



**POLITECNICO
MILANO 1863**

**VI Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi
Edilizi**

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA

**Determinazione sperimentale delle proprietà
meccaniche di sigillanti siliconici soggetti a carichi
ciclici e monotoni**

*Prof. Ing. Liberato Ferrara
Ing. Bruno Alberto Dal Lago*

A.A 2015-2016

Studente. Marjo Cerriku matricola. 750200

Grazie!

Al Prof. Ferrara, Ing. Dal Lago e Ing. Lamperti per il loro supporto e la loro guida sapiente durante la stesura di questa tesi. Sono molto lieto di aver avuto l'occasione di lavorare con Voi.

Al personale tecnico del Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Politecnico di Milano per la loro assistenza durante le prove sperimentali.

A tutti i miei amici con i quali ho trascorso meravigliosi e indimenticabili anni insieme al Politecnico.

Ai miei genitori, fratelli, tutta la mia famiglia e al mio amore per aver creduto sempre in me.

ABSTRACT

Recent violent earthquakes in southern Europe, including L'Aquila in 2009, Granada in 2010 and Emilia in 2012 have highlighted a major problem of connections of panels used in prefabricated buildings.

The connections were not designed to carry the load increased and oriented differently than the design hypotheses. Several studies have been performed on this, to give a design support for future connections to use. Part of the SAFECLADDING program is the study of the contribution due to the silicone sealant used between the joints of the panels and panels-roof structure.

The aim of the thesis is to give an indication on the contribution in terms of strength of the coupling to the cladding panels during a seismic event. It was campaigned for experimental determination of mechanical properties of silicone sealants, scaling reduced samples subjected to cyclic loading and monotonous and on a full scale structural subset with very low speeds compared to that achieved in case of earthquake, which however by signs on the behavior of silicone.

From the results it's possible to see that stiffness values are low, so they they can be disregarded for the purposes of structural design of an entire building or single panel. It was noted as the maximum strength that the joint can reach can also determine an important contribution for single panel connection system design and flat diaphragm.

Keywords; silicone sealants, structural silicone, SAFECLADDING, SAFECAST, cladding pannels.

SOMMARIO

Recenti scosse violenti nell'Europa meridionale, tra cui L'Aquila nel 2009, Granada nel 2010 ed Emilia nel 2012 hanno messo in evidenza un grave problema delle connessioni dei pannelli di rivestimento utilizzate negli edifici prefabbricati.

Le connessioni non erano progettate a portare il carico aumentato e diversamente orientato rispetto alle ipotesi progettuali. Diversi studi sono stati eseguiti in merito, per dare un supporto progettuale per le future connessioni da utilizzare. Parte del programma SAFECLADDING è anche lo studio del contributo dovuto al sigillante siliconico utilizzato tra i giunti dei pannelli stessi e pannelli-struttura portante.

L'obiettivo della tesi è quello di dare un'indicazione sul contributo in termini di forza del giunto ai pannelli di rivestimento durante un evento sismico. E' stata fatta una campagna sperimentale per la determinazione delle proprietà meccaniche di sigillanti siliconici, su campioni di scala ridotta soggetti a carichi ciclici e monotoni e su un sottoinsieme strutturale in scala reale con velocità molto basse rispetto a quella raggiunta in caso di sisma, che comunque dà indicazioni sul comportamento del silicone.

Dai risultati ottenuti è possibile osservare come i valori di rigidezza siano poco elevati, così da poter essere trascurati ai fini della progettazione strutturale di un intero edificio o del singolo pannello. Si è osservato come la resistenza massima che il giunto può raggiungere possa altresì determinare un importante contributo per la progettazione del sistema di connessione del singolo pannello e del diaframma di piano.

Parole chiavi; sigillanti siliconici, silicone strutturale, SAFECLADDING, SAFECAST, pannelli di rivestimento.

INDICE

1 INTRODUZIONE.....	6
1.1 I MATERIALI SILICONICI: COSA SONO E A COSA SERVONO	6
1.2 UTILIZZO DEI MATERIALI SILICONICI NEL CAMPO DELLE COSTRUZIONI	8
1.3 RICERCA NEL CAMPO DEI MATERIALI SILICONICI.....	11
1.4 OBIETTIVO DELLA RICERCA EFFETTUATA NELLA PRESENTE TESI	13
2 CONTESTO INGEGNERISTICO.....	14
2.1 COMPORTAMENTO SISMICO DELLE STRUTTURA A TELAIO PREFABBRICATE.....	14
2.2 INFLUENZA DEI PANNELLI DI TAMPONAMENTO.....	26
3 DESCRIZIONE ATTIVITA' SPERIMENTALE.....	35
3.1 DESCRIZIONE MODALITA' PREPARAZIONE DEI PROVINI.....	35
3.2 DESCRIZIONE APPARATI DI PROVA.....	37
3.3 CAMPAGNA SPERIMENTALE.....	39
4 RISULTATI E INTERPRETAZIONE	44
4.1 PROVE LOCALI MONOTONE	44
4.1.1 TO-M-10-60-F-1	45
4.1.2 TO-M-10-60-F-2	46
4.1.3 TO-M-10-60-S-1.....	47
4.1.4 TO-M-10-60-S-2.....	48
4.1.5 TO-M- 10-90-S-1.....	49
4.1.6 TO-M- 10-90-S-2.....	50
4.1.7 TO-M- 10-90-F-1	51
4.1.8 TO-M- 10-90-F-2	52
4.1.9 TO-M- 15-90-S-2.....	53

4.1.10	TO-M- 15-90-S-1	54
4.1.11	TO-M- 15-90-F-1	55
4.1.12	TO-M- 15-90-F-2	56
4.1.13	TO-M- 20-120-S-1	57
4.1.14	TO-M- 20-120-S-2	58
4.1.15	TO-M- 20-120-S-3	59
4.1.16	TO-M- 20-120-F-1	60
4.1.17	TO-M- 20-120-F-2	61
4.1.18	CONSIDERAZIONI PROVE LOCALI MONOTONE	62
4.2	PROVE LOCALI CICLICHE	69
4.2.1	TO-C-10-60-F-1	69
4.2.2	TO-C-10-60-F-2	71
4.2.3	TO-C-10-90-F-1	73
4.2.4	TO-C-10-90-F-2	75
4.2.5	TO-C-15-90-F-1	77
4.2.6	TO-C-15-90-F-2	79
4.2.7	TO-C-20-120-F-1	81
4.2.8	TO-C-20-120-F-2	83
4.2.9	CONSIDERAZIONI SULLE PROVE CICLICHE E MONOTONE	85
4.3	PROVA SU SOTTOSISTEMA STRUTTURALE	88
4.3.1	IMPIANTO DI PROVA	88
4.3.2	RISULTATI SPERIMENTALI	88
4.3.3	CONFRONTO PROVE MONOTONE-CICLICHE LOCALI E SOTTOSISTEMA	93
5	CONCLUSIONI	94
5.1	CALCOLI PROGETTUALI	94
5.2	CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI	96
	BIBLIOGRAFIA	97

1 INTRODUZIONE

1.1 I MATERIALI SILICONICI: COSA SONO E A COSA SERVONO

I siliconi sono una moderna classe di materiali sintetici, oligomeri ad alto rendimento o polimeri che possono prendere avere una varietà di forme fisiche, che vanno da solidi a liquidi ed hanno letteralmente migliaia di applicazioni. Essi sono noti per la loro resistenza a condizioni che distruggerebbero materiali convenzionali. I siliconi (o polisilossani) sono polimeri inorganici basati su una catena silicio-ossigeno e gruppi funzionali organici (R) legati agli atomi di silicio. Il termine inizialmente indicava i composti aventi formula generica $R_2Si=O$, in analogia ai chetoni. Il silicone fu sintetizzato nel 1907 da Frederick Kipping. A seconda della lunghezza della catena silossanica, della sua ramificazione e dei gruppi funzionali, si possono ottenere numerosi materiali dalle più varie caratteristiche. In commercio si trovano siliconi della più varia consistenza (dall'oleoso al gommoso) che possono essere divisi in varie classi di applicazione, come, liquidi, emulsioni, composti, lubrificanti, resine, elastomeri, plastiche. I materiali siliconici hanno la peculiarità di essere notevolmente resistenti alla temperatura, agli attacchi chimici e all'ossidazione, e sono ottimi isolanti elettrici, hanno basse tensioni superficiali. Sono ottimi antiaderenti, elastici, resistenti all'invecchiamento e alle alte temperature. Sono utilizzati nei più disparati settori grazie anche alla loro versatilità, ad esempio, settore dei cosmetici, settore automobilistico, settore aeronautico, settore edile, ecc.

Siliconi e trasporto, creare nuovi mezzi di trasporto moderni più veloci, affidabili ed efficienti vuol dire creare materiali i quali devono resistere a elevate temperature

umidità, sale e combustibili. Molti materiali deteriorano in queste condizioni ma non i siliconi. I siliconi mantengono le loro proprietà in modo che automobili, navi, aerei e treni mantengano la loro funzionalità durante loro ciclo di vita.

Siliconi e costruzioni. I siliconi creano un legame con la maggior parte dei materiali, dal cemento al vetro, granito e marmo di alluminio, acciaio e plastica . Sono estremamente resistenti e possono resistere al decadimento causato ad altri materiali dagli agenti atmosferici. I sigillanti siliconici possono impedire che l'acqua e l'aria passino attraverso giunti e fessure, in tal modo rendere gli edifici più efficienti.

Silicone ed energia, alcuni esempi dell'utilizzo del materiale siliconico nel produrre energia rinnovabile sono le turbine eoliche. Le eliche che ruotando producono energia sono fissate al rotore mediante adesivi in silicone in grado di resistere alle condizioni di utilizzo, anche severe. Il silicone migliora l'efficienza, la durata e le prestazioni dei pannelli solari e dei dispositivi che generano energia. Il silicone è utilizzato durante l'assemblaggio delle celle di silicio come adesivo e rivestimento perché può sopportare i raggi solari per un tempo lunghissimo senza subire variazione della sua funzionalità.

Silicone e salute, applicazioni mediche e prodotti per la cura infantile prodotti con il silicone sono in grado di soddisfare i più elevati standard di qualità richiesti dal personale sanitario e dai pazienti. Resistenti ai batteri, i siliconi sono facili da sterilizzare e sono eccellenti per applicazioni sensibili, come ad esempio tubi respiratori e farmaci topici. I siliconi non reagiscono con altri materiali e non irritano il corpo. Sono ipoallergenici e possono essere utilizzati in modo sicuro in contatto con la pelle e per via endovenosa. Naturalmente i prodotti di silicone utilizzati in applicazioni mediche sono soggetti a test rigorosi per garantire la loro sicurezza.

Silicone e cucina, una varietà di prodotti fanno uso delle caratteristiche intrinseche del silicone. La resistenza alle alte temperature, le proprietà igieniche e di sicurezza per la salute umana, anche dopo un uso prolungato, lo rendono un materiale affidabile e conveniente in cucina.

1.2 UTILIZZO DEI MATERIALI SILICONICI NEL CAMPO DELLE COSTRUZIONI

L'utilizzo di sigillanti e adesivi in silicone nel settore delle costruzioni ha avuto inizio verso la fine del 1960, e dei diversi prodotti di silicone introdotti ai tempi molti sono ancora applicati anche nei giorni d'oggi. I siliconi sono disponibili in una grande varietà di forma, dai materiali pastosi ad adesivi fluidi, per i quali esistono materiali sia mono-componenti sia multi-componenti.

L'importanza dell'uso dei sigillanti e adesivi siliconici è basata sulla loro ottima combinazione di proprietà che permette di soddisfare esigenze importanti dei progettisti. Queste proprietà includono una eccellente resistenza termica, ai raggi UV, all'ossidazione, deformabilità elevata anche a basse temperature, permeabilità ai gas, buone proprietà elettriche.

Anche in condizioni difficili di applicabilità i materiali siliconici sono in grado di aderire a diversi tipi di superficie grazie alla loro bassa energia superficiale, con l'applicazione di prodotti specifici è altresì possibile migliorare la loro adesione. Queste caratteristiche uniche sono il risultato di una ricerca scientifica che ha cercato di mettere insieme alcune proprietà chimiche e fisiche in un unico prodotto.

Le più importanti proprietà dei sigillanti siliconici sono la durabilità e la forza di adesione. I sigillanti siliconici sono ampiamente utilizzati nel settore delle costruzioni, su materiali porosi e non, principalmente per i giunti di tenuta contro agenti atmosferici, per la sigillatura dei sanitari, cucina e infissi e per giunti di dilatazione di vari parti strutturali soggette a variazioni di temperature. Alcuni sigillanti siliconici possono avere anche una funzione strutturale, come ad esempio nelle vetrate strutturali in cui il sigillante polimerizzato diventa parte del sistema portante con la sua funzionalità di aderire alle varie superfici. Un esempio delle vetrate strutturali con un importante contributo del silicone grazie alle sue proprietà di flessibilità, durabilità e adesione tra vetro, ceramica, metallo, pietra o pannelli alla struttura portante dell'edificio è l'Hotel Burj Al Arab di Dubai.

Di seguito è riportata una la (Figura 1.1) nella quale sono rappresentati i tipi di silicone utilizzati nel campo delle costruzioni edili e le sigle per poterli identificare e utilizzare in base alla necessità.

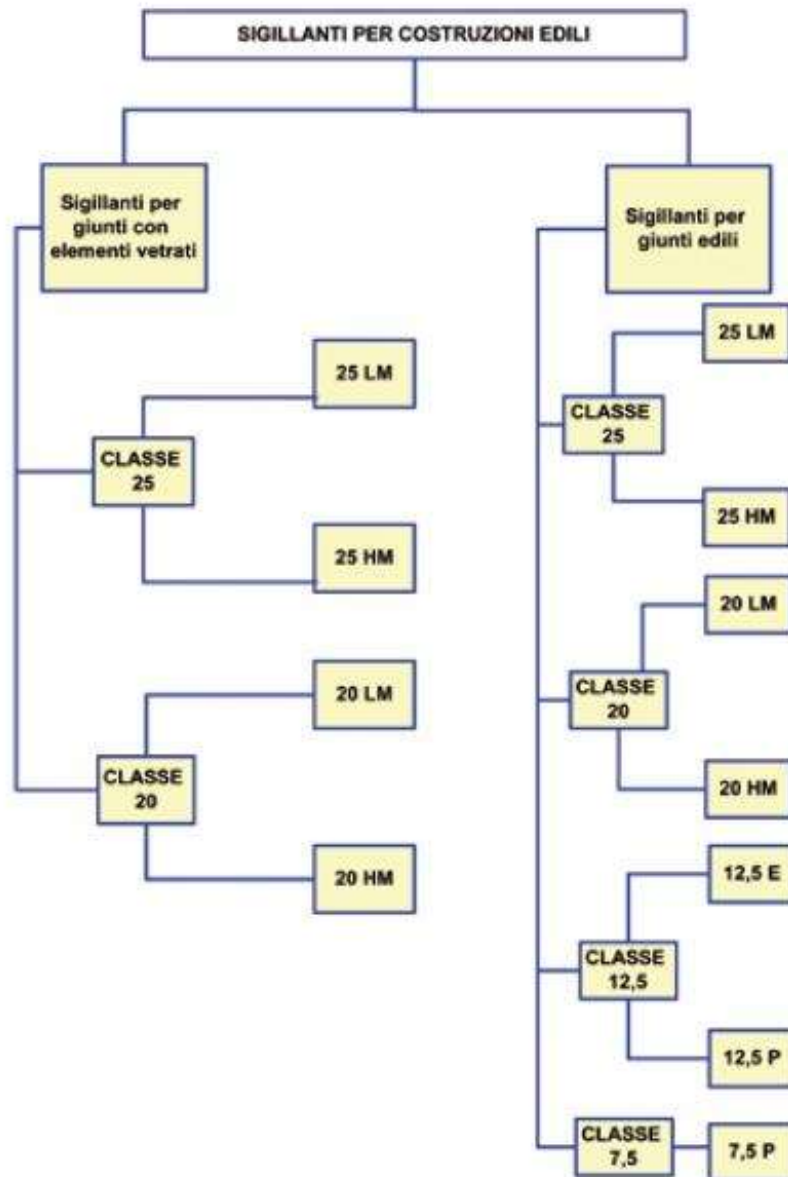


Figura 1.1 classificazione dei sigillanti siliconici (UNI EN ISO 11600)

In base alla normativa UNI EN ISO vengono identificati con (G) siliconi per giunti vetrati e (F) per giunti edili non vetrato, le classi fanno riferimento all'allungamento massimo d'esercizio in percentuale rispetto allo spessore del giunto e sono 4; classe 25, classe 20, classe 12,5, classe 7,5. I materiali siliconici si classificano in base al modulo elastico, (HM) alto modulo elastico e (LM) basso modulo elastico.

I Sigillanti LM, basso modulo, hanno un modulo elastico inferiore o uguale a 0,4 N/mm². I Sigillanti HM, alto modulo, hanno un modulo elastico superiore a 0,4 N/mm². Inoltre è possibile classificarli in base al loro comportamento (E) elastico e (P) plastico. Maggiore è il modulo, maggiore sarà la durezza e presumibilmente la resistenza ad abrasione o scalfittura. In generale, però, quando siamo in presenza di giunti elastici, dove è prevista una variazione dimensionale dei materiali a causa delle possibili differenti condizioni atmosferiche al contorno, è preferibile scegliere sigillanti a basso modulo (LM), ossia più deformabili. Quando un sigillante LM si estende, la tensione sulla superficie di adesione è minore rispetto a quella esercitata da un materiale HM e ciò può essere molto importante, soprattutto quando le superfici sono deboli o friabili e per il mantenimento dell'adesione nel tempo. Inoltre non va sottovalutata l'incidenza del modulo di elasticità anche sulle prestazioni acustiche. All'interno di un'altra norma (la UNI 11296) è infatti esplicitamente suggerito l'utilizzo di materiali a basso modulo di elasticità al fine di prevenire trasmissioni indesiderate di rumore all'interno dell'abitazione.

1.3 RICERCA NEL CAMPO DEI MATERIALI SILICONICI

Di seguito sono riportate alcune delle ricerche effettuate che riguardano lo studio delle proprietà del sigillante siliconico utilizzato nel settore delle costruzioni. Durante gli anni 1970 il silicone ha avuto un importante utilizzo nelle costruzioni principalmente per la formazione delle facciate vetrate nei grattacieli costruiti negli Stati Uniti d'America. Da lì a poco è diventato il materiale sigillante più utilizzato nel settore delle costruzioni. Nel 1959 è stato fondato il comitato ASTM C-24 che si occupava dello studio dei metodi di sigillatura e sigillanti utilizzati nelle costruzioni. La prima pubblicazione risale al 1988 'Science and Technology of Glazing System', Charles J. Parise. In questa pubblicazione viene posta l'attenzione all'adesione dei sigillanti siliconici strutturali utilizzati ai tempi nelle costruzioni per l'assemblaggio dei diversi materiali e la compatibilità alle diverse superfici degli stessi. Contiene inoltre indicazioni per minimizzare i rischi, le procedure e manutenzione dei sistemi di assemblaggio.

Nel 1990 viene pubblicato da ASTM STP 1069, 'Building Sealants: Material, Properties, and Performance', Thomas F.O'Connor, uno studio più approfondito riguardo al primo articolo riguardante anche il comportamento del sigillante sotto l'effetto di diversi agenti atmosferici ed eventi fisici.

In Lacasse, M.A., Bryce, J.E., Margeson, J.C. (1995), Evaluation of cyclic fatigue as a mean of assessing the performance of construction joints, Science and Technology of Building Seals, Sealants, Glazing, and Waterproofing, ASTM STP 1243, Vol. 4, 49-64, il sigillante, a base di poliuretano con alte prestazioni, sottoposto a test ciclici fino alla rottura dei campioni. Il comportamento a fatica del sigillante è stato confrontato con il comportamento a fatica dei elastomeri e gomme. Inoltre, la rottura di questi campioni di sigillante durante prove di fatica ha consentito per un confronto con i risultati ottenuti in precedenza da prove su entrambi i sigillanti silicone e polisolfuro. I metodi descritti in questo documento forniscono dati in base ai quali valutare le prestazioni a lungo termine di diversi tipi di sigillanti.

Wolf, A. T. Durability of silicone sealants, RILEM State-of-the-Art Publications: 92220 Bagnaux, 2000; 253-273. In questa pubblicazione si trattano gli effetti che hanno sui sigillanti siliconici gli eventi atmosferici. Inoltre si dà indicazione allo studio e alla corretta posa del silicone, la manutenzione dei giunti e metodi di riparazione.

Parbhoo, B.; O'Hare, L. -A.; Leadley, S. R. Fundamental aspects of adhesion technology in silicones (Chapter 14). In Adhesion Science and Engineering, Volume II, Surfaces, Chemistry & Applications, M. Chaudhury and A.V. Pocius, Eds., Elsevier: Amsterdam, 2002; 677-711. Il capitolo illustra l'uso di siliconi in base alle varie applicazioni di adesione richieste, e indica metodi per la corretta progettazione di prodotti dove prevista la presenza di adesivi e sigillanti specifici spiegando i meccanismi di adesione.

Meunier, L., Chagnon, G., Favier, D., Orgeas, L., Vacher, P. (2008), Mechanical experimental characterization and numerical modelling of an unfilled silicone rubber, Polymer testing, Vol. 29, 765-777. In questi esperimenti viene studiato il comportamento del silicone sotto un carico quasi-statico a differenti temperature.

Biondini F, Dal Lago B, Lamperti M, Toniolo G (2014) Qualificazione sperimentale di materiali siliconici per giunti di pannelli prefabbricati. Giornate AICAP 2014 (Associazione Italiana Cemento Armato e Precompresso), Bergamo, Italy, May 22-24, 391-398 (in Italian). La necessaria presenza della sigillatura in silicone dei giunti tra i pannelli offre però un certo grado di contrasto al loro moto pendolare. Per quantificare questo effetto è stata svolta una serie di prove, sia particolari sui cordoni di sigillatura, sia su sottoinsiemi strutturali costituiti da una coppia di pannelli in scala reale.

1.4 OBIETTIVO DELLA RICERCA EFFETTUATA NELLA PRESENTE TESI

Questa tesi è il risultato del lavoro sperimentale effettuato con l'obiettivo principale di determinare sperimentalmente le proprietà meccaniche del sigillante siliconico a basso modulo utilizzato principalmente nei giunti dei pannelli prefabbricati degli edifici industriali, sottoposto a prove monotone e cicliche.

Per poter effettuare le prove sperimentali ed ottenere i risultati è stato seguito questo iter procedurale;

- a) Si è costruito un modello ridotto rispetto alle reali dimensioni dei pannelli che però rispetti le caratteristiche della situazione nella realtà.
- b) Si è determinato l'apparato sperimentale per le prove monotone e cicliche.
- c) Sono stati definiti i diversi protocolli di prova sia monotoni sia ciclici.
- d) Eseguite le prove sono stati elaborati i dati provenienti attraverso gli strumenti della macchina di prova, procedendo alla loro interpretazione.

Con i risultati ottenuti a seguito delle interpretazioni e la valutazione delle proprietà meccaniche del sigillante siliconico, sono state proposte metodi semplificati per dare una valutazione al contributo in termini di forza del giunto di sigillante ai pannelli di tamponamento di una struttura prefabbricata quando soggetta ad evento sismico.

2 CONTESTO INGEGNERISTICO

2.1 COMPORTAMENTO SISMICO DELLE STRUTTURE A TELAIO PREFABBRICATE

Lo studio del comportamento sismico delle strutture prefabbricate in calcestruzzo armato ha una storia abbastanza recente. Infatti, soprattutto nel corso dell'ultimo ventennio, sono state effettuate numerose prove con lo scopo di chiarire quanto più possibile la reale capacità di tali strutture di resistere durante un terremoto. In seguito ai sopralluoghi effettuati nelle zone investite dal terremoto del Friuli del 1976, venne constatato che i classici edifici industriali prefabbricati monopiano presentavano segni di grandi spostamenti in corrispondenza delle connessioni e numerose lesioni minori. Tuttavia a fronte di circa sessanta edifici prefabbricati esaminati venne riportato un unico caso di crollo, ovvero quello di una trave caduta dal suo appoggio (Toniolo 2009). Questo risultato venne tradotto nella redazione della CNR 10025 e nel DM 3 dicembre 1987 che imposero il divieto di utilizzo di connessioni attritive nelle zone sismiche (*Figura 2.1*): la concomitanza delle scosse ondulatorie e sussultorie durante il terremoto contribuisce a diminuire in modo significativo l'azione dei carichi gravitazionali sulla quale si basa l'attrito, facendo sobbalzare l'elemento portato fuori dalla sua sede originaria.



