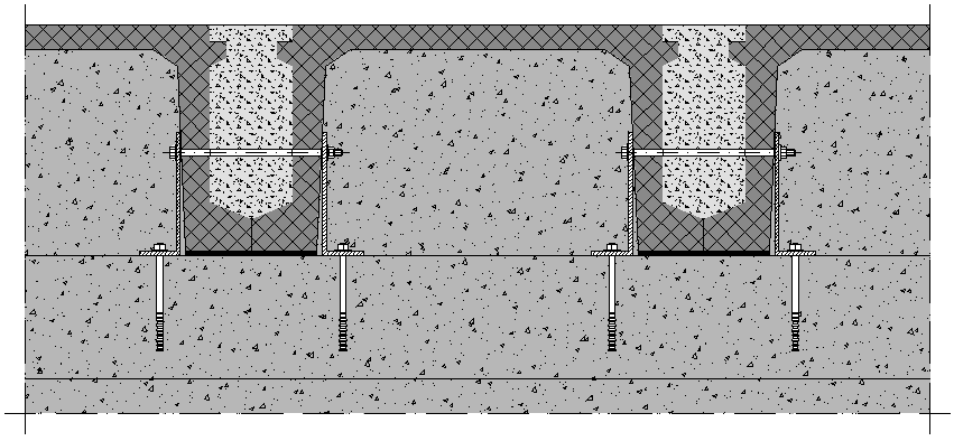
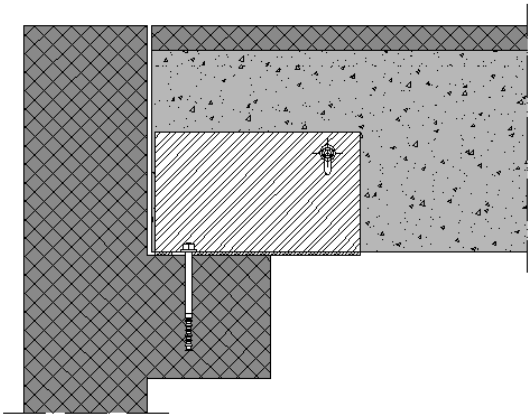
Studio di una tipologia di collegamento tegolo-trave contro la perdita di appoggio

aprile 2017

Alberto Roncaglia - ingegnere, ing.albertoroncaglia@gmail.com
Paolo Varagnolo - ingegnere, info@studioingegneriavaragnolo.com





Sommario

1 Premessa 3
2 Tipologie di strutture industriali 3
3 Strutture industriali prefabbricate 4
4 Criticità delle strutture industriali prefabbricate 4
5 Perdita d'appoggio dei tegoli di copertura 4
6 Geometria del collegamento 6
6.1 Barra passante sul tegolo 6
6.2 Profilo metallico di collegamento 8
6.3 Tassello sulla trave 8
7 Stato di sollecitazione del collegamento 9
7.1 Forza agente sulla barra passante 9
7.2 Tensione sul calcestruzzo dell'anima del tegolo 11
7.3 Tensione sulle armature longitudinali del tegolo 12
7.4 Forze agenti sul tassello della trave 12
7.5 Tensioni agenti sul profilo di collegamento 13
8 Considerazioni relative alla forza agente sulla barra passante 16
9 Esempio di calcolo delle forze agenti sul tassello 18
10 Bibliografia 20

1 Premessa

I recenti eventi sismici[1] avvenuti in Italia hanno più volte dimostrato la fragilità e la vulnerabilità del patrimonio edilizio italiano. I danni registrati ai beni immobili sono stati ingenti e, a seconda della zona in cui si è verificato l'evento, sono stati colpite sia costruzioni di civile abitazione sia edifici ad uso industriale.

Nel presente studio viene discusso ed approfondito il problema della perdita di appoggio degli elementi prefabbricati, con riferimento al collegamento rappresentato nella seguente figura, tratta da [2].

