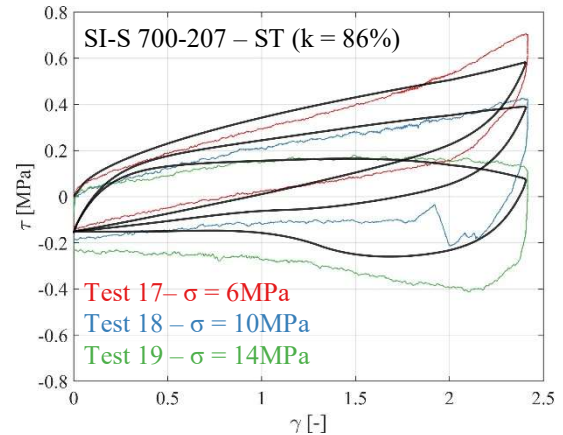


Figura 9. Simulazione delle prove quasi-statiche (modello con limite di cavitazione pari a 40Mpa)

4 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati inizialmente presentati e discussi i risultati di una campagna sperimentale condotta su 3 isolatori elastomerici circolari ad alto smorzamento (HDRB) aventi caratteristiche geometriche e meccaniche tipiche dell'applicazione del BIS agli edifici multipiano.

L'analisi dei risultati sperimentali ha evidenziato come la tipica variazione delle proprietà a taglio dovuta alla successione di prove cicliche influenzi le condizioni di instabilità e il comportamento post-critico di questi dispositivi.

Nella seconda parte della nota, la risposta sperimentale dei dispositivi è stata simulata mediante un modello numerico implementato nella piattaforma OpenSees utilizzando il modello meccanico tridimensionale di Kikuchi, che consente di simulare il comportamento dei dispositivi HDRB in grandi spostamenti e/o elevati carichi assiali.

Tuttavia, poiché il modello di Kikuchi non è in grado di descrivere il danneggiamento della gomma sottoposta a cicli successivi di carico, si è dovuto procedere ad una modifica di alcuni parametri del modello al fine di simulare il danneggiamento accumulato nelle diverse sequenze di prova e la sua influenza sul comportamento degli isolatori in condizioni limite.

Il confronto con fra i cicli sperimentali e quelli numerici ha evidenziato la buona capacità predittiva del modello numerico implementato nel presente lavoro.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del Progetto ReLUIS-DPC 2019/2021 (Work Package 15 - Contributi Normativi per Isolamento e Dissipazione). Gli autori ringraziano il Dipartimento della Protezione Civile per il supporto finanziario ricevuto.

REFERENCES

- Brandonisio, G., Ponzo, F., Mele, E., De Luca, A., 2017. Prove sperimentali di isolatori elastomerici: influenza del carico verticale V e del fattore di forma secondario S2. XIV Convegno ANIDIS "L'ingegneria Sismica in Italia"., 17-21 Settembre, Pistoia, IT.
- European Committee for Standardization (ECS), 2009. *EN 15129:2009, Anti-seismic devices*, CEN, Bruxelles.
- Ishii, K., Kikuchi, M., 2018. Improved numerical analysis for ultimate behavior of elastomeric seismic isolation bearings. *Earthquake engineering and structural dynamics*, **48**(1), 65-77.
- Kelly, J.M., Konstantinidis, D., 2011. *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Kelly, J.M., (1997). *Earthquake-Resistant Design with Rubber*. Springer.
- Kikuchi, M., Nakamura, T., Aiken, I.D., 2010. Three-dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformations and high axial loads. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**:1513–153.
- Kikuchi, M., Aiken, I.D., 1997. An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**(2):215-231.
- Kumar, M., Whittaker, A. and Constantinou, M., 2015. Experimental investigation of cavitation in elastomeric seismic isolation bearings, *Engineering Structures* **101**,290-305.
- Mc Kenna, F., 2011. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation, *Computing in Science & Engineering*, **13**(4), 58-66. (<http://opensees.berkeley.edu>).
- Montuori, G., Mele, E., Marrazzo, G., Brandonisio, G., De Luca, A., 2016. Stability issues and pressure-shear interaction in elastomeric bearings: the primary role of the secondary shape factor, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **14**(2), 569-597.
- Mullins, L., 1969. Softening of rubber by deformation, *Rubber Chemistry and Technology*, **42**(1): 339-362.
- Ponzo F e Serino G. (2018). Report Linea 6 "Isolamento e dissipazione", disponibile su www.reluis.it
- Ragni, L., Cardone, D., Conte, N., Dall'Asta, A., Di Cesare, A., Flora, A., Leccese, G., Micozzi, F., Ponzo, C., 2018. Modelling and seismic response analysis of Italian code-conforming base-isolated buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, **22**,198-230.
- Ragni, L., Tubaldi, E., Dall'Asta, A., Ahmadi, H., Muhr, A., 2018. Biaxial shear behaviour of HDNR with Mullins effect and deformation-induced anisotropy, *Engineering Structures*, **154**, 78-92.
- Tubaldi, E., Ragni, L., Dall'Asta, A., Ahmadi, H., Muhr, A., 2017. Stress-softening behaviour of HDNR bearings: modelling and influence on the seismic response of isolated structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **46**(12), 2033-2054.