Figura 2.1 Esempio di appoggio attritivo pilastro-trave

Pertanto i collegamenti tra trave e pilastro e tra elementi di solaio e trave devono essere provvisti di appositi connettori meccanici per la trasmissione di forze orizzontali (Figura 2.2).

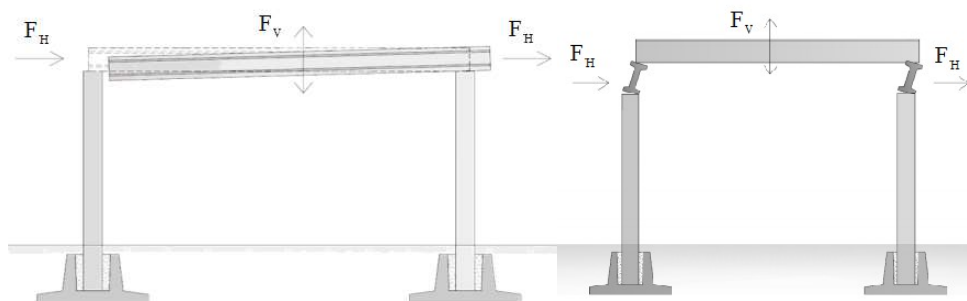


Figura 2.2 Comportamento sismico degli appoggi attritivi

Nel 1993, durante la fase di redazione della prima versione sperimentale “ENV” dell’Eurocodice 8, il Comitato CEN decise di equiparare il comportamento delle strutture prefabbricate monopiano per edifici industriali a quello di un pendolo rovescio (inverted pendulum), caratterizzato da una risposta sismica profondamente inadeguata. Vista la pesante penalizzazione, nel giugno del 1993 UNI (Ente nazionale italiano di unificazione) e ASSOBETON (Associazione Nazionale Industrie Manufatti Cementizi) organizzarono a Milano un convegno sul tema del comportamento sismico delle strutture prefabbricate, durante il quale venne presentata la documentazione tratta proprio dalle risultanze di sopralluoghi effettuati in Friuli che illustrava la tradizione tecnologica e progettuale di tali strutture. Il convegno ebbe una duplice conseguenza: da un lato nella pubblicazione della prima versione ENV dell’Eurocodice 8 le severe prescrizioni relative alle strutture prefabbricate erano state in parte mitigate e non equiparavano più le strutture prefabbricate al pendolo rovescio, dall’altro venne intrapresa un’importante attività di ricerca scientifico-sperimentale su cui basare un trattamento normativo meno pesante. Di seguito vengono riportate le principali campagne di ricerca effettuate (Toniolo, 2012a).

Prove Pilastrini Assobeton (1994-1996)

Nel corso di questa ricerca sono state effettuate prove sperimentali finanziate da ASSOBEON presso il Laboratorio ELSA (European Laboratory of Structural Assessment) di Ispra (VA) con la consulenza scientifica del Politecnico di Milano. In particolare sono state eseguite 20 prove cicliche e 6 prove pseudodinamiche su prototipi di pilastrini prefabbricati (*Figura 2.3*), ponendo l'attenzione sulla duttilità e sulla capacità di dissipare energia oltre che sull'influenza dei dettagli costruttivi d'armatura.

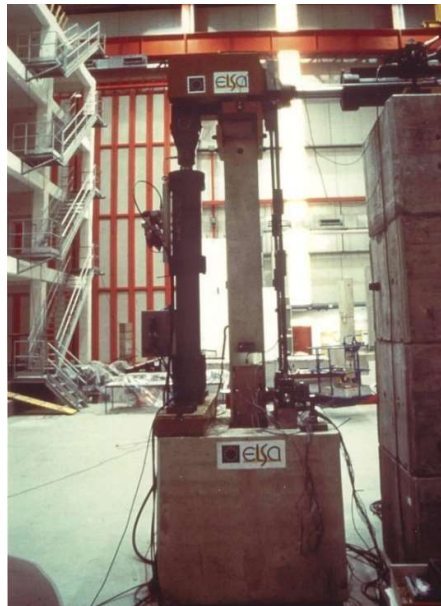


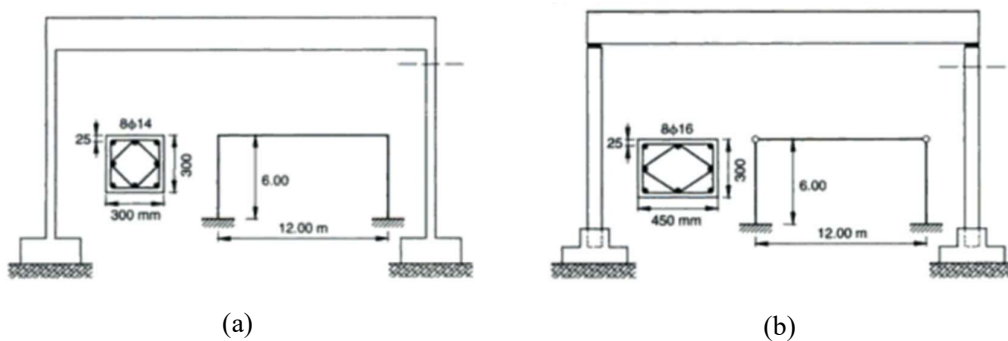
Figura 2.3 Prove cicliche monoassiali e pseudodinamiche su pilastrini

I risultati hanno mostrato un ottimo comportamento ciclico dei pilastrini prefabbricati con una capacità dissipativa espressa in rapporto a quella massima possibile di una sezione massiccia in acciaio, del tutto simile a quella dei corrispondenti pilastrini gettati in opera, ma con i vantaggi derivanti dall'assenza di riprese di ferri e dalla stabilità delle staffe durante il getto del calcestruzzo in cassaforma orizzontale. Per la spaziatura s delle staffe pari a 5 volte il diametro ϕ delle barre longitudinali, il coefficiente di duttilità, espresso come rapporto tra deformazione ultima e

deformazione al limite di snervamento, si è attestato sul valore di 6 in termini di curvature delle sezioni critiche di base e 3,5 in termini di spostamenti di sommità dei pilastri. Questi valori potrebbero portare a considerare un fattore di struttura q pari a 3,5. Le prove pseudodinamiche sono servite per tarare i modelli numerici capaci di simulare il comportamento vibratorio degradante dei pilastri sotto terremoto (Saisi *et al.*, 1998).

Analisi Numeriche su Strutture (1996-2000)

In questo secondo progetto l'obiettivo si è focalizzato sul confronto diretto tra il comportamento di strutture prefabbricate e quello di strutture gettate in opera attraverso analisi dinamiche non lineari su prototipi simili, elaborate con gli stessi accelerogrammi (Biondini & Toniolo, 2002, 2003, 2004, 2009) con accelerazioni via via crescenti fino al raggiungimento del collasso strutturale. Le connessioni trave-pilastro sono state schematizzate come giunti monolitici nel caso di struttura gettata in opera e come cerniere nel caso di strutture prefabbricate (Figura 2.4).



*Figura 2.4 Energia dissipata dal telaio monolitico in c.a. gettato in opera (a)
e dal telaio prefabbricato incernierato (b)*

In particolare, con riferimento alle strutture riportate in (Figura 2.5), si è inteso dimostrare che, dimensionando le sezioni dei pilastri per la stessa forza statica equivalente al sisma F , la quantità di energia dissipata dalle quattro zone critiche del prototipo gettato in opera è la stessa di quella dissipata nelle due zone critiche del

prototipo prefabbricato. Questo porterebbe all'assegnazione di un uguale coefficiente di struttura per entrambe le strutture. I risultati sono stati riportati in curve di distribuzione statistica e hanno confermato la sostanziale equivalenza del comportamento sismico delle due strutture, legittimando inoltre l'utilizzo di un coefficiente di struttura pari a 4,5.

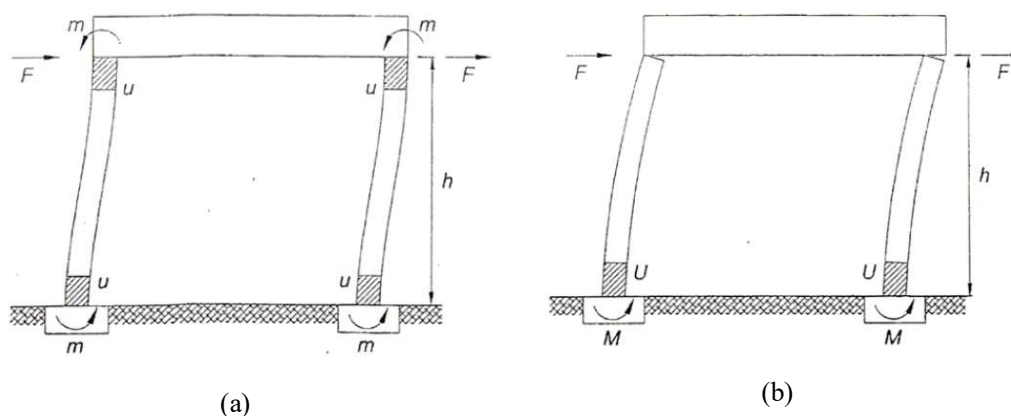


Figura 2.5 Schemi di telaio monolitico in c.a. gettato in opera (a) e di telaio prefabbricato incernierato (b)

Prove Ecoleader (2002-2003)

Questo programma di ricerca europeo è stato supportato da un consorzio fra le associazioni di Italia (AITEC, ATECAP, ASSOBECON), Spagna (ANDECE) e Portogallo (ANIPC). Sono state effettuate, presso il Laboratorio ELSA di Ispra (VA), prove pseudodinamiche su due prototipi in scala reale, uno gettato in opera e l'altro prefabbricato (Figura 2.6). I prototipi sono stati dimensionati in modo tale da avere lo stesso periodo di vibrazione e lo stesso taglio alla base a seconda dei livelli delle storie di carico imposti nelle prove. Utilizzando il muro di contrasto presente nel laboratorio è stato possibile applicare orizzontalmente le storie di carico derivanti da assegnati accelerogrammi (Colombo *et al.*, 2004, Biondini *et al.*, 2004). I risultati ottenuti hanno confermato ancora una volta l'equivalenza delle due strutture

presentando notevoli risorse di resistenza che in entrambi i casi hanno raggiunto valori di accelerazioni prossimi a 1,0 g.



(a)

(b)

Figura 2.6 Progetto Ecoleader: prototipo monolitico in c.a. gettato in opera (a) e prototipo prefabbricato (b)

Questa grande capacità è insita nella tipologia costruttiva che, con elevati periodi propri di vibrazione (generalmente attorno a 1 sec), abbatte sensibilmente la risposta al sisma. Le capacità di consentire grandi spostamenti duttili e di dissipare energia evidenziano che il limite progettuale di questa tipologia strutturale è legato allo Stato Limite di Danno (SLD), ovvero allo scorrimento di piano, più che allo Stato Limite di Prevenzione del Collasso (SLC), correlato alla resistenza dei pilastri. Tutte queste conclusioni hanno portato ad una sostanziale modifica nella versione definitiva EN dell'Eurocodice 8, approvato a Vienna nel 2002, in cui ai telai prefabbricati e gettati in opera veniva riconosciuto un coefficiente q di riduzione delle forze sismiche pari a 4,5. Lo stesso valore è stato ripreso in sede nazionale dal D.M. 14/01/2008 e dalla Circolare dell'anno successivo.

Progetto Growth: "Precast Structures EC8" (2003-2006)

Il programma, dal titolo "Comportamento sismico delle strutture prefabbricate in calcestruzzo rispetto all'EC8", ha coinvolto nove partners europei appartenenti a Portogallo, Italia, Slovenia e Grecia più la Tongji University di Shanghai, sotto il

coordinamento del Politecnico di Milano. Le prove eseguite sono riconducibili a due tipologie:

- pseudodinamiche, presso ELSA (Ispra, VA) e presso il Laboratorio sismico di Shanghai;
- su tavola vibrante, presso LNEC (Laboratorio National de Engenharia Civil di Lisbona) e presso NTUA (National Technical University of Athens).

I prototipi sperimentali adottati hanno dimensioni maggiori di quelli del progetto “Ecoleader” e sono più rappresentativi delle reali costruzioni tipicamente industriali.

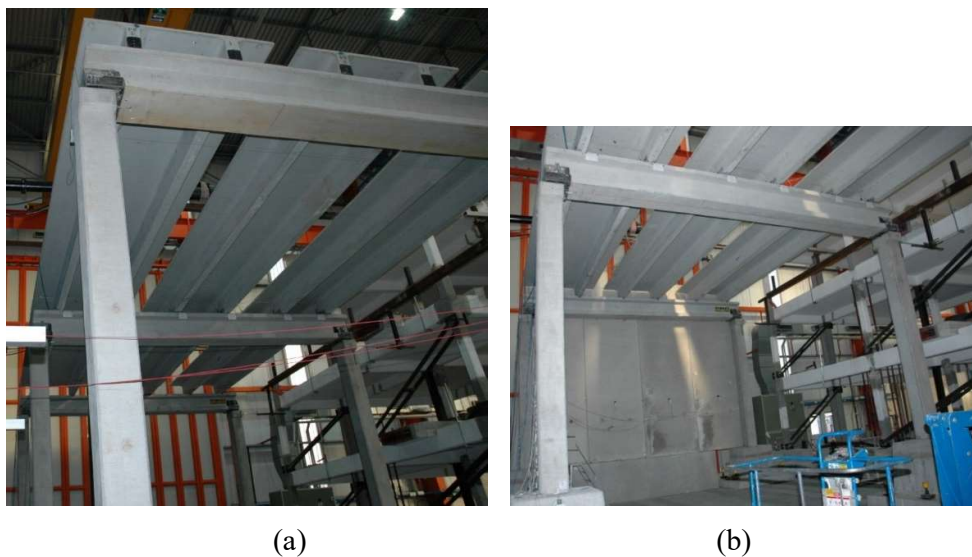


Figura 2.7 Progetto Growth: le prove sono state eseguite su telai in assenza (a) e in presenza (b) dei pannelli di tamponamento

Questa volta è stata posta l’attenzione sull’effetto diaframma della copertura (Ferrara *et al.*, 2004), sul contributo dei tamponamenti (Biondini *et al.*, 2013a, 2013b) e sul comportamento delle connessioni (Biondini *et al.*, 2014a, 2014b, 2014c). Le prove pseudodinamiche sono state eseguite su tre livelli di intensità sismica (0,14 g; 0,32 g; 0,525 g) e con diversi orientamenti dell’ordito strutturale (Ferrara *et al.*, 2006, Biondini & Toniolo, 2008). Queste prove hanno messo in evidenza i problemi relativi

alla corretta progettazione di adeguate connessioni, con rotture precoci dei bordi di calcestruzzo degli elementi e conseguentemente con la necessità di essere ripristinate e rinforzate per consentire il completamento dei livelli di carico. In secondo luogo è stata rilevata la grande influenza dei tamponamenti che modificano il comportamento globale della struttura rispetto al caso di solo telaio (*Figura 2.7*). Il prototipo prefabbricato ha mostrato in tutte le fasi un buon comportamento sismico grazie alla presenza di connessioni opportunamente sovradimensionate (Biondini, 2009).

Progetto ReLUIS: “Vulnerabilità Edifici Esistenti” (2005-2008)

Il Dipartimento della Protezione Civile ha sviluppato questo progetto con la finalità di valutare e ridurre la vulnerabilità sismica degli edifici esistenti di varia tipologia (acciaio, muratura, calcestruzzo armato, ponti ecc.). Nell’ambito degli edifici in calcestruzzo armato sono stati analizzati anche edifici prefabbricati in calcestruzzo armato nelle diverse regioni italiane e, grazie alla collaborazione tra il Politecnico di Milano e ASSOBETON con il coinvolgimento di aziende associate, è stato possibile raccogliere la documentazione di numerosi progetti in schedari sintetici (Bonfanti *et al.*, 2008, Mandelli *et al.*, 2008). A partire dalle diverse tipologie dedotte dai rilievi è stata intrapresa l’indagine, mediante apposite analisi di verifica, del relativo comportamento strutturale in base ai criteri aggiornati delle più recenti normative, evidenziando alcuni aspetti critici correlati all’epoca di costruzione ed alle corrispondenti regole di progettazione.

Progetto SAFecast: “Connessioni Sismiche” (2009-2012)

Parallelamente ASSOBETON ha avviato una campagna di prove sperimentali sul comportamento sismico delle connessioni, commissionando l’opera alle sedi universitarie di Napoli, Molise, Firenze, Pisa, Bologna, Milano e Bergamo. Lo studio ha riguardato i sei ordini di connessioni:

- solaio-solaio;
- solaio-trave;
- trave-pilastro;

- pilastro-fondazione;
- pannelli-struttura;
- pannelli-pannelli.

Attraverso prove monotone e cicliche sono stati definiti i parametri correlati alle proprietà di resistenza, duttilità, deformazione, dissipazione, rigidità, danno e degrado, secondo un protocollo normalizzato, necessari per una corretta progettazione sismica. Dal 2009 questa ricerca sulle connessioni è stata convogliata su di un grande progetto denominato SAFECAST, che ha coinvolto 17 partners provenienti da Portogallo, Spagna, Italia, Slovenia, Grecia e Turchia e che si prefiggeva i seguenti obiettivi:

- caratterizzazione sperimentale del comportamento ciclico delle tipologie esistenti di connessioni tra elementi prefabbricati in calcestruzzo;
- proposta e validazione di migliorie sulle tipologie di connessioni studiate;
- studio sperimentale del comportamento sismico delle strutture prefabbricate pluripiano caratterizzate da diversi schemi strutturali, ovvero con presenza di muri di taglio, orizzontamenti incernierati ai pilastri, orizzontamenti incastrati ai pilastri;
- calibrazione di modelli numerici;
- derivazione di regole di progetto per connessioni;
- derivazione di regole basate sulla gerarchia delle resistenze per edifici pluripiano.

Partendo dalla caratterizzazione dello stato dell'arte sulle tipologie di connessioni comunemente impiegate e dalla raccolta di progetti di edifici prefabbricati esistenti, i vari partners hanno sottoposto le tipologie di connessioni più utilizzate a prove sperimentali atte alla caratterizzazione del comportamento meccanico per carichi monotoni e ciclici. Per tale motivo le prove sono state eseguite ad un diverso livello di dettaglio: su elementi di collegamento, su nodi e su sottostrutture (Figura 2.8). I risultati sono stati riportati in schede riassuntive comprendenti sia le caratteristiche principali della singola connessione in termini di materiali e di geometria sia il suo comportamento monotono e ciclico.

Successivamente è stata eseguita una campagna di prove su tavola vibrante mirata alla valutazione degli effetti dovuti a carichi dinamici, nonché all'influenza del sisma verticale, ponendo particolare attenzione al comportamento sismico di strutture prefabbricate multipiano (Bournas et al., 2013a, 2013b). Il prototipo è caratterizzato da dimensioni in pianta 16x16 metri ed è costituito da due campate in entrambe le direzioni e da tre piani, per un'altezza totale superiore ai 10 metri (*Figura 2.9*). I collegamenti tra i vari elementi strutturali sono stati concepiti in maniera tale da poter realizzare, con interventi limitati, diversi gradi di vincolo: ciò ha permesso di studiare il comportamento della struttura in quattro diverse configurazioni strutturali. Le prove sono state eseguite presso il laboratorio ELSA (Ispra, VA) e le azioni sismiche sono state applicate ad intensità crescente (PGA da 0,15g a 0,45g) attraverso degli attuatori che collegano la struttura stessa con il muro di reazione.

Le prove effettuate hanno evidenziato un ottimo comportamento sismico di tutte le configurazioni strutturali studiate fornendo inoltre informazioni utili per la derivazione di regole di progetto basate sulla gerarchia delle resistenze.

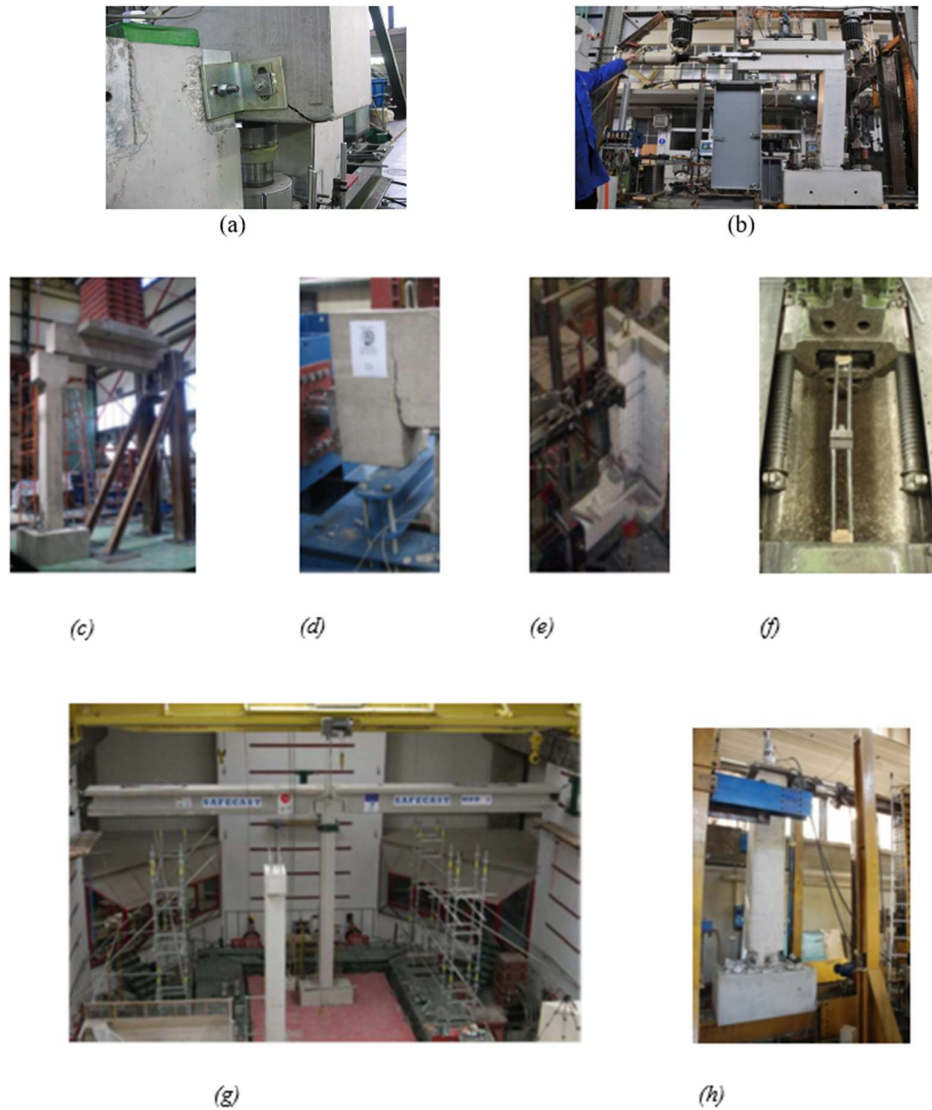


Figura 2.8 Progetto Safecast: Prove sperimentali su connessioni tegolo-trave al Politecnico di Milano (a), su connessioni trave-pilastro all'Università di Lubiana (b), all'Università di Atene (c, d), all'Università di Istanbul (e), al Politecnico di Milano (f), su sottosistemi di telaio al LNEC (g) e su connessioni pilastro-fondazioni al Politecnico di Milano (h)



(a)



(b)

Figura 2.9 Progetto Safecast: Prove sperimentali sul prototipo in scala reale di tre piani a ELSA/JRC in fase di realizzazione (a) e concluso (b)

2.2 INFLUENZA DEI PANNELLI DI TAMPONAMENTO

Gli edifici prefabbricati in cemento armato si sono largamente diffusi in tutto il mondo a partire dal decennio del 1960, principalmente per edifici industriali e commerciali con strutture a telaio e anche per gli edifici residenziali principalmente con strutture a grandi pannelli, diffuse soprattutto in Europa orientale, Federazione Russa e Comunità degli Stati Indipendenti (CSI). La grande diffusione di tali strutture evidenzia l'importanza cruciale che hanno sulla sicurezza delle persone che lavorano o vivono in quegli edifici e sull'economia di una nazione o un continente.