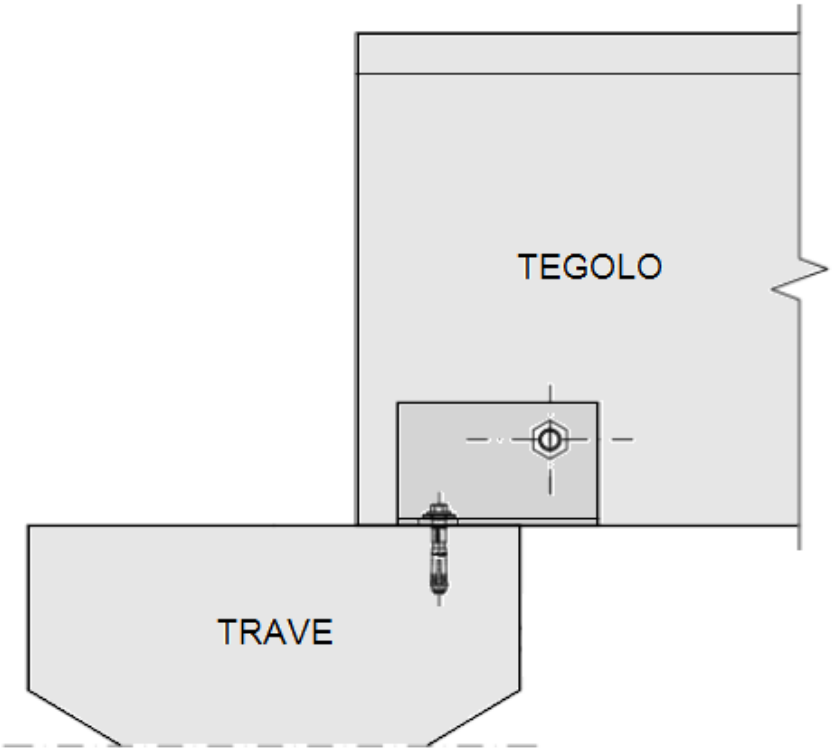


Figura 1

2 Tipologie di strutture industriali

Le strutture industriali solitamente hanno struttura metallica o in calcestruzzo armato (ordinario e/o precompresso): queste ultime si dividono generalmente in costruzioni gettate in opera e costruzioni prefabbricate.

Nei capannoni gettati in opera, gli elementi portanti sono realizzati direttamente sul posto e le strutture sono normalmente continue nelle zone di collegamento (le armature di due elementi contigui presentano cioè zone di sovrapposizione): tali collegamenti sono riconducibili allo schema di incastro.

Per contro, nei capannoni prefabbricati o in quelli misti (ossia in parte gettati in opera e in parte prefabbricati), il collegamento fra elementi è generalmente realizzato con unioni riconducibili allo schema di carrello o di cerniera.

Il vincolo alla base delle strutture invece, in entrambi i casi, è riconducibile allo schema di incastro (anche cedevole) [1].

---

[1] Elenco dei principali eventi sismici avvenuti in Italia negli ultimi anni

- Molise, 31 ottobre 2002, grado 5.8 della scala Richter
- Abruzzo, 06 aprile 2009, grado 5.9 della scala Richter
- Emilia Romagna, 20 maggio 2012, grado 5.9 della scala Richter
- Lazio, 24 agosto 2016, grado 6.2 della scala Richter
- Marche, 26 ottobre 2016, grado 5.9 della scala Richter
- Umbria, 30 ottobre 2016, grado 6.1 della scala Richter

3 Strutture industriali prefabbricate

Gli eventi sismici accaduti, e specialmente quello avvenuto in Emilia Romagna nel 2012, hanno evidenziato come le strutture industriali di tipo prefabbricato o di tipo misto costruite prima dell'introduzione delle Norme Tecniche per le Costruzioni attualmente vigenti [3] siano nella maggior parte dei casi totalmente inadeguate a sopportare le forze orizzontali indotte dall'azione sismica.

La progettazione di queste strutture infatti è spesso avvenuta considerando quasi esclusivamente carichi verticali, in quanto prima dell'uscita del OPCM 3274/2003 [4] molte zone d'Italia erano classificate come non sismiche.

Gli unici carichi orizzontali di cui si teneva conto in fase di progettazione erano l'azione del vento, il 2% dei carichi verticali e le eventuali azioni orizzontali (frenatura e serpeggiamento) indotte dai carriponte sulle vie di corsa. Il trasferimento di queste azioni orizzontali era spesso affidato esclusivamente all'attrito tra le varie parti, in quanto i collegamenti non erano esplicitamente richiesti dalle normative antecedenti il D.M. 14/01/2008 [3].

D'altra parte le azioni sismiche sono spesso molto più gravose delle sollecitazioni orizzontali precedentemente descritte e quindi molti capannoni prefabbricati sono sismicamente vulnerabili.