L'ultima versione Europea della normativa per la progettazione strutturale, Eurocodice 8 (CEN-EN 1998:2004), riconosce che le strutture a telaio prefabbricato possono essere progettate con la capacità di dissipazione di energia paragonabile a quella delle corrispondenti strutture gettate in opera. In base a questo punto di vista, l'attuale sistema di progettazione di edifici prefabbricati si basa su un modello di telaio nudo dove i pannelli di rivestimento perimetrali influiscono solo come masse senza alcuna rigidità.

Per quanto riguarda l'esecuzione delle connessioni strutturali dei pannelli di rivestimento, P.J. Harrison inizia la sua descrizione riguardo ai sistemi di fissaggio dei pannelli di rivestimento con la seguente affermazione (Taylor 1992): " Gli elementi di fissaggio utilizzati generalmente nel rivestimento di qualsiasi edificio sono i più incompresi e impropriamente utilizzati ". In realtà, pannelli di rivestimento di calcestruzzo prefabbricati sono sempre stati considerati come elementi non strutturali. I pannelli sono collegati alla struttura con collegamenti dimensionati con un calcolo locale sulla base della loro portata per forze ortogonali al piano dei pannelli. Questo approccio non funziona, come è stato verificato recentemente drammaticamente da diverse recenti scosse violenti nell'Europa meridionale, tra cui L'Aquila nel 2009, Grenada nel 2010 ed Emilia nel 2012. I pannelli, fissati in questo modo alla struttura, vengono a essere parte integrante del sistema resistente condizionando la sua risposta sismica. L'elevata rigidità di questo sistema conduce a forze molto più elevate rispetto a quelle calcolate con il modello a telaio. Queste

forze sono legate alla massa globale dei piani e sono principalmente dirette nel piano delle pareti, normalmente ignorata dai progettisti. Inoltre, la riduzione di forza sismica nelle strutture prefabbricate si affida alla creazione di cerniere plastiche nelle colonne per la dissipazione dell'energia. Spostamenti molto grandi delle colonne sono necessari per la dissipazione di energia prevista da progetto. Tuttavia, in genere la capacità di spostamento dei collegamenti, anche se progettati specificamente per permettere gli spostamenti reciproci, si esaurisce ben prima che tali spostamenti elevati dei telai si possono sviluppare. Pertanto la progettazione di queste connessioni non può fare affidamento sul fattore di riduzione sismica utilizzato per la progettazione del telaio nudo. L'effettiva intensità e la direzione delle forze e la dissipazione di energia limitata può condurre al cedimento del fissaggio, lasciando praticamente intatto il telaio, con colonne e travi. (Figura 2.10 a) presenta un'immagine emblematica dopo il terremoto dell'Aquila nel 2009: un edificio di recente costruzione, in cui la struttura (colonne, travi, elementi del tetto) ha mantenuto sostanzialmente la sua integrità, mentre un'intera parete di pannelli verticali, al contrario, è crollata. La causa del crollo è illustrata nella (Figura 2.10b): i fissaggi dei pannelli hanno ceduto sotto l'azione di forze per le quali non sono stati progettati.



(a)



(b)

Figura 2.10 Cedimento del rivestimento durante il terremoto dell'Aquila (a) vista dei pannelli crollati, (b) vista delle connessioni che hanno ceduto

Numerosi sono stati i crolli dei pannelli di parete causati dal cedimento dei collegamenti. Le forze ricevute sotto l'azione del sisma sono state molto più elevate rispetto a quelle considerate durante i calcoli in fase di progettazione per quanto riguarda il comportamento locale. Infatti il sistema di parete fornisce alla costruzione una rigidità molto superiore a quella del telaio nudo fatto di colonne e travi modellato nell'analisi strutturale. La risposta sismica effettiva è stato quindi caratterizzata da un'elevata accelerazione che ha portato forze di distorsione sulle chiusure nel piano delle pareti. Questi crolli hanno interessato una parte rilevante degli edifici esistenti in prossimità dell'epicentro. Tali crolli si sono verificati in diversi edifici, e coinvolgono i pannelli sia in verticali che in orizzontali, come illustrato rispettivamente nella (*Figura 2.11 a e b*).



(a)



(b)

Figura 2.11 Crollo dei singoli pannelli, (a) pannelli orizzontali, (b) pannelli verticali

In (*Figura 2.12*) si mostra ancora l'interno di una fabbrica: la struttura di colonne, travi ed elementi del tetto non aveva subito nessun danno invece un'intera linea di pannelli di rivestimento orizzontale è caduto giù. La causa del crollo è illustrata nella *Figura 2.12 b*: il cedimento dei dispositivi di collegamento. In (*Figura 2.13*) si mostra il rinforzo prontamente applicato ai pannelli restanti ancorati alla struttura dopo il terremoto con elementi angolari in acciaio imbullonati.



Figura 2.12 Crollo del rivestimento durante il terremoto dell'Aquila; (a) vista della linea di pannelli orizzontali crollati, (b) particolare dei fissaggi che hanno ceduto

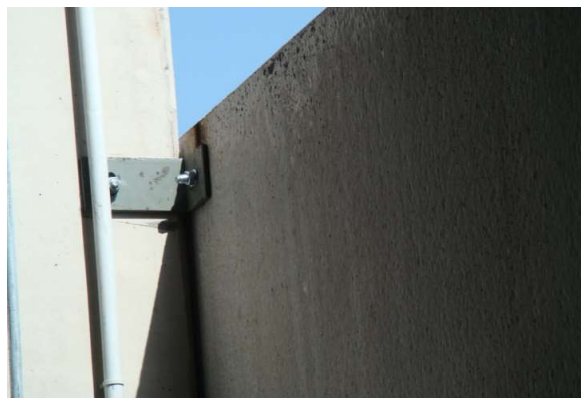


Figura 2.13 Intervento di emergenza post terremoto su pannelli di rivestimento orizzontale con diversi elementi di fissaggio angolari in acciaio per il collegamento con la struttura portante

Il cedimento si è verificato non solo nel meccanismo di fissaggio tipo guida e perno, ma anche altri tipi di fissaggi, come mostrato in figura 2.14 a e figura 2.14 b. Non è stata una questione di inadeguatezza del prodotto, ma di progettazione inadeguata della connessione. Infatti il progetto ha seguito le regole specifiche del codice, quantificare le forze con un'analisi locale sulla base della massa del singolo pannello

considerato come un elemento non-strutturale. In realtà i pannelli hanno ricevuto forze molto superiore dirette in modo diverso rispetto a quello considerato nel progetto. Questo è accaduto perché i pannelli erano fissati alla struttura con meccanismi molto rigidi e ciò li ha resi parte integrante del sistema strutturale resistente, portando lo stesso ad una rigidità molto superiore. L'approccio di progettazione, come proposto dai codici, deve essere migliorato nei suoi principi e nuove soluzioni specifiche adeguate devono essere proposte dai produttori.



(a)



(b)

Figura 2.14 Cedimento delle connessioni dei pannelli, (a) strappo delle piastre di fissaggio, (b) stappo del supporto a mensola

Infine, nella (Figura 2.15 a e b) vengono mostrati ancora una volta gli effetti del terremoto dell'Aquila. La prima mostra un edificio in costruzione dove i pannelli di rivestimento trascinano fuori dalla loro posizione due elementi del piano travi a doppia TT su cui erano collegati, la seconda mostra un edificio appena completato dove non si è verificato nessun danno rilevante, ma il grande pannello alla base, da 12 da 2,5 metri per 10 tonnellate di peso con pannelli superiori posizionato su di esso, si è spostato di 10 centimetri dalla sua posizione originale.



(a)



(b)

Figura 2.15 Comportamento di pannelli di rivestimento: (a) crollo della trave doppia TT causato dal crollo di pannelli verticali, (b) edificio intatto con grandi spostamenti relativi permanenti tra pannelli

Una nuova classificazione basata sul sottosistema strutturale del pannello, propone di definire i sistemi di connessione possibili che possono essere impiegati in una nuova costruzione dal punto di vista della partecipazione strutturale dei pannelli. La proposta è anche riportata in Biondini et al (2010a, 2013b), Colombo & Toniolo (2010, 2012c) e Toniolo (2014). Sono considerate le seguenti quattro opzioni:

(a) Sistema isostatico. Il sistema di connessioni isostatico implica un movimento rigido del pannello. Tutte le azioni agenti sulle connessioni dipendono esclusivamente dalla disposizione statica scelta, mentre la dinamica degli spostamenti della costruzione svolge un ruolo secondario sulle azioni in piano. Non si dovrebbero verificare danni all'interno del pannello e le connessioni devono rimanere nel campo elastico, anche se sono ammessi piccoli danni dei collegamenti duttili. Nella progettazione dell'edificio i pannelli possono essere ignorati, ma il loro contributo in termini di peso sismico di piano ed eventualmente la loro rigidità devono essere considerate, secondo il meccanismo isostatico. Le connessioni dei pannelli possono essere progettate solamente secondo lo schema statico del sottoinsieme.

(b) Sistema integrato. Il sistema di connessioni integrato fornisce una completa partecipazione dei pannelli alla resistenza rispetto al carico laterale dell'edificio. E' auspicabile che sia i pannelli e le connessioni rimangano nel campo elastico, ma lievi danni sono ammessi nei collegamenti duttili e/o nei pannelli. Nella progettazione dell'edificio bisogna tener conto in modo esplicito dei pannelli, e le connessioni devono essere adeguatamente sulla base delle azioni sismiche combinate.

(c) Sistema dissipativo. Il sistema di connessione dissipative è un'evoluzione del sistema isostatico, dove le connessioni dissipative vengono aggiunte tra struttura e rivestimento o all'interno dei pannelli di rivestimento. Tutta la dissipazione di energia è probabile che si verifichi all'interno di specifici dispositivi dissipativi, con il pannello e le connessioni che creano il sistema isostatico ancora in fase elastica. I pannelli di rivestimento partecipano al sistema di resistenza ai carichi laterali con delle forze che sono controllate dalle connessioni dissipative. Nel progetto dell'edificio i pannelli di rivestimento possono essere considerati in modo esplicito o con metodi semplificati, e loro connessioni possono essere progettati secondo il loro schema statico del sottoinsieme.

(d) Sistemi di seconda linea. I sistemi di seconda linea consistono in dispositivi di sicurezza supplementari che collegano la struttura e il pannello al fine di trattenere quest'ultimo nel caso in cui il sistema portante principale ceda ed si verifichi il rischio di caduta. Questa soluzione può essere aggiunta ad uno dei sistemi precedenti ma non può sostituire alcuno di essi. Può essere utilizzata per la messa in sicurezza di pannelli esistenti nei collegamenti degli quali possono esserci eventuali carenze. Poiché i dispositivi entrano in uso solo dopo che il pannello tende a cadere, possono essere esclusi dal progetto della costruzione. Possono essere progettati secondo lo schema statico del sottoinsieme. Alcuni esempi tecnologici di tali collegamenti sono inclusi nella Protezione Civile (2012).

Schizzi concettuali del principio di funzionamento di un telaio prefabbricato con collegamento del pannello di rivestimento isostatica o integrato sistemi sono illustrati nella (*Figure 2.16*) per pannelli verticali e nella (*Figure 2.17*) per pannelli orizzontali. Una tipica struttura prefabbricato è altamente flessibile, a causa del suo schema

statico, non-rinforzato a sbalzo-tipo colonna. Una soluzione isostatica, per esempio fornita con connessioni fisse cerniera posizionate al fine di creare un elemento puntone-tirante, completamente permette di spostare senza indurre rigidità la struttura. Al contrario, una soluzione integrata, per esempio fornita con quattro collegamenti fissi collocati negli angoli del pannello al fine di creare un elemento di trave a doppio bloccaggio, introduce una grande rigidezza supplementare in piano associata allo spostamento del telaio, a cui corrispondono grandi forze risultanti nei collegamenti e nei pannelli.

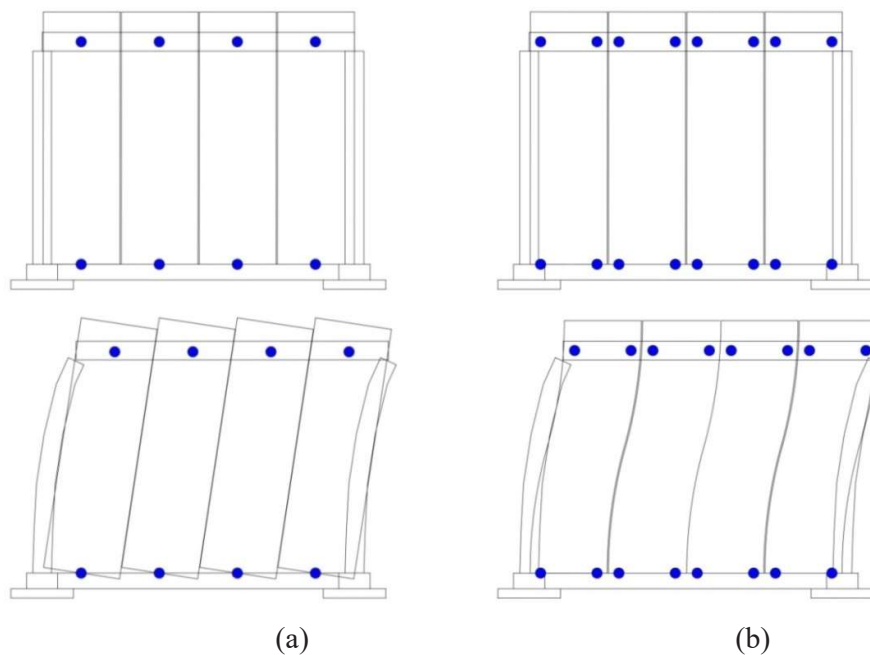


Figure 2.16 Pannelli di rivestimento verticali: (a) sistema di collegamento isostatico e (b) sistema di connessioni integrate

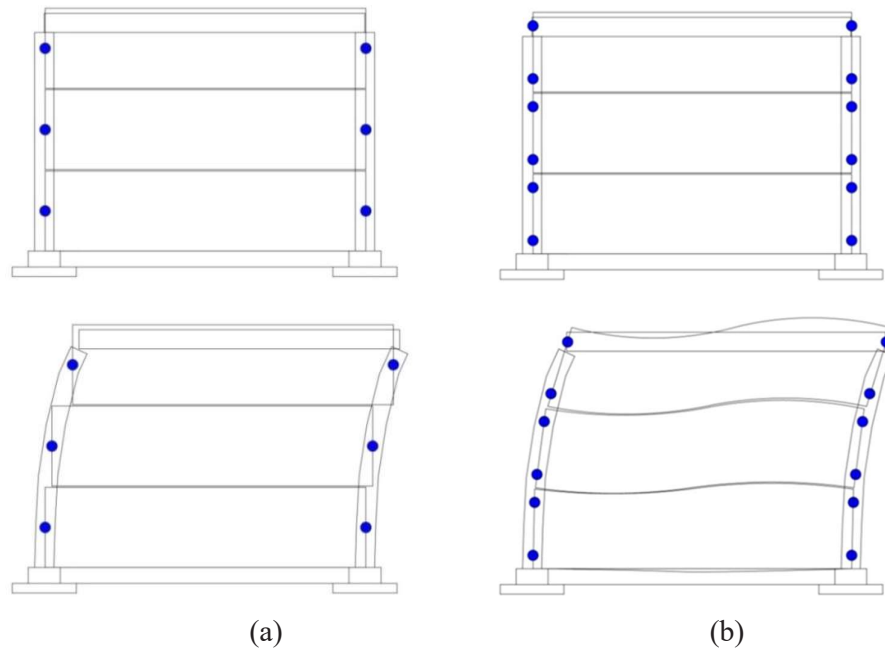


Figure 2.17 Pannelli di rivestimento orizzontale: (a) sistema di collegamento isostatico e (b) sistema di connessioni integrate

3 DESCRIZIONE ATTIVITA' SPERIMENTALE

Nel presente capitolo vengono illustrate le modalità di preparazione dei campioni sottoposti a prove, le attrezzature sperimentali utilizzate e la modalità di denominazione delle singole prove.

3.1 DESCRIZIONE MODALITA' PREPARAZIONE DEI PROVINI

I campioni utilizzati per eseguire le prove sperimentali sono composti da parallelepipedi in calcestruzzo di dimensioni 10 cm x 10 cm x 5 cm (spessore) e 20 cm x 10 cm x 5 cm (spessore), assemblati mediante la resina siliconica che è stata studiata.



Figura 3.1. Esempio di campione assemblato.

Tutti gli elementi in calcestruzzo dopo essere stati tagliati, sono stati rettificati mediante un flessibile e relativo disco, in modo tale da avere una superficie il più possibile piana ed omogenea. Dopo la rettifica i campioni sono stati puliti con acqua ed asciugati in forno elettrico per un tempo adeguato. Le superfici sono state trattate

con l'acetone in modo da rimuovere ogni residuo di impurità sia polveroso sia grasso, al fine di permettere un'adesione migliore con il silicone. Gli elementi di calcestruzzo vengono fissati su delle piastre in acciaio in posizioni predefinite mediante colla Araldite, per creare fra di loro un spazio che corrisponde allo spessore di silicone che si andrà a posare. Le piastre in acciaio a loro volta vengono fissate all'attuatore della macchina di prova. Il blocco centrale del provino viene collegato similmente alla cella di carico della macchina di prova Instron. Il silicone viene applicato lungo quattro spigoli come mostrato in (*Figura 3.1*). Inizialmente per creare lo spessore corretto del silicone sono stati utilizzati pezzi di legno rivestiti con sottilissimi fogli di alluminio laminato, i quali però non permettevano una evaporazione adeguata (*Figura 3.2*). Durante le prove iniziali si è visto che il silicone un volta raggiunta la deformazione massima a rottura, internamente era ancora non del tutto asciutto. Il problema è stato risolto con l'utilizzo della carta normale al posto del alluminio poiché la carta permette una maggiore evaporazione.



Figura 3.2. Particolare silicone non maturato.

Il silicone scelto per le prove è il SITOL SILICON BASSO MODULO, un sigillante siliconico a reticolazione neutra e bassissimo modulo elastico con eccezionale resistenza all'invecchiamento utilizzato principalmente per la sigillatura di giunti in

facciata classificato F25 LM secondo UNI EN 11600, inoltre classificato B1 secondo la norma DIN 4102 sulla reazione al fuoco dei materiali da costruzione e degli elementi da costruzione. Nella prima parte di questa norma molto vasta si classifica la resistenza al fuoco dei materiali da costruzione e degli elementi da costruzione nelle categorie seguenti:

Materiali da costruzione:

Categoria A: non infiammabili

Categoria B: infiammabili

Categoria B1 : difficilmente infiammabili

Categoria B2: normalmente infiammabili

Categoria B3: facilmente infiammabili

Per la posa del silicone è stata utilizzata la classica pistola, facendo attenzione al riempimento uniforme delle aperture e a non creare dei vuoti negli spazi. I bordi esterni degli elementi in calcestruzzo sono stati isolati con nastro di carta per pittura, rimosso una volta che il silicone è stato posato e sagomato come da indicazione del produttore tramite una spatola.

3.2 DESCRIZIONE APPARATI DI PROVA

Sono state eseguite prove locali su piccoli campioni e una prova su un sottosistema strutturale in scala reale. Le prove sono state effettuate presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Politecnico di Milano, con l'utilizzo di una pressa elettromeccanica per quanto riguarda le prove locali ed un sistema a telaio per la prova sul sottosistema. Per la prove locali i campioni vengono posizionati sulla base dalla macchina e poi fissati con dei morsetti sulla parte bassa, tramite un meccanismo imbullonato sulla loro testa.



Figura 3.3. Strumentazione di prova, fissaggio provino nella macchina Instron.

La prova in scala al vero è stata eseguita su sottosistema strutturale composto da due pannelli prefabbricati pieni collegati al telaio di prova con assetto isostatico di vincolo con bielle incernierate alle estremità. La struttura di supporto è un quadrilatero articolato realizzato in acciaio, progettato per trasmettere gli spostamenti imposti ai pannelli senza introdurre reazioni aggiuntive. I pilastri sono anch'essi vincolati come bielle alla base ed in sommità.

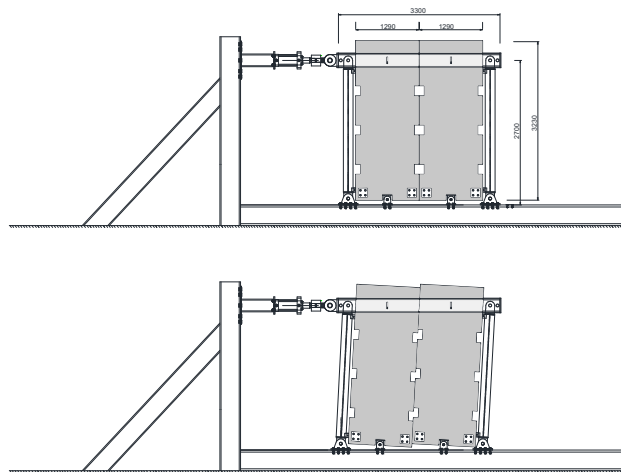


Figura 3.4 Disegni tecnici dell'impianto di prova su sottosistema strutturale in configurazione iniziale e deformata.



Figura 3.5 Impianto di prova su sottosistema strutturale assemblato.

3.3 CAMPAGNA SPERIMENTALE

Il comportamento sismico di edifici prefabbricati in calcestruzzo con pannelli di rivestimento è stato ampiamente studiato nell'ambito del progetto SAFECLADDING.

La campagna sperimentale è stata condotta presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Politecnico di Milano al fine di fornire informazioni circa l'influenza del sigillante siliconico a livello strutturale ed aiutare i progettisti a tener conto durante la fase di progettazione di suddette strutture. Sono state eseguite 25 prove locali su campioni precedentemente descritti, diverse tra di loro per tipo di prova, geometria della sigillatura e velocità, ed una prova su un sottosistema in scala reale. Le velocità descritte sono lontane dalle velocità raggiunte durante un evento sismico, dell'ordine di grandezza dei 100 mm/s, ma permettono comunque di effettuare dei confronti preliminari al variare di questo parametro simulando le successive fasi del programma sperimentale. I campioni assemblati sono di tre tipi diversi in base allo spessore (s) e lunghezza (L) del cordone di sigillante applicato. Di seguito sono riportati le rappresentazioni grafiche delle dimensioni per i vari tipi di campioni.

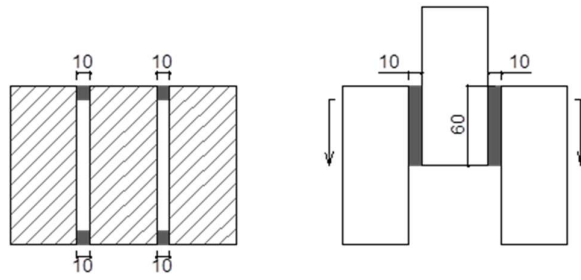


Figura 3.6. provino con $s = 10 \text{ mm}$ e $L = 60 \text{ mm}$

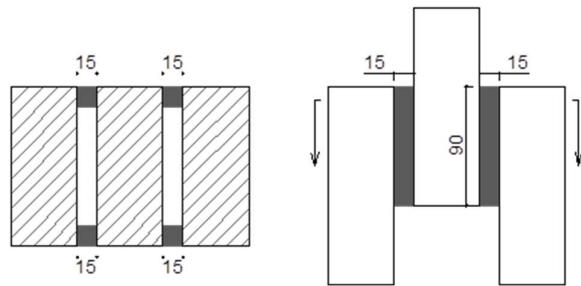


Figura 3.7. provino con $s = 15 \text{ mm}$ e $L = 90 \text{ mm}$

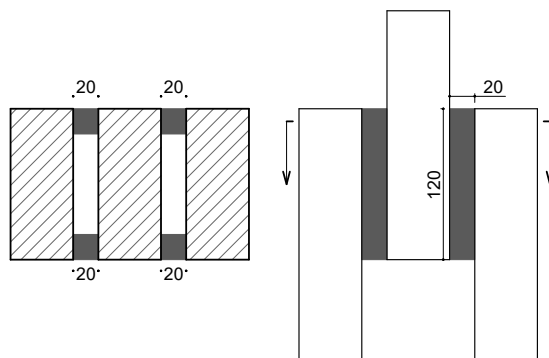


Figura 3.8. provino con $s = 20 \text{ mm}$ e $L = 120 \text{ mm}$.

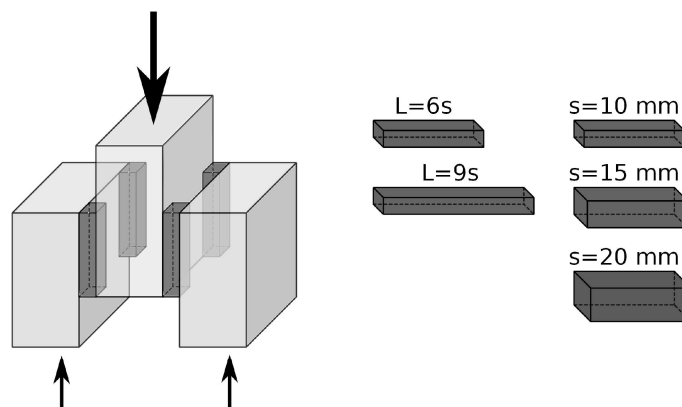


Figura 3.9 Schema di prova

Le velocità di prova sono 0,25 mm/s e 0,025 mm/s, rispettivamente chiamate fast (F) e slow (S).

Sono state effettuate prove monotone (M) e cicliche (C).

Nella tabella seguente si riporta la codifica effettuata per i campioni che sono stati utilizzati nelle prove sperimentali.

Esempio; **TO-C-10-60-S-1**

- * TO – indica il tipo di silicone Torggler Sitol Silicon
- * C- indica prova ciclica, le prove monotone sono codificate con la lettera M
- * 10 – indica lo spessore del silicone (10-15-20)
- * 60 – indica la lunghezza del giunto di silicone
- * S – indica la velocità S/slow F/fast
- * 1 – indica il numero del campione che è stato sottoposto alla stessa prova

Inoltre sono riportate informazioni riguardanti la velocità con la quale è stata fatta la prova, tempo di maturazione al momento della prova.

Le prove cicliche prevedono l'esecuzione di cicli di spostamento di ampiezza crescente ripetuti tre volte. Per poter eseguire le prove cicliche con la macchina Instron sono state calcolate le frequenze da immettere nel programma per poter

ottenere la velocità costante di 0,25 mm/s durante ogni ciclo. Nella tabella seguente è riportato un esempio di calcolo dal quale risulta un tempo totale per la prova di 144 minuti.

Frequenze per campioni da 20 mm a velocità 0.25 mm/s				
VELOCITÀ mm/s	ampiezza mm	tot ciclo mm	periodo s	frequenza Hz
0.25	4	16	64	0.015625
0.25	8	32	128	0.0078125
0.25	12	48	192	0.005208333
0.25	16	64	256	0.00390625
0.25	20	80	320	0.003125
0.25	24	96	384	0.002604167
0.25	28	112	448	0.002232143
0.25	32	128	512	0.001953125
0.25	36	144	576	0.001736111
0.25	40	160	640	0.0015625
0.25	44	176	704	0.001420455
0.25	48	192	768	0.001302083
0.25	52	208	832	0.001201923
0.25	56	224	896	0.001116071
0.25	60	240	960	0.001041667
0.25	64	256	1024	0.000976563

Tabella 1 Tabella rappresentativa per il calcolo delle frequenze.

E' stata effettuata una sola prova su sotto-insieme strutturale in scala al reale. Per poter verificare che l'impianto di prova non forniva contributi irrigidenti non previsti è stata effettuata anche una prova del sistema senza la presenza del giunto di silicone. In seguito è stato applicato il silicone nelle interfacce tra i pannelli ad esclusione delle parti recesse e della porzione superiore tra il recesso più alto e la cima del pannello per l'interferenza della trave di acciaio. La lunghezza complessiva delle singole bande di silicone è quindi pari a 1,70 m su due file, per un totale di 3,40 m di sviluppo lineare. Il lato medio della sezione di silicone è pari a circa 15 mm. È stata eseguita una prova oligociclica con spostamenti relativi verticali dei pannelli impressi crescenti di passo 2,5 – 5,0 – 10,0 – 20,0 – 40,0 mm con tre ripetizioni ciascuno.

tipo di prova	sezione	lunghezza	codice identificazione campione	maturazione (giorni)	tipo di azione	velocità test mm/sec	Strain rate %/sec	
prove cicliche	S = 10 mm	L = 60 mm	TO-C-10-60-F-1	105	ciclica	0.25	0.0250	
			TO-C-10-60-F-2	116	ciclica	0.25	0.0250	
	S = 10 mm	L = 90mm	TO-C-10-90-F-1	25	ciclica	0.25	0.0250	
			TO-C-10-90-F-2	10	ciclica	0.25	0.0250	
	S = 15 mm	L = 90mm	TO-C-15-90-F-1	5	ciclica	0.25	0.0167	
			TO-C-15-90-F-2	10	ciclica	0.25	0.0167	
	S = 20 mm	L = 120 mm	TO-C-20-120-F-1	116	ciclica	0.25	0.0125	
			TO-C-20-120-F-2	117	ciclica	0.25	0.0125	
	Monotone	S = 10 mm	L = 60 mm	TO-M-10-60-F-1	67	spinta	0.25	0.0250
				TO-M-10-60-F-2	67	tiro	0.25	0.0250
TO-M-10-60-S-1				5	tiro	0.025	0.0025	
TO-M-10-60-S-2				5	spinta	0.025	0.0025	
L = 90mm			TO-M-10-90-S-1	12	tiro	0.025	0.0025	
			TO-M-10-90-S-2	12	spinta	0.025	0.0025	
			TO-M-10-90-F-1	34	tiro	0.25	0.0250	
			TO-M-10-90-F-2	6	spinta	0.25	0.0250	
S = 15 mm		L = 90mm	TO-M-15-90-S-1	46	tiro	0.025	0.0017	
			TO-M-15-90-S-2	12	spinta	0.025	0.0017	
			TO-M-15-90-F-1	26	tiro	0.25	0.0170	
			TO-M-15-90-F-2	26	spinta	0.25	0.0170	
S = 20 mm		L = 120 mm	TO-M-20-120-S-1	46	spinta	0.025	0.0013	
			TO-M-20-120-S-2	46	tiro	0.025	0.0013	
			TO-M-20-120-S-3	46	tiro	0.025	0.0013	
			TO-M-20-120-F-1	26	spinta	0.25	0.0125	
			TO-M-20-120-F-2	26	tiro	0.25	0.0125	

Tabella 2. Elenco delle prove locali eseguite.

4 **RISULTATI E INTERPRETAZIONE**

4.1 PROVE LOCALI MONOTONE

Le prove locali monotone e cicliche sono state eseguite su provini di lunghezze e spessori diversi e tempi di maturazione diversi. Le considerazioni riguarderanno anche la diversa velocità di prova.

Di seguito sono riportati tutti i risultati delle prove con grafici dimostrativi e dati più significativi.

Lo sforzo di taglio τ (N/mm²) è stato calcolato come rapporto fra la della forza e la superficie di contatto tra silicone gli elementi di calcestruzzo.

$$\tau = F/(4sL)$$

F (N) forza ottenuta dalla macchina, s (mm) spessore del silicone ed L (mm) la lunghezza del giunto di silicone.

Per calcolare la deformazione relativa che è un parametro adimensionale (mm/mm).

$$\gamma = \delta/s$$

Dove δ è lo spostamento della macchina ed s lo spessore del silicone.

4.1.1 TO-M-10-60-F-1

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 67 giorni, con una velocità di 0,25 mm/s con una forza di spinta.

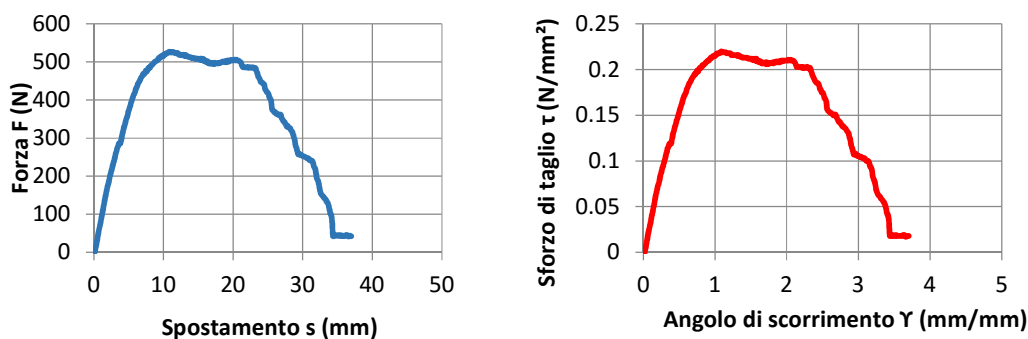


Figura 4.1. Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento
TO-M-10-60-F-1

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
2400	527	0,22	11,00	6,0

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,35	1,11	0,17	0,56

Tabella 3. Risultati significativi prova TO-M-10-60-F-1

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 527 N, ottenuto per un spostamento di 10 mm, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,35 N/mm².

All'aumentare della deformazione si è verificata la formazione di piccoli parallelepipedi con le dimensioni uguali allo spessore del giunto. Una volta raggiunto il carico massimo e con l'aumentare della deformazione è stato possibile vedere che inizialmente si presentavano dei strappi interni al silicone sugli estremi seguiti man mano da quello interno fino a completa rottura del giunto. La rottura completa è avvenuta per uno spostamento relativo pari a circa il 300 % dello spessore del giunto. Dopo il tratto elastico si nota un comportamento pseudo-plastico.

4.1.2 TO-M-10-60-F-2

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 67 giorni, con una velocità di 0,25 mm/s con una forza di tiro.

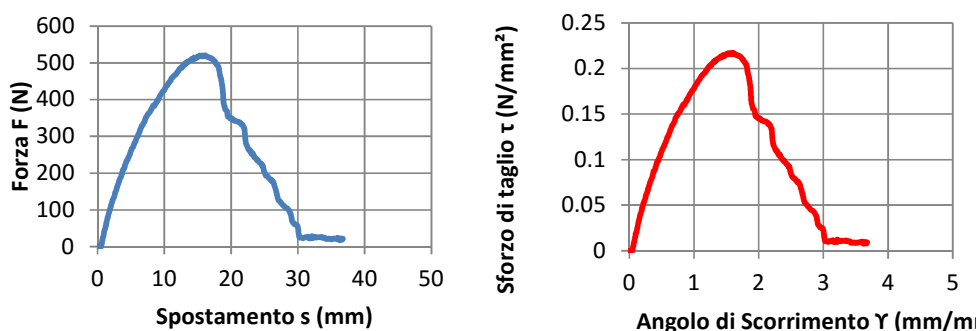


Figura 4.2. Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento TO-M-10-60-F-2

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
2400.00	521	0.22	15,6	9,5

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0.23	1.561	0.17	0.92

Tabella 4. Risultati significativi prova TO-M-10-60-F-2

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 521 N molto simile alla precedente prova, ottenuto per un spostamento di circa 15 mm, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,23 N/mm². All'aumentare della deformazione si è verificata la formazione di piccoli parallelepipedi con le dimensioni uguali allo spessore del giunto. Una volta raggiunto il carico massimo e con l'aumentare della deformazione è stato possibile vedere che inizialmente si presentavano strappi tra il silicone e il calcestruzzo dovuti alla non perfetta aderenza. La rottura completa è avvenuta per un spostamento relativo pari a circa 300 % dello spessore del giunto. Rispetto alla prova precedente con le stesse caratteristiche ma con la forza di spinta in questo caso si perde la duttilità.

4.1.3 TO-M-10-60-S-1

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 5 giorni, con una velocità di 0,025 mm/s con una forza di tiro.

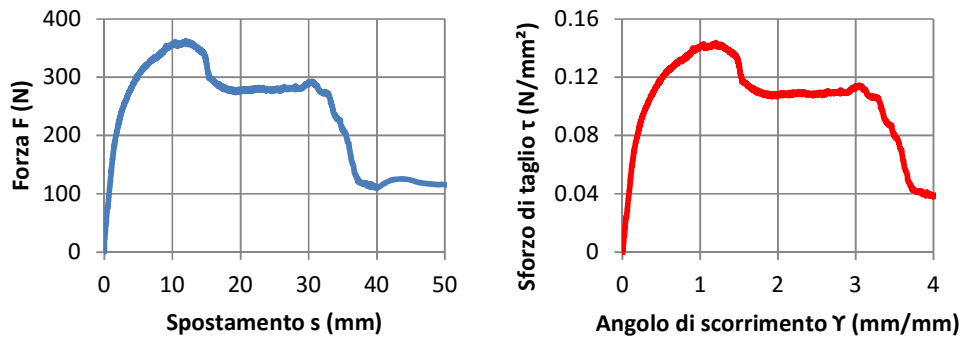


Figura 4.3. Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento TO-M-10-60-S-1.

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
2400.00	358	0,14	12,00	4,3
G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%	
0.47	1.04	0,17	0,4	

Tabella 5. Risultati significativi prova TO-M-10-60-S-1.

Il silicone di questa prova ha un tempo di maturazione di 5 gironi, questo comporta che il carico massimo raggiunto per questa prova è di 358 N ottenuto per un spostamento di circa 15 mm, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,47 N/mm². All'aumentare della deformazione al contrario di quanto visto prima non si sono formati i quadratini. Una volta raggiunto il carico massimo e con l'aumentare della deformazione è stato possibile vedere che inizialmente si presentavano dei strappi tra il silicone e il calcestruzzo dovuti alla non perfetta aderenza. La rottura completa è avvenuta per un spostamento relativo dei elementi di calcestruzzo di circa 300 % lo spessore del giunto. In questo caso come nel caso precedente con forza di tiro con velocità alta si verifica la mancanza del tratto pseudoplastico. Le zone di plasticità sono dovute all'attrito del giunto di silicone.

4.1.4 TO-M-10-60-S-2

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 5 giorni, con una velocità di 0,025 mm/s con una forza di spinta.

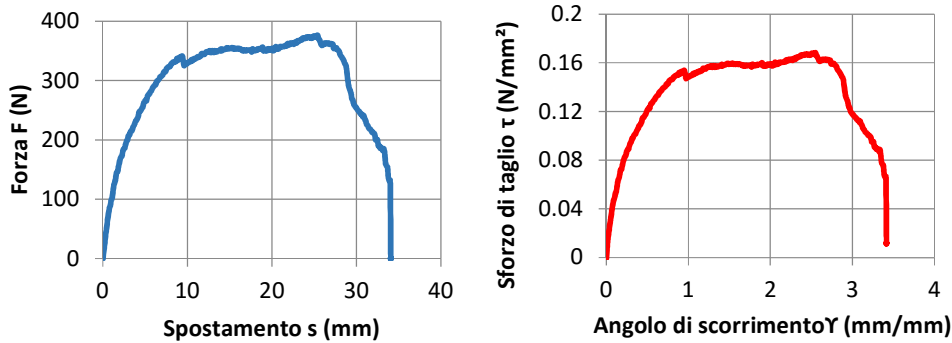


Figura 4.4. Grafici, forza/spostamento e sforzo/angolo di spostamento TO-M-10-60-S-2.

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
2400	404	0,17	15,80	9,25

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,38	1,53	0,13	0,71

Tabella 6. Risultati significativi prova TO-M-10-60-S-1.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 404 N, ottenuto per un spostamento di circa 25 mm. Interazioni interne al sigillante fanno sì che la rottura si verifichi dopo rispetto alle prove precedenti. All'aumentare della deformazione al contrario delle prove veloci non si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone (200% - 250% di spessore) e di distacco del sigillante dal calcestruzzo. Così come nella prova di spinta con la velocità alta si verifica un tratto di pseudo-plasticità.

4.1.5 TO-M- 10-90-S-1

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 12 giorni, con una velocità di 0,025 mm/s con una forza di tiro.

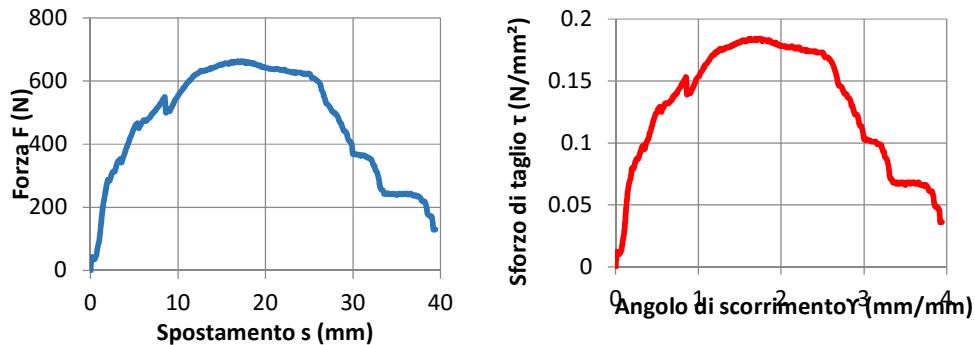


Figura 4.5. Grafici, forza/spostamento e sforzo/angolo di spostamento TO-M-10-90-S-1.

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
3600.00	663	0.18	17.24	8,0

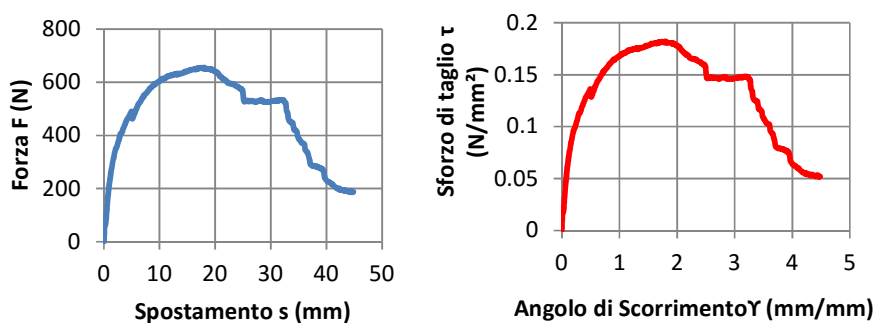
G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0.43	1.63	0.15	0,73

Tabella 7. Risultati significativi prova TO-M-10-90-S-1.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 663 N, ottenuto per un spostamento circa uguale al 150 % dello spessore del giunto (15 mm). All'aumentare della deformazione non si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone (200% spessore) così come si era visto nelle precedenti prove e di distacco di una piccola parte del sigillante dal calcestruzzo. Si nota anche un tratto pseudo-plastico come le prove lenti effettuate in precedenza.

4.1.6 TO-M- 10-90-S-2

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 12 giorni, con una velocità di 0,025 mm/s con una forza di spinta.



Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Figura 4.6. Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento TO-M-10-90-S-2.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
3600,00	656	0,18	17,24	6,4

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,33	1,83	0,15	0,58

Tabella 8. Risultati significativi prova TO-M-10-90-S-1.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 656 N, ottenuto per un spostamento circa uguale 150 % dello spessore del giunto (15 mm), molto simile alla prova precedente. All'aumentare della deformazione non si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone (200% spessore) così come si era visto nelle precedenti prove e di distacco di una piccola parte del sigillante dal calcestruzzo. Si nota anche un tratto pseudo-plastico come le prove lenti effettuate in precedenza.

4.1.7 TO-M- 10-90-F-1

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 34 giorni, con una velocità di 0,25 mm/s con una forza di tiro.

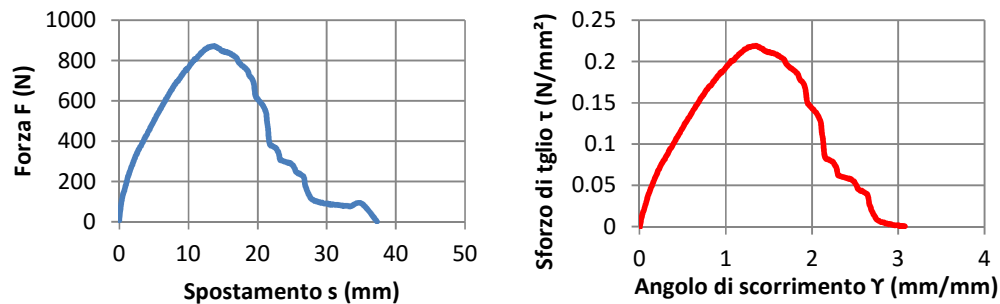


Figura 4.7. Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento
TO-M-10-90-F-1

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
3600,00	871	0,24	14,00	8,0

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,22	1,35	0,19	0,98

Tabella 9. Risultati significativi prova TO-M-10-90-F-1.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 871 N, ottenuto per un spostamento circa uguale al 150 % del spessore del giunto (15 mm). All'aumentare della deformazione si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone come nelle prove precedenti con la stessa velocità. All'aumento del carico si è verificata la rottura dei tiranti più esterni del giunto seguito man mano dalla rottura di quelli interni. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone in corrispondenza di una deformazione pari a circa il 200% dello spessore.

4.1.8 TO-M- 10-90-F-2

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 6 giorni, con una velocità di 0,25 mm/s con una forza di spinta.

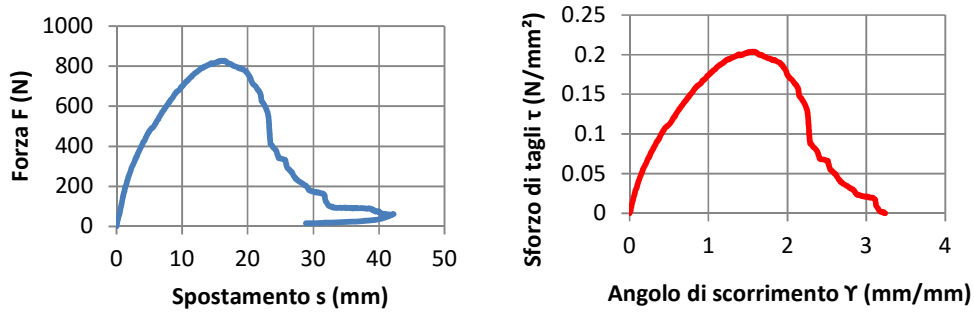


Figura 4.8. Grafici, forza/spostamento e sforzo/angolo di spostamento
TO-M-10-90-F-2

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
3600,00	827	0,20	15,70	9,0

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,22	1,56	0,18	1,06

Tabella 10. Risultati significativi prova TO-M-10-90-F-2.

Il

carico massimo raggiunto per questa prova è di 827 N, ottenuto per un spostamento circa uguale al 150% del spessore del giunto (15 mm), pur avendo un tempo di polimerizzazione diverso. All'aumentare della deformazione si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone come nelle prove precedenti con la stessa velocità. All'aumento del carico si è verificata la rottura dei tiranti più esterni del giunto seguito man mano dalla rottura di quelli interni. La rottura avviene per una deformazione pari a circa il 200% dello spessore. Notiamo la mancanza del tratto pseudo-plastico come la precedente prova veloce con lunghezza minore del giunto.

4.1.9 TO-M- 15-90-S-2

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 12 giorni, con una velocità di 0,025 mm/s con una forza di spinta.

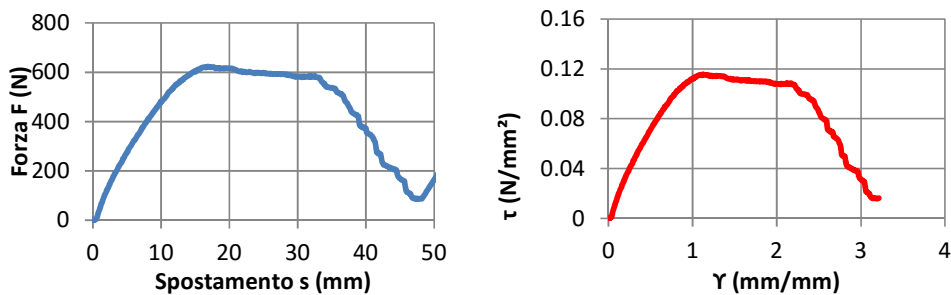


Figura 4.9. Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento

TO-M-15-90-S-2

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
5400	624	0,14	18,6	10,6

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,20	1,21	0,12	0,68

Tabella 11. Risultati significativi prova TO-M-15-90-S-2.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 624 N, ottenuto per uno spostamento circa uguale circa 15 mm, pari allo spessore del giunto. All'aumentare della deformazione non si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone in corrispondenza di una deformazione pari a circa il 200% dello spessore. Si può notare come anche per la prove precedenti di spinta la presenza di un tratto di pseudo-plasticità.

4.1.10 TO-M- 15-90-S-1

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 46 giorni, con una velocità di 0,025 mm/s con una forza di tiro.

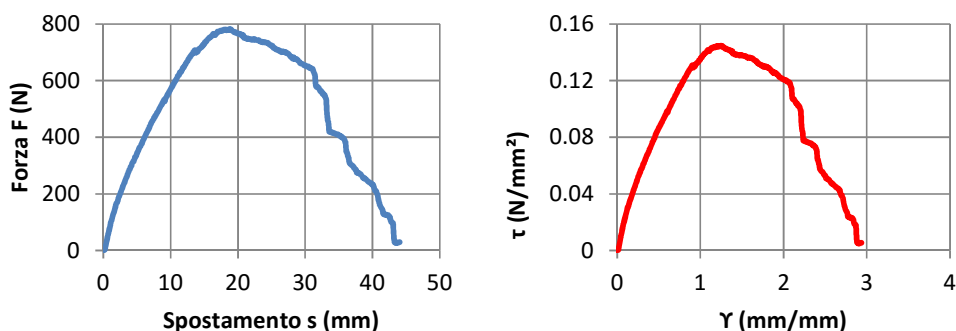


Figura 4.10. Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento

TO-M-15-90-S-1

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
5400,00	781	0,14	18,60	11,25

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,2	1,21	0,12	0,70

Tabella 12. Risultati significativi prova TO-M-15-90-S-1.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 781 N, ottenuto per uno spostamento circa uguale circa 15 mm, pari allo spessore del giunto. Il tempo di polimerizzazione del silicone è maggiore in questo caso ciò può aver influito nella differenza di carico massimo raggiunto rispetto al caso precedente. All'aumentare della deformazione non si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone in corrispondenza di una deformazione pari a circa il 200% dello spessore.

4.1.11 TO-M- 15-90-F-1

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 26 giorni, con una velocità di 0,25 mm/s con una forza di tiro.

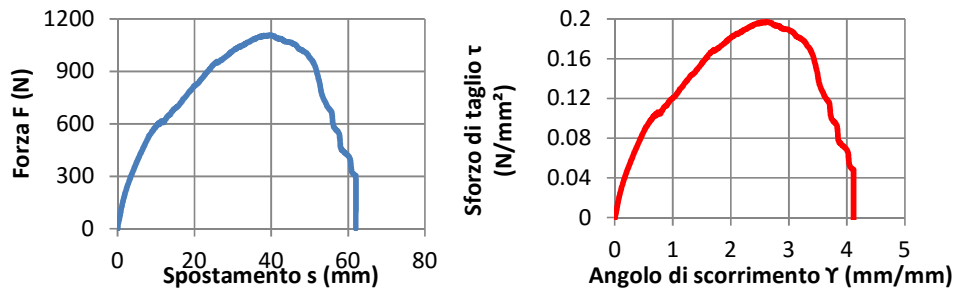


Figura 4.11. Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento
TO-M-15-90-F-1

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
5400,00	1108	0,20	39,00	22,0

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,27	2,60	0,16	1,47

Tabella 13. Risultati significativi prova TO-M-15-90-F-1.

Il risultato di questa prova sono diversi rispetto alle precedenti eseguite a bassa velocità, infatti si può vedere che il carico massimo raggiunto per questa prova è di 1.108 N, ottenuto per uno spostamento circa uguale al 250% del spessore del giunto (15 mm). All'aumentare della deformazione si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone come nelle prove precedenti con la stessa velocità. All'aumento del carico si è verificata la rottura dei tiranti più esterni del giunto seguita man mano dalla rottura di quelli interni. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone nella mezziera dello spessore.

4.1.12 TO-M- 15-90-F-2

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 26 giorni, con una velocità di 0,25 mm/s con una forza di spinta.

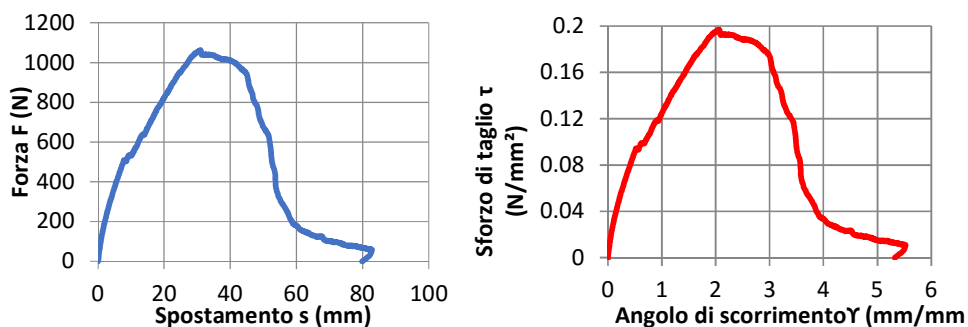


Figura 4.12. Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento
TO-M-15-90-F-2

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
5400,00	1062	0,20	30,08	21

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,27	2,05	0,16	1,43

Tabella 14. Risultati significativi prova TO-M-15-90-F-2.

Il risultato di questa prova è molto simile alla precedente determinato anche dalle stesse caratteristiche, velocità, tempo di polimerizzazione silicone. Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 1.062 N, ottenuto per uno spostamento circa uguale al 250% del spessore del giunto (15 mm). All'aumentare della deformazione si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone come nelle prove precedenti con la stessa velocità. All'aumento del carico si è verificata la rottura dei tiranti più esterni del giunto seguito man mano dalla rottura di quelli interni. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone nella mezzeria dello spessore.

4.1.13 TO-M- 20-120-S-1

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 46 giorni, con una velocità di 0,025 mm/s con una forza di spinta.

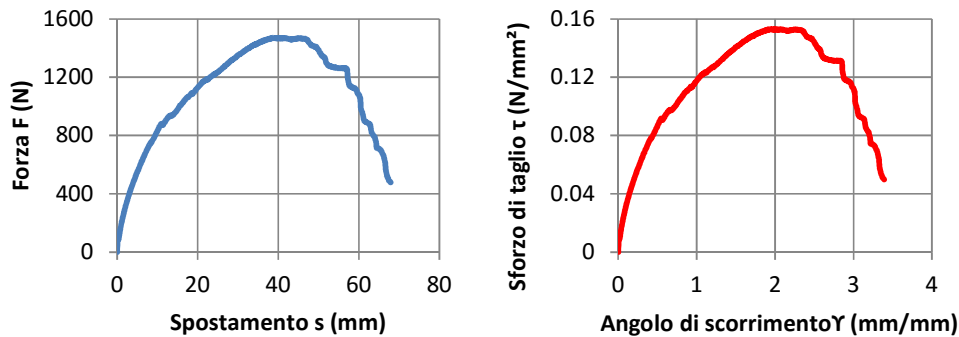


Figura 4.13. Grafici, forza/spostamento e sforzo/angolo di spostamento TO-M-20-120-S-1

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
9600,00	1469	0,15	40,00	21,5

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,22	2,0	0,17	1,79

Tabella 15. Risultati significativi prova TO-M-20-120-S-1.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 1.469 N, ottenuto per uno spostamento circa 40 mm, il modulo tangenziale iniziale è 0,22 N/mm², risultato in linea con quanto ottenuto per altre prove con spessori diversi. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone. Una volta raggiunto il carico massimo si verificano le prime 'crepe' nel silicone nei punti di contatto tra silicone e calcestruzzo, successivamente all'aumentare dello spostamento si verifica lo strappo all'interno del silicone con propagazione dagli estremi all'interno del giunto.

4.1.14 TO-M- 20-120-S-2

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 46 giorni, con una velocità di 0,025 mm/s con una forza di tiro.

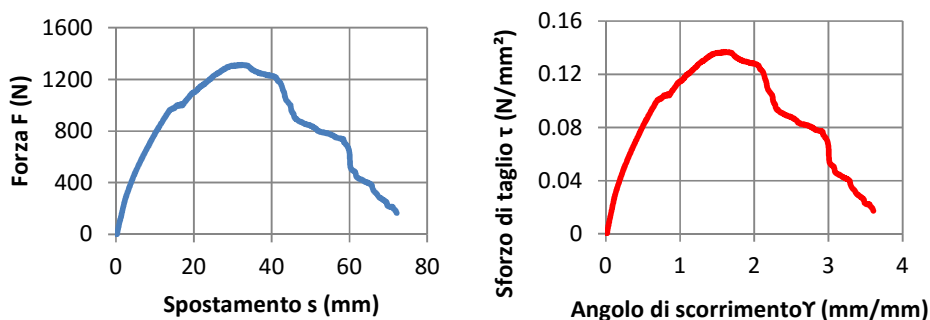


Figura 4.14. Grafici, forza/spostamento e sforzo angolo di spostamento TO-M-20-120-S-2

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

up (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
9600,00	1311	0,14	32,60	18,3

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,20	1,60	0,11	1,28

Tabella 16. Risultati significativi prova TO-M-20-120-S-2.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 1.311 N, ottenuto per uno spostamento circa 35 mm, il modulo tangenziale iniziale è 0,20 N/mm², risultato in linea con quanto ottenuto per altre prove con spessori diversi. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone. Una volta raggiunto il carico massimo si verificano le prime 'crepe' nel silicone nei punti di contatto tra silicone e calcestruzzo, successivamente all'aumentare dello spostamento si verifica lo strappo all'interno del silicone con propagazione dagli estremi all'interno del giunto.

4.1.15 TO-M- 20-120-S-3

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 46 giorni, con una velocità di 0,25 mm/s con una forza di tiro.

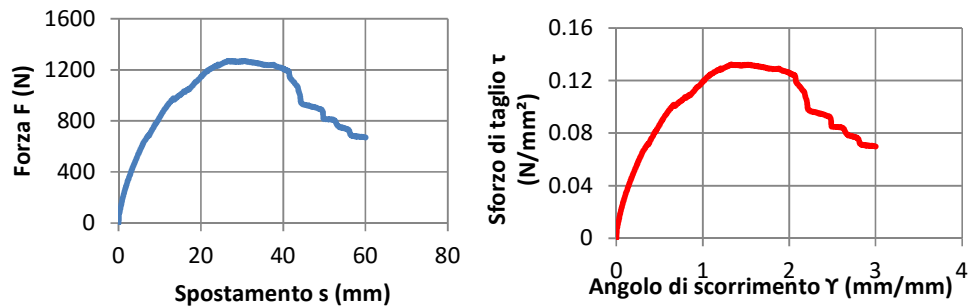


Figura 4.15 Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento
TO-M-20-120-S-3

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
9600,00	1269	0,13	39,00	15,2

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,25	1,87	0,10	0,64

Tabella 17 Risultati significativi prova TO-M-20-120-S-3.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 1.269 N, ottenuto per uno spostamento circa 40 mm, il modulo tangenziale iniziale è 0,25 N/mm², risultato in linea con quanto ottenuto per altre prove con spessori diversi. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone. Una volta raggiunto il carico massimo si verificano le prime 'crepe' nel silicone nei punti di contatto tra silicone e calcestruzzo, successivamente all'aumentare dello spostamento si verifica lo strappo all'interno del silicone con propagazione dagli estremi all'interno del giunto.

4.1.16 TO-M- 20-120-F-1

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 26 giorni, con una velocità di 0,25 mm/s con una forza di spinta.

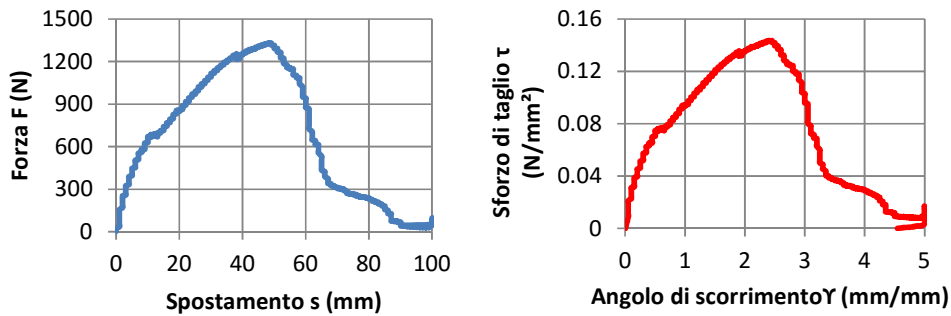


Figura 4.16. Grafici, forza/spostamento e sforzo/ angolo di spostamento
TO-M-20-120-F-1

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
9600,00	1330	0,14	48,00	28,0

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,23	2,45	0,11	1,3

Tabella 18. Risultati significativi prova TO-M-20-120-F-1.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 1.330 N, ottenuto per uno spostamento circa 45 mm. I risultati sono simili alle prove con bassa velocità. All'aumentare della deformazione si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone. Dopo il raggiungimento del carico massimo con l'aumento del carico si è verificato la rottura dei tiranti più esterni del giunto seguito man mano dalla rottura di quelli interni. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone nella mezzeria dello spessore.

4.1.17 TO-M- 20-120-F-2

La prova viene eseguita su un provino con tempo di maturazione di 26 giorni, con una velocità di 0,25 mm/s con una forza di tiro.

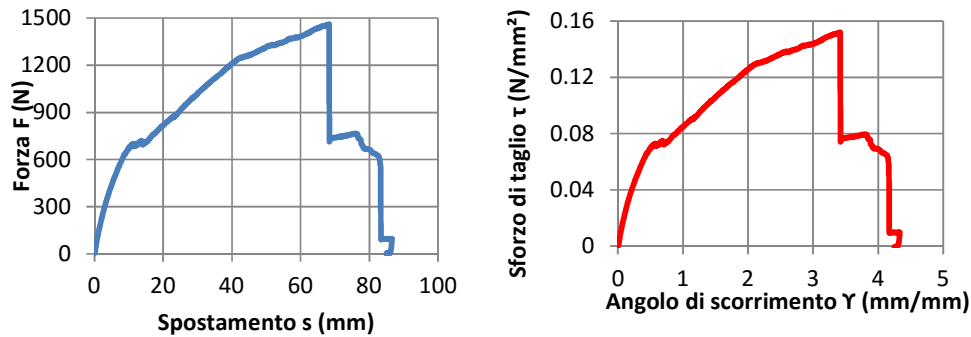


Figura 4.17. Grafici, forza/spostamento e sforzo/angolo di spostamento

TO-M-20-120-F-2

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati più importanti relativi a questa prova.

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
9600,00	1460	0,15	68,30	38,0

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,27	3,40	0,12	1,84

Tabella 19. Risultati significativi prova TO-M-20-120-F-2.

Il carico massimo raggiunto per questa prova è di 1.460 N, ottenuto per un spostamento circa 63 mm. All'aumentare della deformazione si è verificata la creazione di 'tiranti' sul giunto del silicone. Dopo il raggiungimento del carico massimo con l'aumento del carico si è verificato un strappo tra il silicone e il calcestruzzo che determina anche l'abbassamento immediato del carico. Il cedimento del provino avviene mediante un meccanismo di rottura per strappo che si genera all'interno della striscia di silicone nella mezziera dello spessore.

4.1.18 CONSIDERAZIONI PROVE LOCALI MONOTONE

Dalle prove locali monotone eseguite possiamo evidenziare che i provini dello stesso tipo si comportano principalmente nello stesso modo riguardo il tratto iniziale dove si registrano valori della τ iniziale circa $0,25 \text{ N/mm}^2$.

Durante la prima fase di prova con forza di spinta o tiro è possibile vedere che si forma un andamento del grafico sforzo/angolo di scorrimento quasi rettilineo che è dovuto al comportamento elastico del silicone che si verifica fino al raggiungimento di uno spostamento pari a circa 100 % dello spessore del giunto. Per le prove ad alta velocità questa fase si estende di più. A seguito della fase elastica possiamo vedere un tratto pseudo-plastico durante il quale si verificano anche delle deformazioni fuori piano del silicone, che è più evidente nelle prove di spinta. I risultati sperimentali sono caratterizzati da una piccola dispersione sia in termini di carico massimo raggiunto che di duttilità, dovuta sia ad un comportamento strutturale non uniforme del silicone, che non è un materiale soggetto a rigorosi controlli di produzione al pari dei materiali tipicamente classificati come strutturali, sia alla differente metodologia di assemblaggio dei provini ed alla loro età di maturazione. La rottura avviene per tutti i provini a circa 200 % - 300 % dello spessore del giunto di silicone per due meccanismi differenti. Principalmente sia per le prove a velocità bassa sia per quelle a velocità alta si è verificata la rottura in mezzeria dei giunti di silicone. Durante le prove è stato possibile vedere la creazione di tiranti sul giunto di silicone con un'altezza simile allo spessore del giunto.

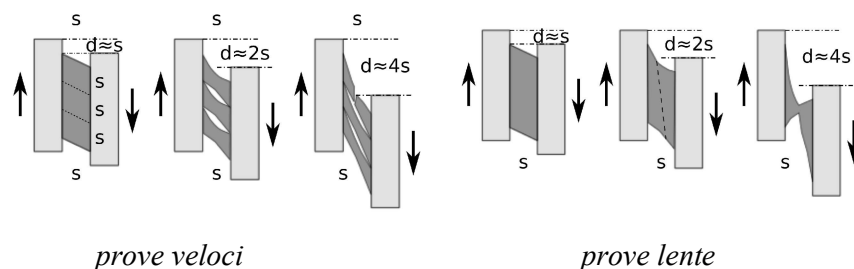


Figura 4.18 Evoluzione dei meccanismi di rottura osservati al crescere dello spostamento d per prove monotone e cicliche veloci.

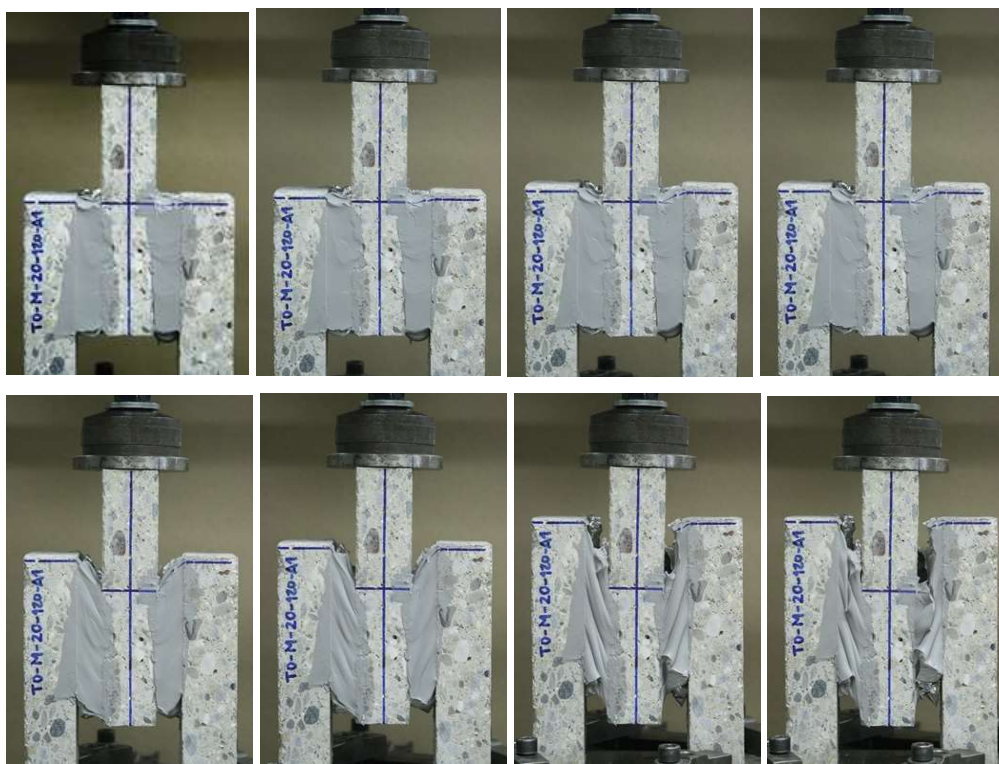


Figura 4.19 Evoluzione della rottura nel campione TO-M-20-120-F-1



Figura 4.20 Evoluzione della rottura nel campione TO-M-20-120-S-3

Durante la campagna sperimentale è stato osservato che la velocità di deformazione ha un'influenza sui risultati. In particolare, dal confronto in termini di sforzo massimo-velocità di deformazione come di seguito verrà evidenziato con il grafico (Figura 4.21). Analogamente, la deformazione ultima mostra anch'essa un andamento logaritmico, ma decrescente, come mostrato in (Figura 4.22).

Ne consegue che il modulo elastico tangenziale apparente è influenzato dalla velocità di applicazione del carico, con un andamento pressoché rettilineo, (Figura 4.23).

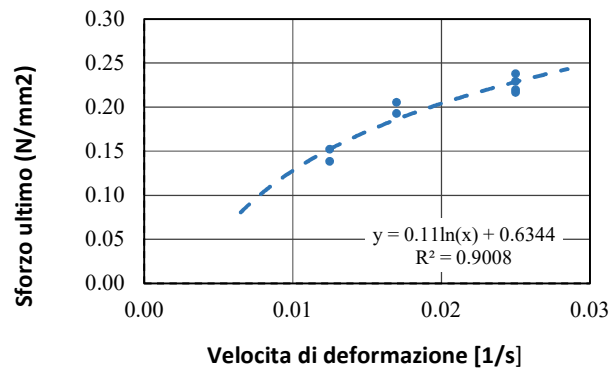


Figura 4.21 Andamento dello sforzo ultimo rispetto alla velocità di deformazione.

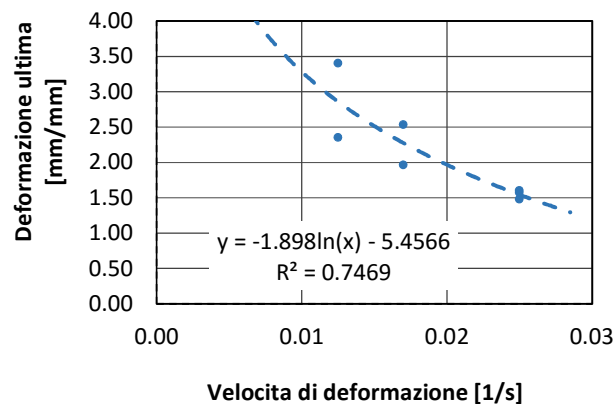


Figura 4.22 Andamento della deformazione ultima rispetto alla velocità di deformazione.

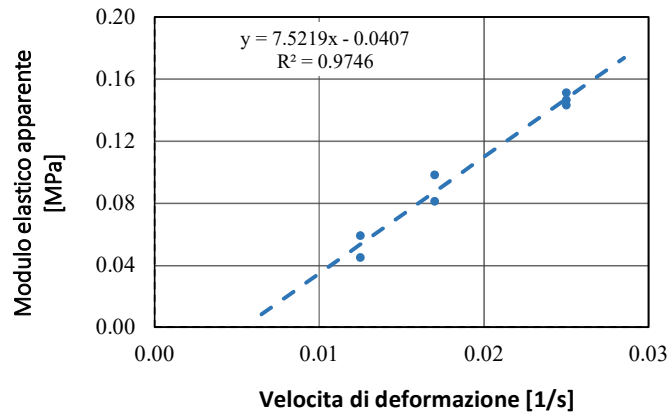


Figura 4.23 Andamento del modulo elastico apparente ultima rispetto alla velocità di deformazione.

Un'altra considerazione riguarda l'influenza del tempo di maturazione del silicone per i diversi campioni. Di seguito viene riportato il grafico (Figura 4.24) dal quale si può notare che anche per prove con tempi di maturazione maggiori il risultato in termini di τ_{max} non varia rispetto a prove con tempi brevi. Il valore di τ_{max} rimane sempre nel tra 0,12-0,25. Si può notare invece l'influenza della velocità. Le prove con velocità 0,25 mm/s si trovano nella parte superiore del grafico.

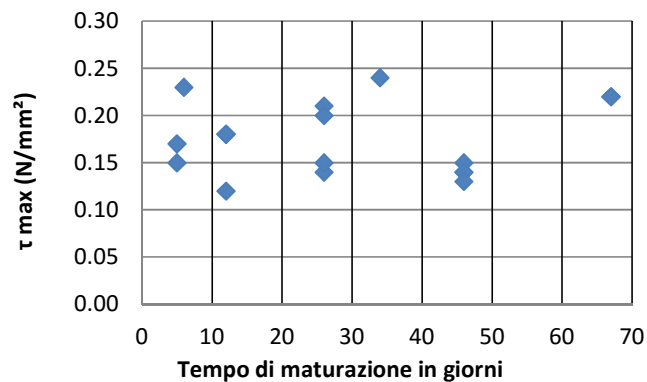


Figura 4.24 Influenza del tempo di maturazione sul τ_{max}

Nella (Figura 4.25) è riportato un grafico dal quale si percepisce che il rapporto L/s influisca poco nei riguardi della τ_{max} raggiunta dalla prova. Si può notare che valori simili di τ_{max} vengono raggiunti da prove con L/s uguali 6 e 9. Perciò possiamo supporre che non ci sono effetti di bordo.

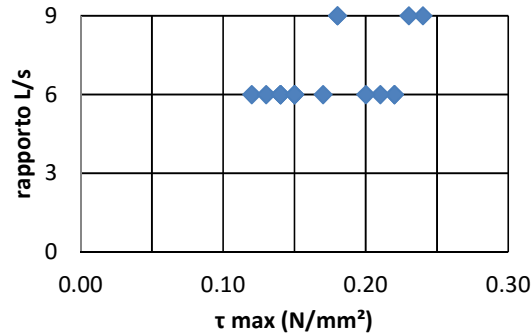


Figura 4.25 Influenza del rapporto L/s sul τ_{max} per prove monotone

Nelle seguenti figure sono riportate le diverse prove effettuate dividendole in base allo spessore del giunto di silicone applicato.

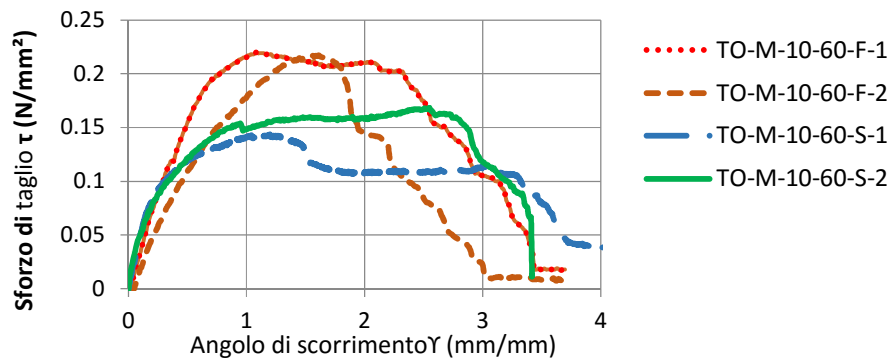


Figura 4.26 Grafico sforzo/angolo di spostamento campioni sezione 10-60 mm

Nel grafico precedente possibile notare che il comportamento iniziale di tutti i provini è simile sia per le prove a velocità alta e bassa. Il tratto pseudo-plastico è maggiormente evidente nelle prove a bassa velocità per le quali si ha anche un carico massimo più basso. Questo è dovuto ad interazioni interne nella struttura molecolare

del silicone che comportano un diverso comportamento in base alla velocità si applicazione del carico.

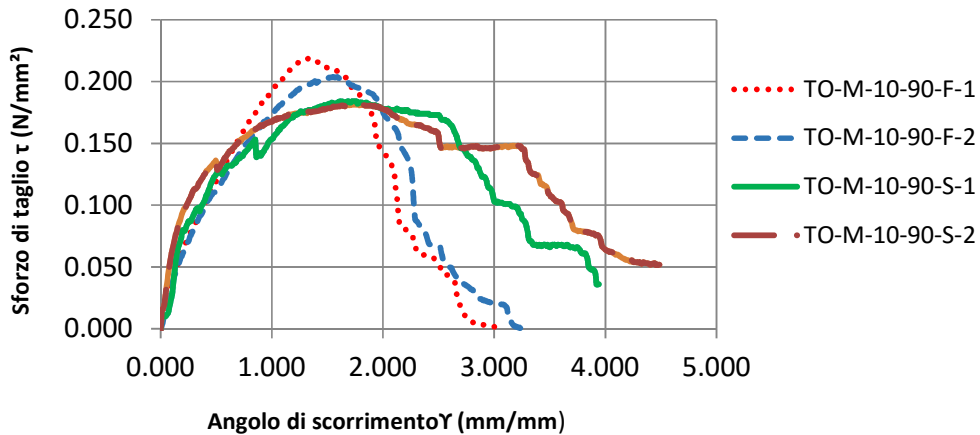


Figura 4.27 Grafico sforzo/angolo di spostamento campioni sezione 10-90 mm

Anche nelle prove 10-90 in (Figura 4.27) si nota che il comportamento iniziale dei provini è simile per entrambe le velocità. Il tratto pseudo-plastico è maggiormente in evidenza nelle prove a bassa velocità per le quali si ha anche un carico massimo più basso, come nelle precedenti prove. Questo è dovuto ad interazioni interne nella struttura molecolare del silicone che comportano un diverso comportamento in base alla velocità si applicazione del carico. La differenza tra il carico massimo delle prove a bassa e alta velocità è più piccolo rispetto alle prove 10-60, questo dovuto a un maggiore lunghezza del tratto di sigillante.

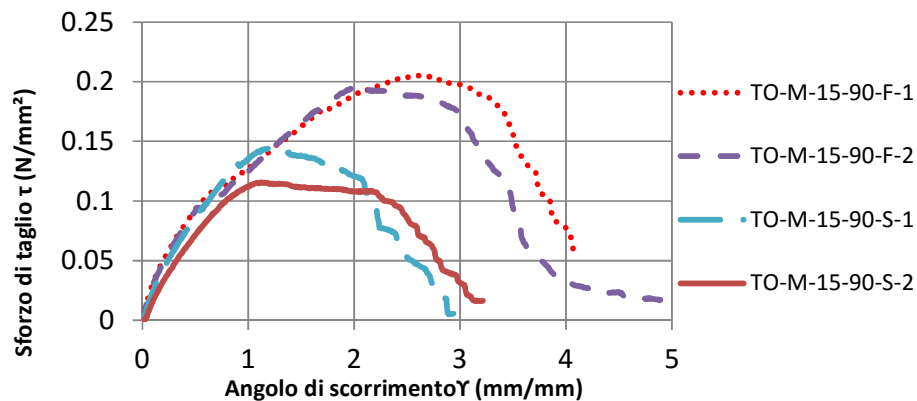


Figura 4.28 Grafico sforzo/angolo di spostamento campioni sezione 15-90 mm

Come detto precedentemente anche per le prove 15-90 rappresentate in (Figura 4.28) il comportamento iniziale è elastico simile in tutte e quattro le prove. Per queste prove possiamo mettere in evidenza la differenza dei carichi massimi per le diverse velocità. Per le prove a velocità bassa si vede ancora che il tratto pseudo-plastico è più esteso rispetto a quello che si vede nelle prove veloci. Invece per quanto riguarda lo sforzo tangenziale massimo questo è molto simile in tutte le prove veloci circa $0,20 \text{ N/mm}^2$.

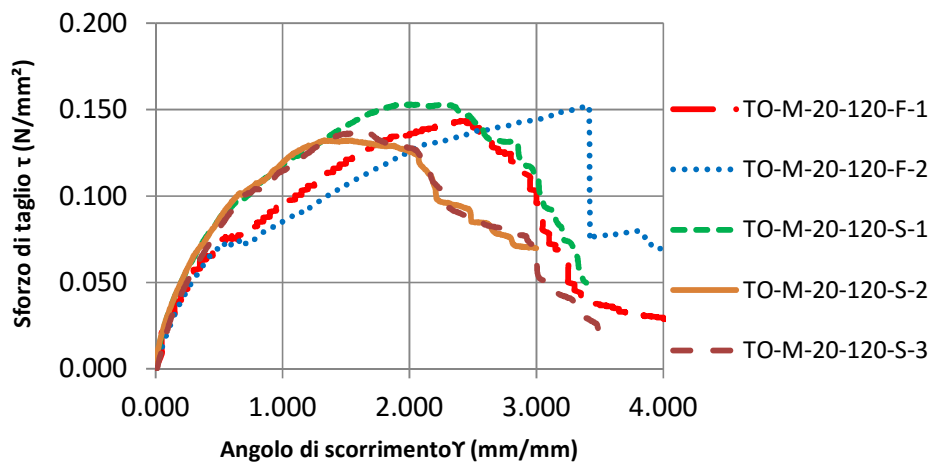


Figura 4.29 Grafico sforzo/angolo di spostamento campioni sezione 20-120 mm

Anche per le prove 20-120 il comportamento iniziale elastico dei campioni è simile. Possibile vedere di come la velocità alta porta ad avere un maggior carico di rottura e quindi uno sforzo di taglio maggiore. Rispetto alle prove precedenti in queste non è così marcato il tratto pseudo-plastico.

4.2 PROVE LOCALI CICLICHE

Tutte le prove cicliche vengono eseguite solamente con la velocità 0,25 mm/s.

4.2.1 TO-C-10-60-F-1

Questo campione di prova ha una tempo di maturazione di 105 giorni, di seguito dati ottenuti.

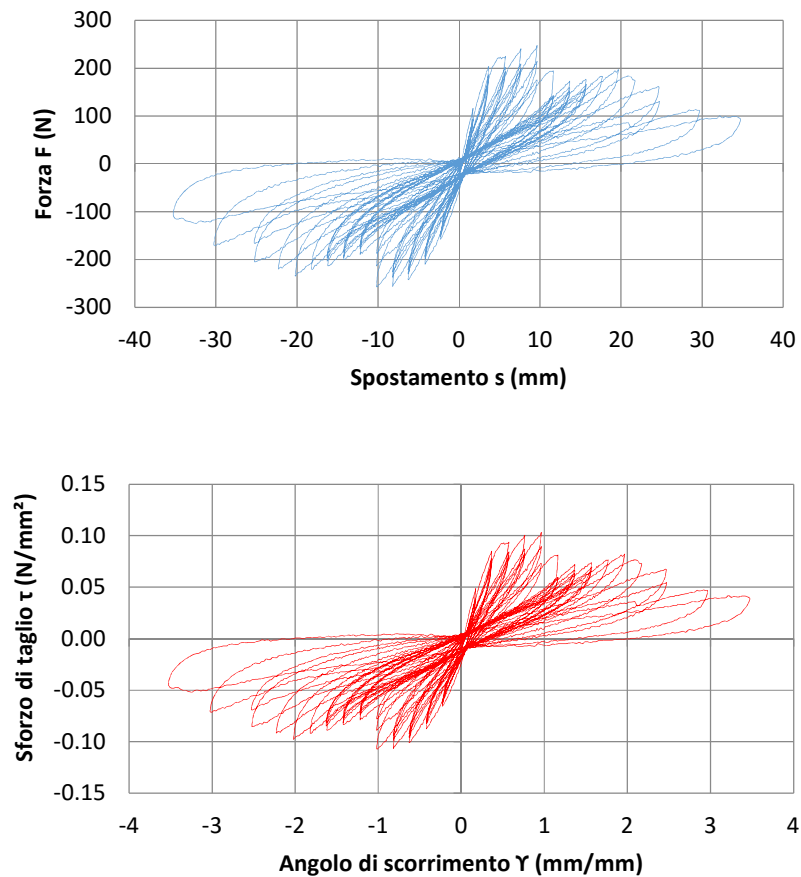


Figura 4.30 Grafici, forza/spostamento e sforzo/spostamento relativo
TO-C-10-60-F-1

Sup (mm²)	F (N) max	τ max (N/mm²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
2400	247	0,12	10,00	28

G in (N/mm²)	Υ (mm/mm) picco	τ (N/mm²) 80%	Υ (mm/mm)80%
0,23	1,11	0,17	0,89

Tabella 20 Risultati significativi prova TO-C-10-60-F-1

Per questa prova possiamo vedere che il carico massimo raggiunto è di 247 N per uno spostamento pari a circa 10 mm come lo spessore del silicone, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,23 N/mm², questi dati sono molto simili ai risultati ottenuti per le prove monotone su campioni delle stesse caratteristiche. Anche per quanto riguarda la rottura completa del silicone questo avviene all'incirca 250 % - 300 % dello spessore del silicone. Durante i primi cicli si sono creati i quadratini visti anche nelle prove monotone. Con l'aumentare del numero di cicli ai quali è sottoposto il campione si verifica un abbassamento del modulo tangenziale, a causa di interazioni interne a livello molecolare del silicone. Con l'aumento dello spostamento fino ad arrivare al carico massimo si è verificato il distacco del silicone dal calcestruzzo dovuto alla non perfetta adesione, questo comporta la diminuzione della resistenza come si vede anche dal grafico. La rottura avviene sia per il distacco dal calcestruzzo che lo strappo che si crea all'interno del suo spessore partendo sempre dagli estremi, fino ad arrivare alla rottura completa del giunto.

4.2.2 TO-C-10-60-F-2

Questo campione di prova ha una tempo di maturazione di 106 giorni., di seguito dati ottenuti.

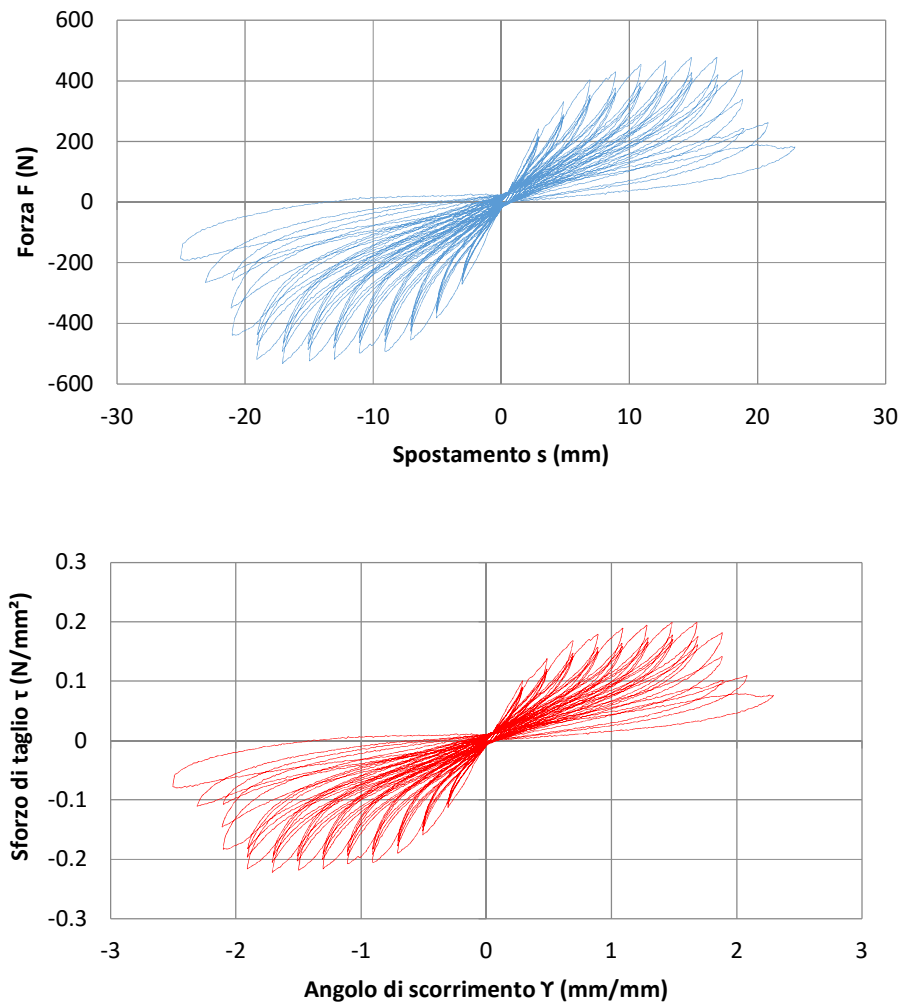


Figura 4.31 Grafici, forza/spostamento e sforzo/spostamento relativo TO-C-10-60-F-2

Sup (mm ²)	F (N) max	τ max (N/mm ²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
2400	477	0,20	15,00	28

G in (N/mm ²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm ²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,31	1,11	0,17	0,89

Tabella 21 Risultati significativi prova TO-C-10-60-F-2

Per questa prova il carico massimo raggiunto è di 477 N per uno spostamento pari a circa 15 mm, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,31 N/mm², questi dati sono molto simili ai risultati ottenuti per le prove monotone su campioni delle stesse caratteristiche. Anche per quanto riguarda la rottura completa del silicone questo avviene all'incirca al 200 % dello spessore del silicone. Durante i primi cicli si sono creati i quadratini visti anche nelle prove monotone. In questo caso l'adesione tra silicone e calcestruzzo era perfetta e questo si è visto perché la rottura è avvenuta per strappo interno allo spessore del silicone e non per distacco dal calcestruzzo.



Figura 4.32 Esempio della rottura interna del giunto di silicone

4.2.3 TO-C-10-90-F-1

Questo campione di prova ha una tempo di maturazione di 25 giorni, di seguito dati ottenuti.

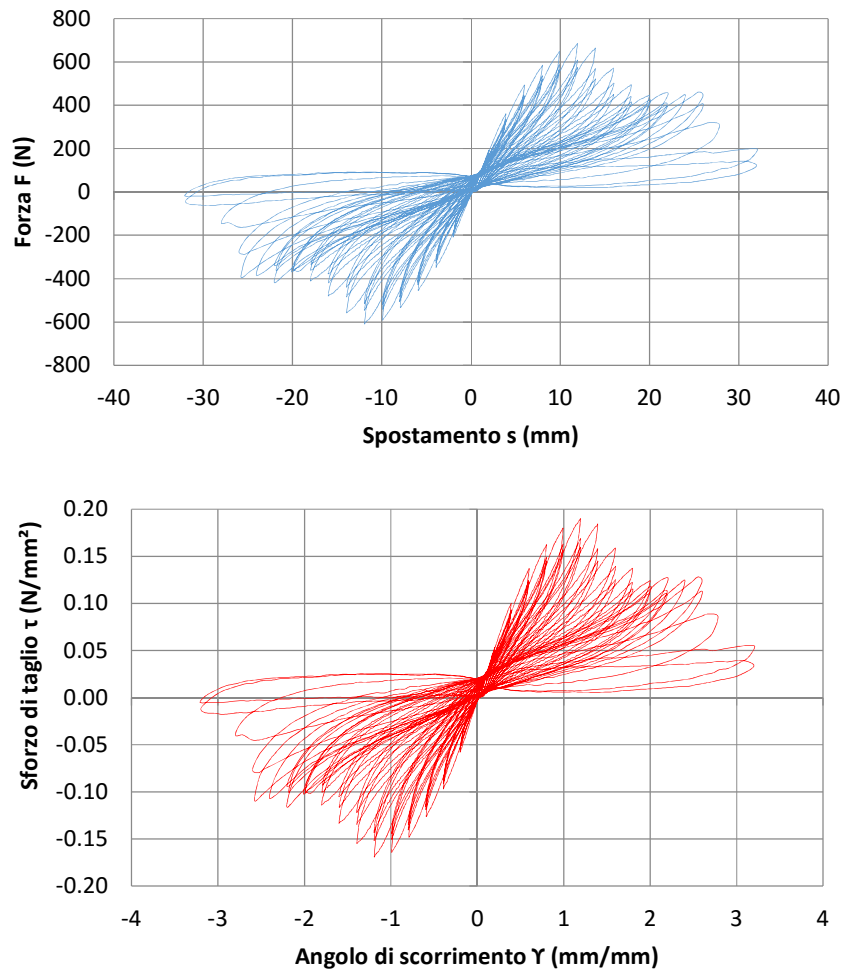


Figura 4.33 Grafici, forza/spostamento e sforzo/spostamento relativo TO-C-10-90-F-1

Sup (mm²)	F (N) max	τ max (N/mm²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
3600	683	0,19	12	28

G in (N/mm²)	γ (mm/mm) picco	τ (N/mm²) 80%	γ (mm/mm)80%
0,22	1,11	0,15	0,89

Tabella 22 Risultati significativi prova TO-C-10-90-F-1

Per questa prova possiamo vedere che il carico massimo raggiunto è di 683 N per uno spostamento pari a circa lo spessore del silicone, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,22 N/mm², questi dati sono molto simili ai risultati ottenuti per le prove monotone su campioni delle stesse caratteristiche. Anche per quanto riguarda la rottura completa del silicone questa avviene per un spostamento pari a circa il 200 % dello spessore del silicone. Con l'aumentare dell'ampiezza del spostamento si è verificata la formazione di 'tiranti' sul giunto di silicone con deformazioni anche fuori dal piano. In questo caso l'adesione tra silicone e calcestruzzo era perfetta e questo si vede in quanto la rottura è avvenuta per strappo interno allo spessore del silicone e non per distacco dal calcestruzzo.

4.2.4 TO-C-10-90-F-2

Questo campione di prova ha una tempo di maturazione di 10 giorni., di seguito dati ottenuti.

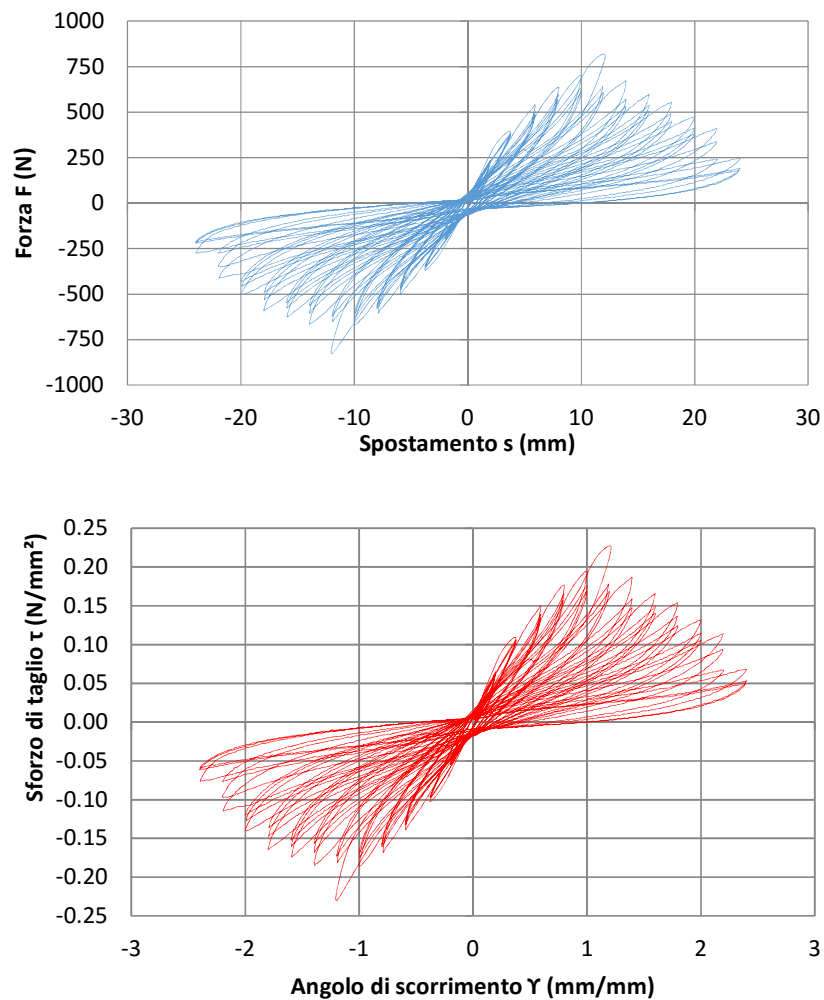


Figura 4.34 Grafici, forza/spostamento e sforzo/spostamento relativo
TO-C-10-90-F-2

Sup (mm²)	F (N) max	τ max (N/mm²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
3600	804	0,22	12	20

G in (N/mm²)	Υ (mm/mm) picco	τ (N/mm²) 80%	Υ (mm/mm)80%
0,25	1,21	0,18	0,97

Tabella 23 Risultati significativi prova TO-C-10-90-F-2

Per questa prova possiamo vedere che il carico massimo raggiunto è di 804 N per un spostamento di circa 12 mm, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,25 N/mm², questi dati sono molto simili ai risultati ottenuti per le prove monotone su campioni delle stesse caratteristiche.

Anche per quanto riguarda la rottura completa del silicone questo avviene all'incirca 200 % dello spessore del silicone.

Durante i primi cicli si sono creati i quadratini visti anche nelle prove monotone.

In questo caso si è verificato un piccolo distacco del silicone e calcestruzzo subito dopo il raggiungimento del massimo carico, la rottura è avvenuta principalmente per strappo interno allo spessore del silicone.

4.2.5 TO-C-15-90-F-1

Questo campione di prova ha una tempo di maturazione di 5 giorni., di seguito dati ottenuti.

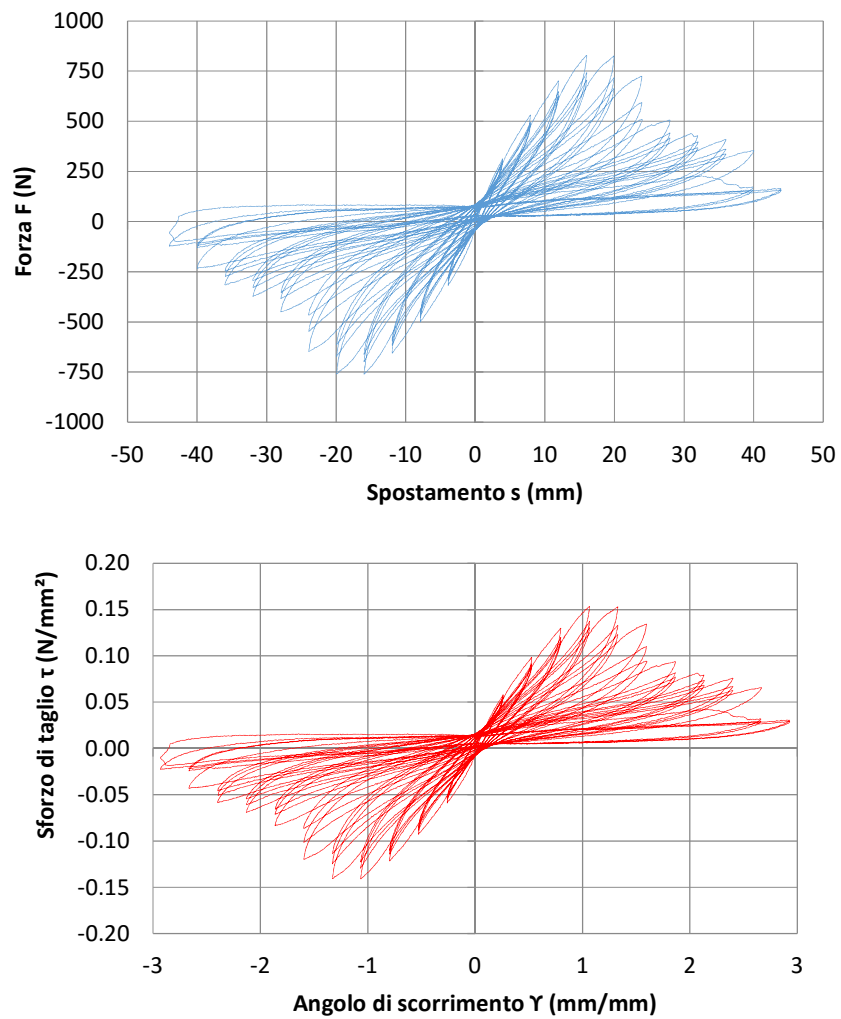


Figura 4.35 Grafici, forza/spostamento e sforzo/spostamento relativo
TO-C-15-90-F-1

Sup (mm²)	F (N) max	τ max (N/mm²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
5400	827	0,15	15,6	20

G in (N/mm²)	Υ (mm/mm) picco	τ (N/mm²) 80%	Υ (mm/mm)80%
0,22	1,21	0,12	0,97

Tabella 24 Risultati significativi prova TO-C-15-90-F-1

Per questa prova possiamo vedere che il carico massimo raggiunto è di 827 N per un spostamento di circa 15 mm, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,22 N/mm², questi dati sono molto simili ai risultati ottenuti per le prove monotone su campioni delle stesse caratteristiche.

Anche per quanto riguarda la rottura completa del silicone questo avviene all'incirca 200 % dello spessore del silicone.

Durante i primi cicli si sono creati i quadratini visti anche nelle prove monotone.

Subito dopo il raggiungimento del massimo carico si sono verificate le prime lacerazioni sul giunto di silicone e la rottura è avvenuta principalmente per strappo interno allo spessore del silicone.

4.2.6 TO-C-15-90-F-2

Questo campione di prova ha una tempo di maturazione di 10 giorni., di seguito dati ottenuti.

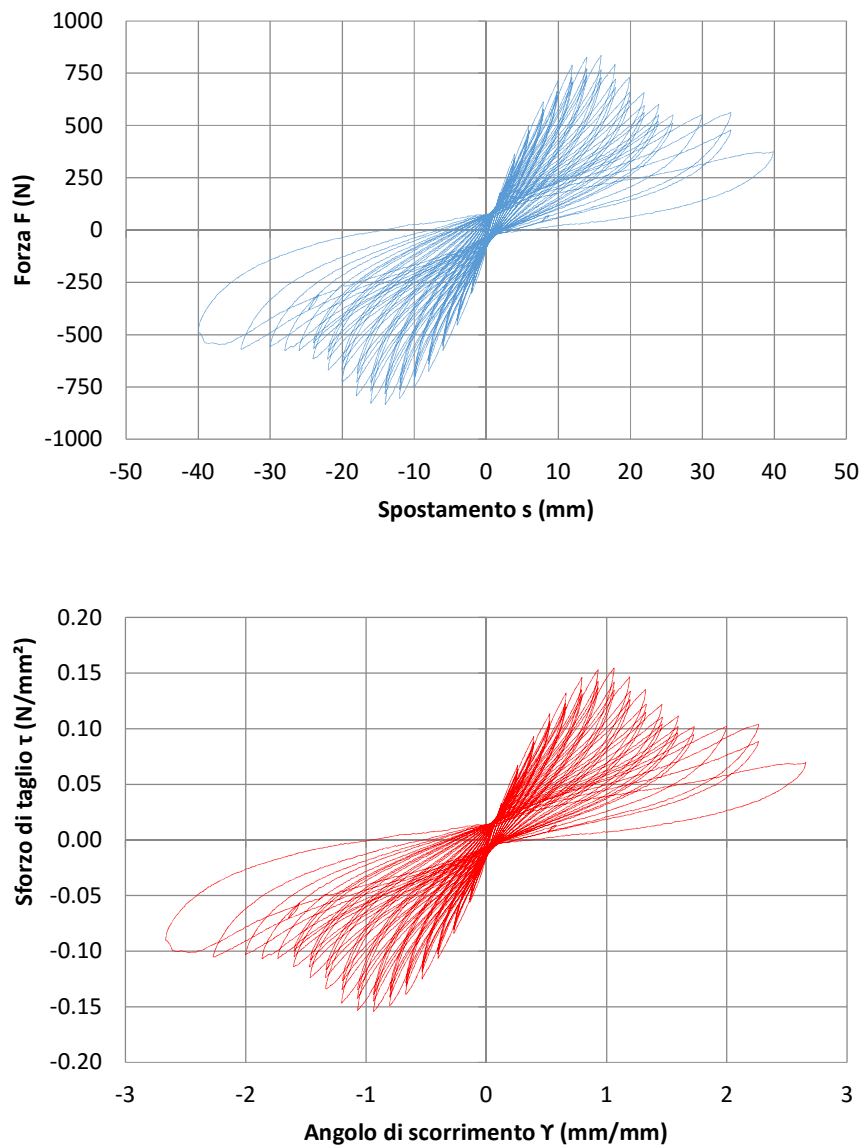


Figura 4.36 Grafici, forza/spostamento e sforzo/spostamento relativo TO-C-15-90-F-2

Sup (mm²)	F (N) max	τ max (N/mm²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
5400	834	0,15	15,4	20

G in (N/mm²)	Υ (mm/mm) picco	τ (N/mm²) 80%	Υ (mm/mm)80%
0,26	1,06	0,12	0,85

Tabella 25 Risultati significativi prova TO-C-15-90-F-2

Per questa prova possiamo vedere che il carico massimo raggiunto è di 834 N per un spostamento di circa 15 mm, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,26 N/mm², questi dati sono molto simili ai risultati ottenuti per le prove monotone su campioni delle stesse caratteristiche.

Anche per quanto riguarda la rottura completa del silicone questo avviene all'incirca 200 % dello spessore del silicone.

Durante i primi cicli si sono creati i quadratini visti anche nelle prove monotone.

Subito dopo il raggiungimento del massimo carico si sono verificate le prime lacerazioni sul giunto di silicone e la rottura è avvenuta principalmente per strappo interno allo spessore del silicone.

4.2.7 TO-C-20-120-F-1

Questo campione di prova ha una tempo di maturazione di 116 giorni., di seguito dati ottenuti.

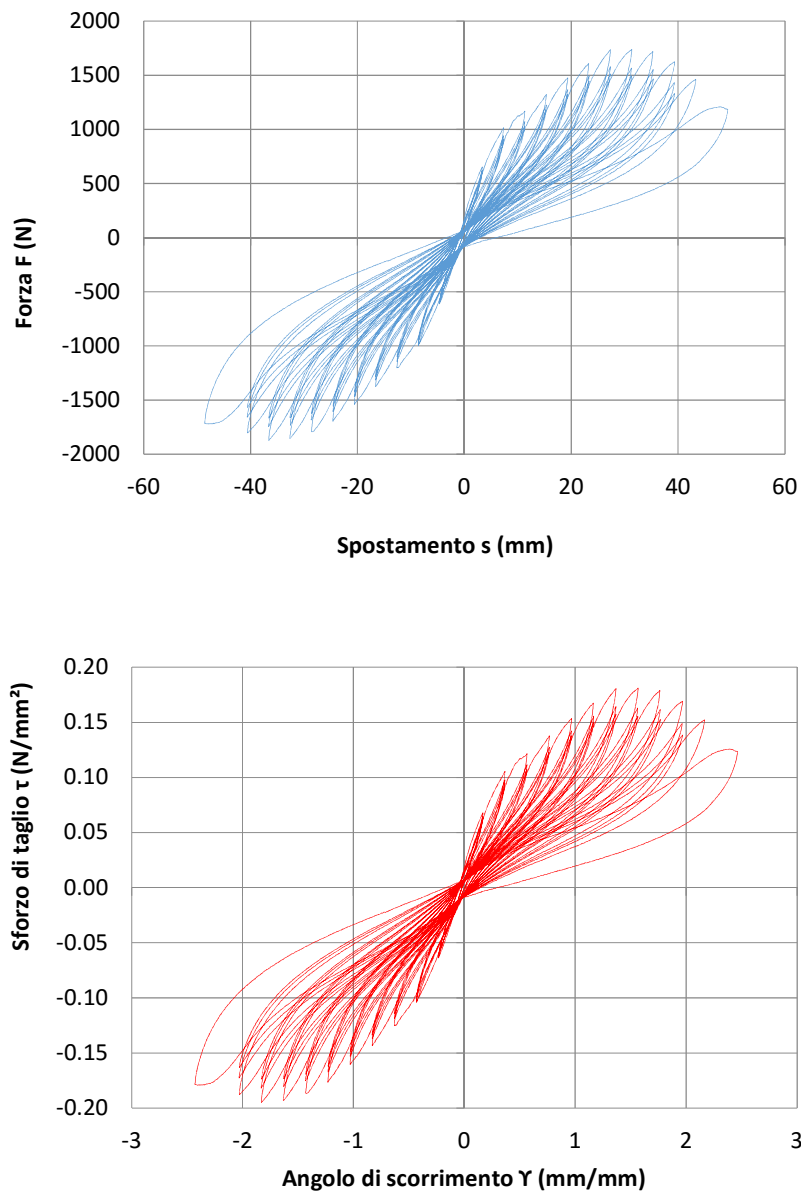


Figura 4.37 Grafici, forza/spostamento e sforzo/spostamento relativo TO-C-20-120-F-1

Sup (mm²)	F (N) max	τ max (N/mm²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
9600	1737	0,18	27,5	38

G in (N/mm²)	Υ (mm/mm) picco	τ (N/mm²) 80%	Υ (mm/mm)80%
0,43	1,36	0,14	1,09

Tabella 26 Risultati significativi prova TO-C-20-120-F-1

Per questa prova possiamo vedere che il carico massimo raggiunto è di 1737 N per un spostamento di circa 27 mm, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,43 N/mm², questi dati sono molto simili ai risultati ottenuti per le prove monotone su campioni delle stesse caratteristiche.

Anche per quanto riguarda la rottura completa del silicone questo avviene all'incirca 200 % dello spessore del silicone.

Durante i cicli si sono creati i quadratini visti anche nelle prove monotone.

Subito dopo il raggiungimento del massimo carico si sono verificate dei distacchi tra silicone e calcestruzzo poi seguite dalle prime lacerazioni sul giunto di silicone e la rottura è avvenuta principalmente per strappo interno allo spessore del silicone.

4.2.8 TO-C-20-120-F-2

Questo campione di prova ha una tempo di maturazione di 116 giorni., di seguito dati ottenuti.

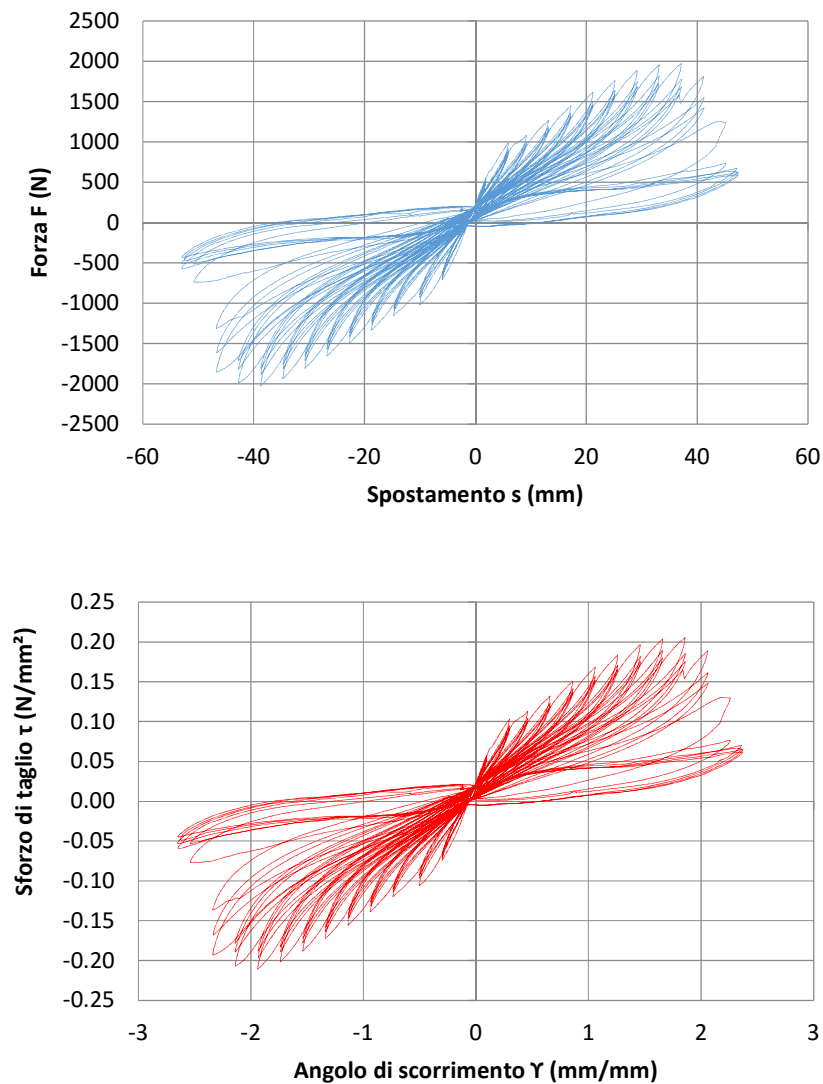


Figura 4.38 Grafici, forza/spostamento e sforzo/spostamento relativo TO-C-20-120-F-2

Sup (mm²)	F (N) max	τ max (N/mm²)	s (mm) picco	s (mm) 80%
9600	1973	0,21	37	40

G in (N/mm²)	Υ (mm/mm) picco	τ (N/mm²) 80%	Υ (mm/mm)80%
0,41	1,86	0,16	1,49

Tabella 27 Risultati significativi prova TO-C-20-120-F-2

Per questa prova possiamo vedere che il carico massimo raggiunto è di 1973 N per un spostamento di circa 37 mm, il modulo elastico tangenziale iniziale è 0,41 N/mm², questi dati sono molto simili ai risultati ottenuti per le prove monotone su campioni delle stesse caratteristiche.

Anche per quanto riguarda la rottura completa del silicone questo avviene all'incirca 200 % dello spessore del silicone.

Durante i cicli si sono creati i quadratini visti anche nelle prove monotone.

Subito dopo il raggiungimento del massimo carico si è verificato il distacco tra silicone e calcestruzzo per due giunti.

A seguire sono comparse le prime lacerazioni sul giunto di silicone e la rottura è avvenuta una combinazione di eventi tra il distacco completo di due giunti e lo strappo interno allo spessore del silicone.

4.2.9 CONSIDERAZIONI SULLE PROVE CICLICHE E MONOTONE

Nella (Figura 4.39) il grafico mostra le prove monotone con un tempo di maturazione di 67 giorni e cicliche con 105 e 116 giorni, eseguite con velocità 0,25 mm/s, per giunti di silicone da $s = 10$ mm e $L = 60$ mm, sovrapposte in termini di sforzo di taglio – deformazione trasversale del silicone in modo tale da permettere un confronto. Per le prove cicliche possiamo notare il loro comportamento iniziale simile alle prove monotone. Il modulo elastico tangenziale iniziale G è molto simile in tutte e quattro le prove, pari a circa $0,33$ N/mm². La linea del carico massimo nelle prove monotone segue abbastanza bene l'andamento del carico durante le prove cicliche. Al raggiungimento della deformazione pari a 200 % dello spessore si vede l'abbassamento immediato del carico nelle prove cicliche come in quelle monotone. Il carico massimo relativamente basso rispetto agli altri per la prova TO-C-10-60-F-1 è dovuto alla non perfetto assemblaggio del campione.

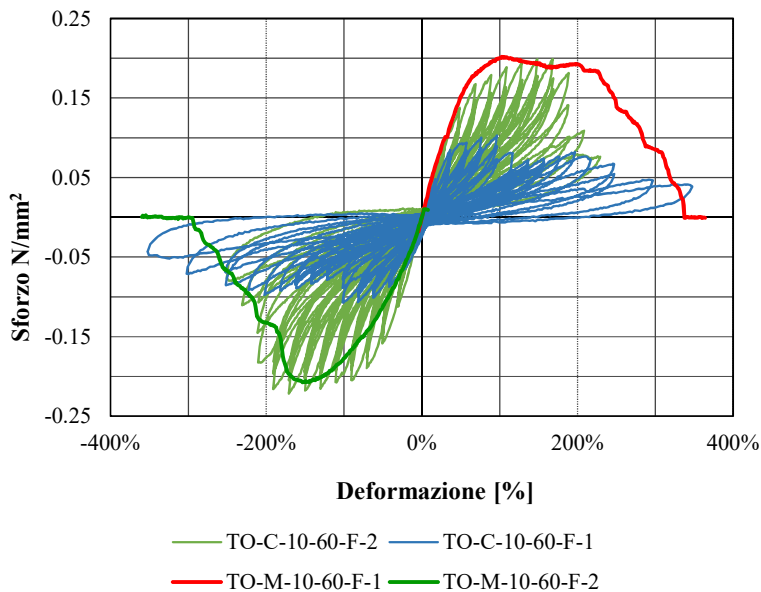


Figura 4.39 Provini $s = 10$ mm e $L = 60$ mm diagrammi sperimentali di prove monotone e cicliche.

Nella (Figura 4.40) il grafico mostra le prove monotone con una maturazione di 26 giorni e cicliche con maturazione di 5 e 10 giorni, tutte eseguite con la velocità di 0,25 mm/s, per giunti di silicone da $s = 15$ mm e $L = 90$ mm, sovrapposte in termini di sforzo di taglio – deformazione trasversale del silicone in modo tale da permettere un confronto. Per le prove cicliche possiamo notare il loro comportamento iniziale simile alle prove monotone. Il modulo elastico tangenziale iniziale G è molto simile in tutte e quattro le prove, pari a circa $0,27$ N/mm². La linea del carico massimo nelle prove monotone non segue bene l'andamento del carico durante le prove cicliche, che risulta essere più basso. Al raggiungimento della deformazione pari a 200 % dello spessore inizia l'abbassamento del carico nelle prove monotone. Per le prove cicliche il carico si abbassa al raggiungimento di una deformazione pari allo spessore del silicone. La differenza del tempo di maturazione può essere la causa di un comportamento in termini di sforzo massimo.

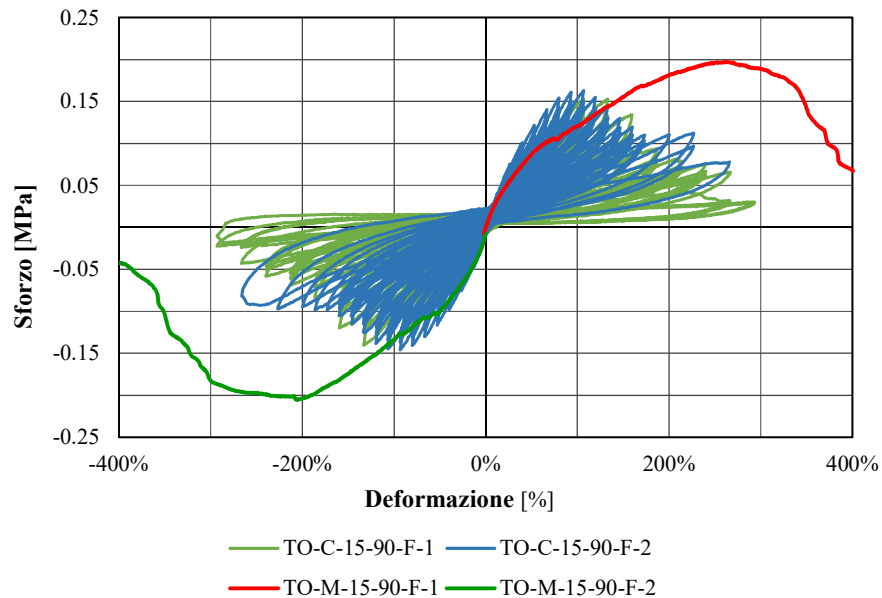


Figura 4.40 Provini $s = 15$ mm e $L = 90$ mm diagrammi sperimentali di prove monotone e cicliche.

Nella (Figura 4.41) il grafico mostra le prove monotone con una maturazione di 26 giorni e cicliche con tempo di maturazione di 116 giorni, entrambi con velocità di prova 0,25 mm/s, per giunti di silicone da $s = 20$ mm e $L = 120$ mm, sovrapposte in termini di sforzo di taglio – deformazione trasversale del silicone in modo tale da permettere un confronto. Per le prove cicliche possiamo notare il loro comportamento iniziale più rigido rispetto alle prove monotone. Il modulo elastico tangenziale iniziale G è maggiore per le prove cicliche pari a circa $0,42$ N/mm² rispetto al $0,25$ N/mm² per le prove monotone. L'andamento della τ per le prove monotone rimase sempre più basso rispetto alle cicliche. Al raggiungimento della deformazione pari a 200 % inizia il cedimento dei giunti sia per le prove cicliche ed monotone. La differenza nei tempi di maturazione può aver determinato il diverso comportamento delle prove, quelle cicliche con un tempo di maturazione maggiore hanno raggiunto carichi più alti rispetto alle monotone.

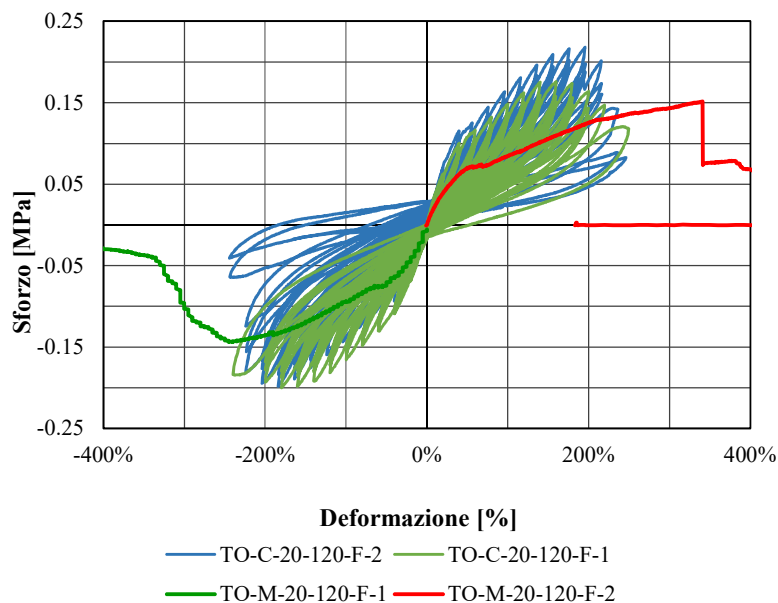


Figura 4.41 Provini $s = 20$ mm e $L = 120$ mm diagrammi sperimentali di prove monotone e cicliche.

4.3 PROVA SU SOTTOSISTEMA STRUTTURALE

4.3.1 IMPIANTO DI PROVA

Il silicone è stato applicato con gli stessi criteri ad un sottosistema strutturale in scala al vero composto da due pannelli prefabbricati pieni collegati al telaio di prova con assetto isostatico di vincolo con bielle incernierate alle estremità. La struttura di supporto è un quadrilatero articolato realizzato in acciaio, progettato per trasmettere gli spostamenti imposti ai pannelli senza introdurre reazioni aggiuntive. I pilastri sono anch'essi vincolati come bielle alla base ed in sommità. Le (Figura 3.4 e Figura 3.5) mostrano l'impianto di prova.

4.3.2 RISULTATI SPERIMENTALI

Sono state effettuate prove sperimentali in configurazione puramente isostatica priva di giunti siliconici, così da verificare che l'impianto di prova non fornisse contributi irrigidenti non previsti. In (Figura 4.42) sono riportate delle fotografie del sistema di prova indeformato e soggetto a massimo spostamento.

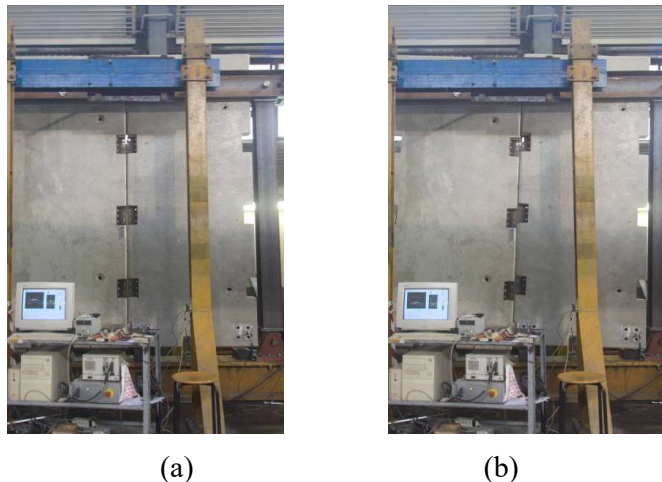


Figura 4.42 Prove cicliche su sottosistema strutturale: configurazione iniziale (a), deformata massima con 5% di drift (b).

I risultati delle due prove con assetto isostatico a pendolo dei pannelli sono riportati in (Figura 4.43) in termini di forza-spostamento relativo verticale. Le curve registrano un comportamento confuso, dovuto all'influenza di piccoli attriti locali del telaio, confermando che il sotto-sistema strutturale è capace di spostarsi con l'applicazione di forze di entità trascurabile (inferiori a 0,6 kN) per tutto il campo di spostamento utilizzato nella prova successiva.

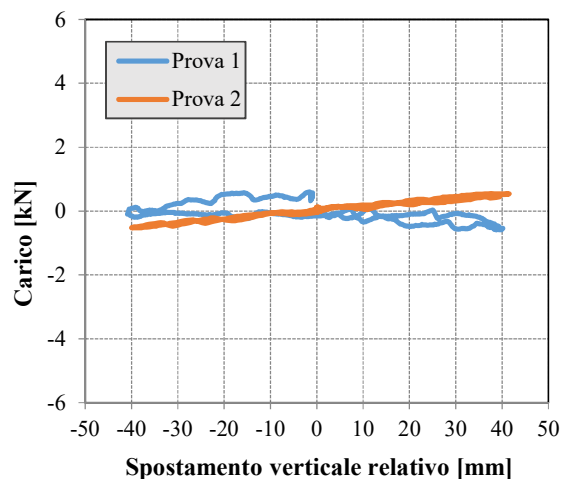
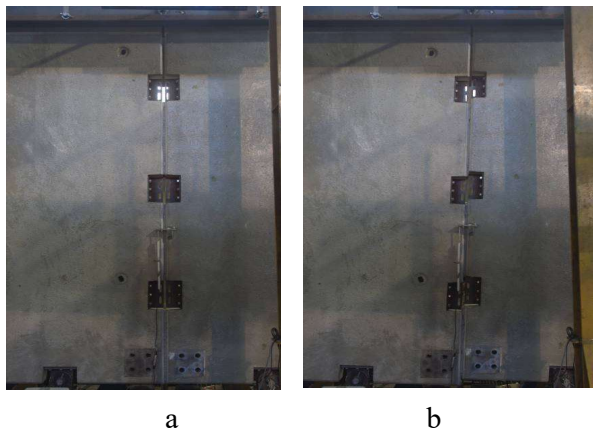


Figura 4.43 Diagramma forza-spostamento relativo verticale per i due test con configurazione isostatica.

In seguito è stato applicato il silicone nelle interfacce tra i pannelli ad esclusione delle parti recessive e della porzione superiore tra il recesso più alto e la cima del pannello per l'interferenza della trave di acciaio. La lunghezza complessiva delle singole bande di silicone è quindi pari a 1,70 m su due file, per un totale di 3,40 m di sviluppo lineare. Il lato medio della sezione di silicone è pari a circa 15 mm. È stata eseguita una prova oligociclica con spostamenti relativi verticali dei pannelli impressi crescenti di passo 2,5 – 5,0 – 10,0 – 20,0 – 40,0 mm con tre ripetizioni ciascuno. La (Figura 4.44) mostra le deformazioni del sistema di prova al massimo spostamento orizzontale raggiunto, pari a 88 mm, ovvero il 4% di deriva relativo di interpiano.



*Figura 4.44 Prove cicliche su sottosistema strutturale con silicone:
indeformata (a), deformata massima (4% di drift) (b)*

Anche in questa prova si è verificato il medesimo comportamento individuato in precedenza, con la perdita di forma per ingobbimento fuori piano raggiunta durante i cicli dell'1,6% di deriva, cui corrisponde l'inizio del ramo discendente di carico, per poi giungere a rottura combinata per distacco dal supporto e collasso in mezzeria, come mostrato in (Figura 4.45).

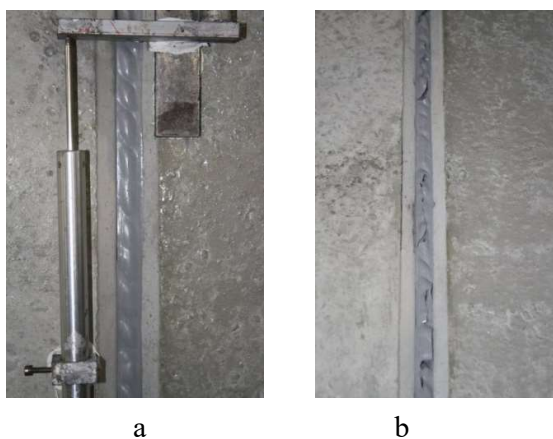


Figura 4.45 Prove su sottosistema strutturale: individuazione dei tiranti inclinati all'1,6% di drift (a), rottura combinata per distacco dal supporto e collasso in mezzeria al 4 % di drift (b).

Il diagramma sperimentale forza-spostamento è riportato in (Figura 4-46) e conferma il comportamento estremamente flessibile del giunto, con degrado ciclico di rigidità e resistenza (solo per grandi spostamenti) e marcato appiattimento dei cicli isteretici in prossimità dell'origine (pinching).

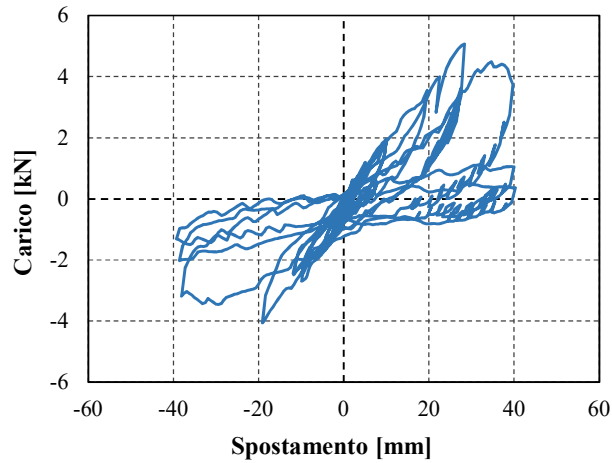


Figura 4.46 Diagramma forza orizzontale-spostamento relativo verticale.

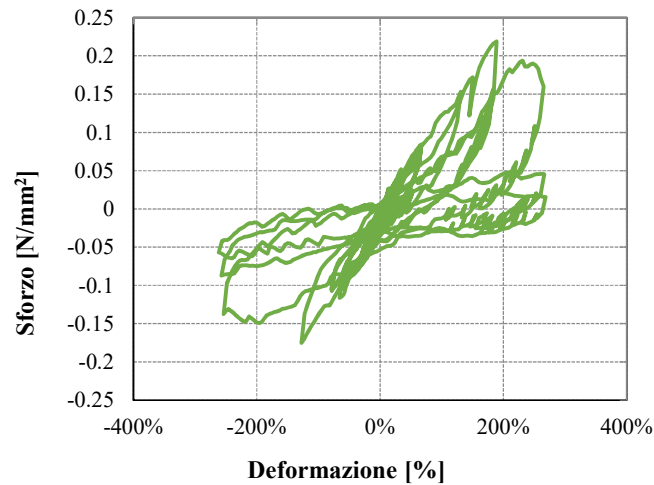


Figura 4.47 sforzo-deformazione della prova su sotto-insieme strutturale.

In (*Figura 4.47*) sono posti a confronto i diagrammi sperimentali delle prove locali effettuate su provino di lato 15 mm con il diagramma isteretico della prova su sottosistema strutturale, opportunamente tradotto in sforzo tangenziale medio (τ) e deformazione tagliante (γ) attraverso le medesime equazioni descritte in precedenza. È possibile notare il buon accordo dei risultati ottenuti con le differenti prove cicliche, sia in termini di rigidezza che di spostamento ultimo, mentre si riporta un valore maggiore di resistenza massima per la prova su sotto-insieme, probabilmente dovuto al numero minore di cicli eseguiti.

4.3.3 CONFRONTO PROVE MONOTONE-CICLICHE LOCALI E SOTTOSISTEMA

Nel presente paragrafo riportiamo in un unico grafico i risultati di prova per quanto riguarda il comportamento del giunto di silicone di spessore $s = 15$ mm, $L = 90$ mm per le prove monotone e cicliche locali ed il risultato della prova sul sottoinsieme in termini di sforzo e deformazione.

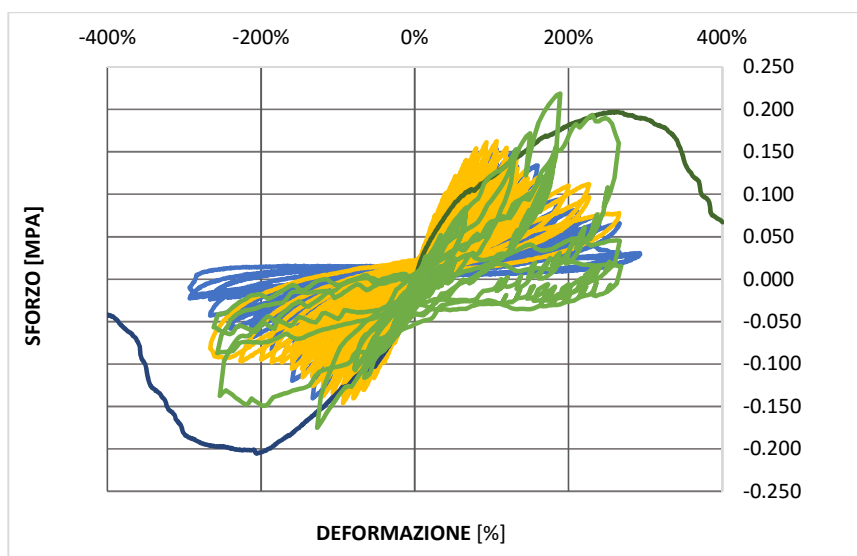


Figure 4.48 Confronto sforzo-deformazione della prova su sotto-insieme strutturale (in verde) con le prove cicliche e monotone eseguite su provino di lato 15 mm.

Possiamo vedere che il comportamento iniziale per tutti e tre i tipi di prove è molto simile in termini di elasticità, in quanto il modulo elastico tangenziale G iniziale è uguale. Lo sforzo massimo raggiunto dalla prova del sottoinsieme strutturale è simile allo sforzo raggiunto per le prove monotone pur avendo un tempo di maturazione minore come le prove cicliche locali. Possiamo affermare che la lunghezza del giunto di silicone influisce sulla resistenza dello stesso. Durante le prove cicliche il modulo elastico diminuisce con l'aumentare della deformazione, facendo sì che il giunto arrivi prima a rottura se sottoposto a forze cicliche.

5 CONCLUSIONI

5.1 CALCOLI PROGETTUALI

Appare evidente dai dati raccolti durante la campagna sperimentale svolta, come la presenza di giunti siliconati possa fornire un contributo in termini di rigidezza e resistenza. In particolare, confrontando la rigidezza del giunto con le tipiche rigidzze di un sistema strutturale resistente alle azioni orizzontali, anche di particolare flessibilità come un telaio prefabbricato, si nota come l'incremento imputabile al silicone possa essere considerato trascurabile ai fini ingegneristici. Si nota, altresì, come il contributo di resistenza τ_{max} che il silicone può offrire, pari a circa 0,25 MPa in sfavore di sicurezza, possa essere significativo ai fini della progettazione del sistema di connessione isostatico del singolo pannello. Ipotizzando un pannello verticale di parete di altezza totale lorda h pari a 9,0 m e rapporto di forma S tra altezza interpiano h_{eff} (distanza verticale tra le cerniere di base e di sommità, pari a 7,5 m) e larghezza b (pari a 2,5 m) pari a 3, il contributo in termini di forza orizzontale F_h sulla connessione pannello-trave oppure pannello-fondazione per un singolo strato di lato s 10 mm (*Figura 5.1 a*) risulta essere pari a:

$$F_h = \frac{\tau_{max} \cdot h \cdot s}{S} = \frac{0,25 \cdot 9000 \cdot 10}{3} = 7,5 \text{ kN}$$

mentre il contributo verticale F_v risulta essere nullo.

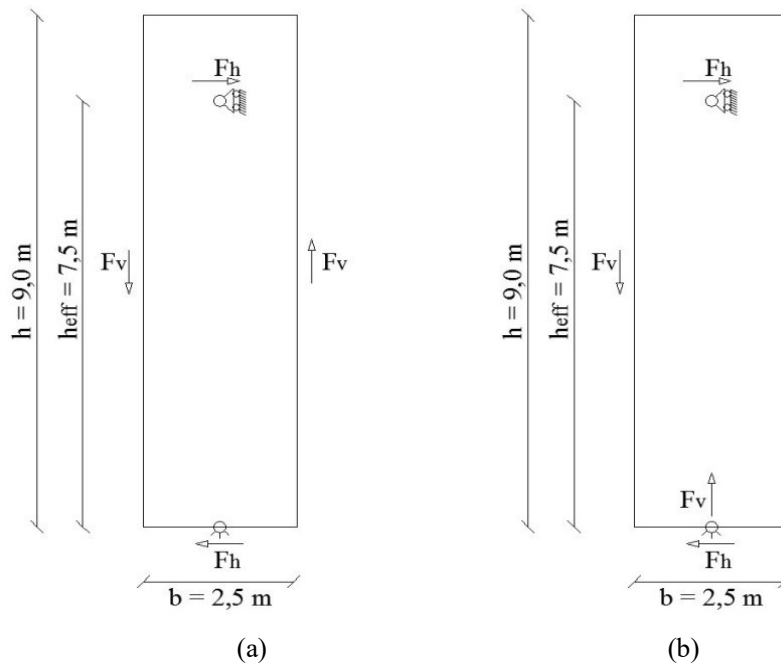


Figura 5.1 Schema grafico di (a) pannello interno
(b) pannello di bordo

Per un medesimo pannello con giunto siliconico solo da un lato (Figura 5.1 b), si otterrebbe:

$$F_h = \frac{\tau_{max} \cdot h \cdot s}{2S} = \frac{0,25 \cdot 9000 \cdot 10}{2 \cdot 3} = 3,75 \text{ kN}$$

$$F_v = \tau_{max} \cdot h \cdot s = 0,25 \cdot 9000 \cdot 10 = 22,5 \text{ kN}$$

È possibile anche osservare come il problema sia governato da numerosi parametri, quali lo spessore, la qualità di posa, la velocità di applicazione del carico e l'invecchiamento del materiale. L'intrinseca dispersione delle curve è prevedibile per un prodotto che non è sottoposto ai rigidi controlli usualmente richiesti per materiali di uso strutturale, peraltro distribuito da numerosi produttori. È pertanto consigliabile l'adozione di coefficienti di sicurezza elevati ($2 \div 3$). In definitiva, appare logico considerare due differenti situazioni di progetto: nella progettazione del comportamento sismico dell'intero edificio, ove la presenza del silicone può essere favorevole, essa si può omettere, mentre la progettazione delle connessioni che

devono lavorare in campo elastico può essere svolta tenendo conto della presenza del silicone, sulla base del criterio di gerarchia delle resistenze. L'influenza delle sollecitazioni nei pannelli dovute al silicone può essere tenuta in conto per la progettazione del diaframma di piano.

5.2 CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI

La campagna sperimentale effettuata e precedentemente descritta sia per le prove locali su piccoli elementi in calcestruzzo con giunti siliconici, sia prove su sottosistema strutturale che hanno interessato un assieme di pannelli di tamponamento è utile in modo tale da studiare il comportamento meccanico dei giunti siliconici tra pannelli prefabbricati in calcestruzzo. I risultati mostrano un comportamento altamente flessibile con ampia capacità di deformazione. Il comportamento ciclico è caratterizzato da discreta stabilità fino al raggiungimento di una deformazione tagliante pari a $150\% \leq \gamma \leq 200\%$, dopodiché la perdita di forma della sezione di silicone per ingobbimento fuori piano causa degrado ciclico di rigidità e resistenza, con una marcata strizione (pinching). La rottura osservata avviene per contemporaneo distacco dal supporto e collasso in mezzeria. Si è osservato come i valori di rigidità siano poco elevati, così da poter essere trascurati ai fini della progettazione strutturale di un intero edificio o del singolo pannello. Si è però notato come la resistenza massima che il giunto può raggiungere, pari a circa 0,25 MPa di sforzo tagliante medio, ma possa altresì determinare un importante contributo per la progettazione del sistema di connessione del singolo pannello e del diaframma di piano. Per estendere i risultati ottenuti, si ritiene opportuno in futuro effettuare delle prove locali ad con velocità tali da simulare il reale comportamento durante l'azione sismica e comprendendo le modifiche ai parametri elastici ed a rottura qui identificati e studiando l'eventuale l'influenza della dissipazione viscosa del materiale in questo campo. Si intende inoltre effettuare delle prove su silicone sottoposto a severi cicli di invecchiamento, per estenderne lo studio al caso di giunti in opera da decenni.

BIBLIOGRAFIA

Behr RA (1998) Seismic performance of architectural glass in mid-rise curtain walls. *Journal of Architectural Engineering* 4(3):94-98

Biondini F, Dal Lago B, Lamperti M, Toniolo G (2014) Qualificazione sperimentale di materiali siliconici per giunti di pannelli prefabbricati. Giornate AICAP 2014 (Associazione Italiana Cemento Armato e Precompresso), Bergamo, Italy, May 22-24, 391-398 (in Italian)

Biondini F, Dal Lago B, Toniolo G (2013) Role of wall panel connections on the seismic performance of precast structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11:1061-1081. doi: 10.1007_s10518-012-9418-z

Biondini F, Dal Lago B, Toniolo G (2014) Experimental and numerical assessment of dissipative connections for precast structures with cladding panels. 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES), Istanbul, Turkey, August 25-39, pp. 12.

Biondini F, Dal Lago B, Toniolo G. (2012), Friction dissipative devices for cladding panels in precast buildings, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis, 15:9, 1319-1338.

Broker KA, Fisher S, Memari AM (2012) Seismic racking test evaluation of silicone used in a four-sided structural sealant glazed curtain wall system. *Journal of ASTM International* 9(3): 104-144

Carbary LD, Ryan MW (2004) Secondary drainage system for architectural panel systems. *ASTM Special Technical Publication* 1453:3-13

Colombo A, Negro P, Toniolo G (2014) The influence of claddings on the seismic response of precast structures: the Safecladding project. Proc. of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey, August 25-39, paper No. 1877

Colombo A, Toniolo G. (2012), Precast concrete structures: the lesson learnt from L'Aquila earthquake, Structural concrete, Vol. 13 n.2.

Dal Lago, B., Lamperti, M., Dal Lago, A. (2012), Studio sul comportamento bidirezionale di connessioni meccaniche scorrevoli pannello-telaio, XIX Conferenza CTE, Bologna.

Dal Lago B (2015) Seismic performance of precast structures with dissipative cladding panel connections. PhD Thesis dissertation, Politecnico di Milano

Ding S, Liu D (2005) Accelerated aging on sealants and a quantificational way to evaluate the durability. Journal of Testing and Evaluation, 34(2):1-4

Lacasse, M.A., Bryce, J.E., Margeson, J.C. (1995), Evaluation of cyclic fatigue as a mean of assessing the performance of construction joints, Science and Technology of Building Seals, Sealants, Glazing, and Waterproofing, ASTM STP 1243, Vol. 4, 49-64.

Meunier, L., Chagnon, G., Favier, D., Orgeas, L., Vacher, P. (2008), Mechanical experimental characterization and numerical modelling of an unfilled silicone rubber, Polymer testing, Vol. 29, 765-777.

Negro P, Lamperti Tornaghi M (2016) Seismic response of precast structures with vertical cladding panels: the SAFECLADDING experimental campaign. Engineering Structures (submitted) Roland CM (2006) Mechanical behaviour of rubber at high strain rates. Rubber Chemistry and Technology, 79:429-459

Parbhoo, B.; O'Hare, L. -A.; Leadley, S. R. Fundamental aspects of adhesion technology in silicones (Chapter 14). In Adhesion Science and Engineering, Volume

II, Surfaces, Chemistry & Applications, M. Chaudhury and A.V. Pocius, Eds., Elsevier: Amsterdam, 2002; 677-711.

Roland, C.M. (2006), Mechanical behaviour of rubber at high strain rates, Rubber chemistry and technology, Vol. 79, 429-459.

UNI EN ISO 11600:2011; Edilizia - Prodotti per giunti - Classificazione e requisiti per i sigillanti, 08 settembre 2011.

Wolf, A. T. Durability of silicone sealants, RILEM State-of-the-Art Publications: 92220 Bagnaux, 2000; 253-273.