4 Criticità delle strutture industriali prefabbricate

A causa della filosofia di progettazione utilizzata prima dell'entrata in vigore delle nuove norme tecniche per le costruzioni del 2008, gli edifici prefabbricati esistenti mostrano spesso diverse carenze nei confronti delle sollecitazioni orizzontali sismiche. Si registrano frequentemente mancanze o inadeguatezze nei seguenti ambiti:

- collegamenti tra elementi strutturali orizzontali e verticali;
- collegamenti tra distinti elementi strutturali orizzontali;
- collegamenti tra gli elementi di tamponatura e le strutture principali;
- collegamenti tra gli elementi non strutturali di copertura e le strutture principali.

Queste carenze danno luogo a delle labilità intrinseche della struttura, in quanto spesso non sono previsti specifici sistemi di ritegno: la stabilità dei collegamenti è affidata esclusivamente all'attrito, che secondo la normativa vigente [3] deve essere trascurato.

I meccanismi di collasso che si generano a seguito di queste carenze sono:

- perdita d'appoggio delle membrature;
- perdita di equilibrio/ribaltamento delle membrature.

5 Perdita d'appoggio dei tegoli di copertura

Come anticipato nella premessa, in questa sede si indaga il problema della perdita d'appoggio dei tegoli in calcestruzzo armato precompresso, che nella maggior parte dei casi costituiscono la copertura degli edifici industriali.

Essi possono essere di varie forme ma, per la loro versatilità, spesso hanno forma a "pi greco" oppure a "omega". Tali forme sono illustrate nell'immagine successiva.

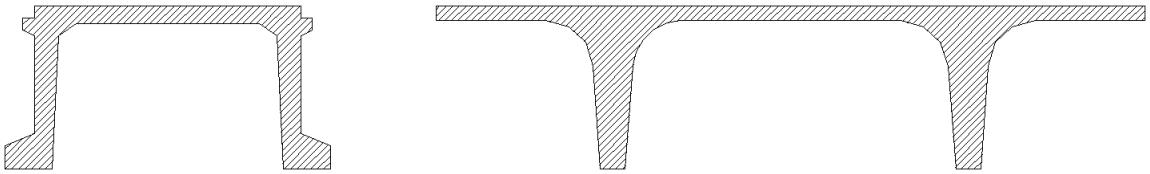


Figura 2

Esistono vari metodi per impedire lo scivolamento e la conseguente perdita d'appoggio dei tegoli, molti dei quali suggeriti dal citato documento [2].

Viene di seguito analizzato uno di questi collegamenti, rappresentato nella figura 1 e nelle seguenti figure.

Questo tipo di vincolo è realizzato per mezzo di una barra in acciaio passante sulle anime verticali del tegolo la quale, attraverso un profilo metallico ad L, è collegata ad un tassello posto sulla trave di sostegno delle strutture di copertura.

Nelle successive immagini sono mostrate alcune viste più dettagliate riguardanti un collegamento di questo tipo.

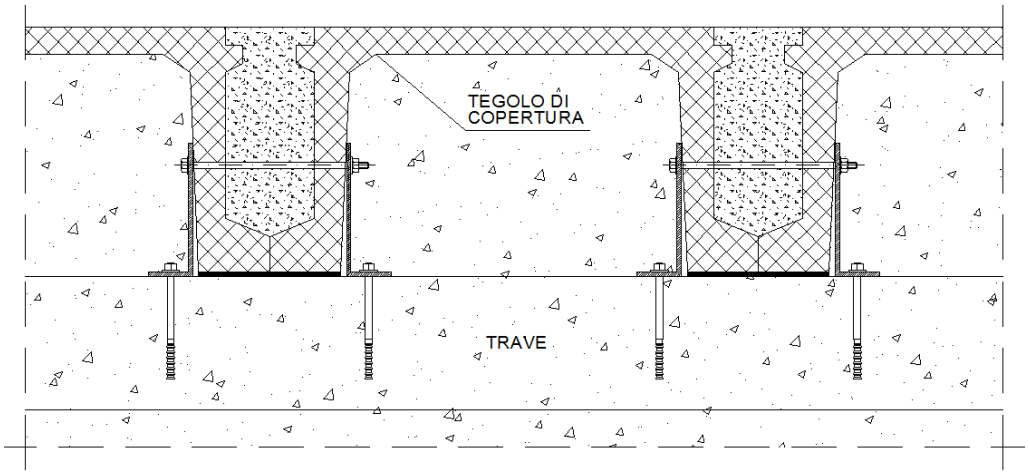


Figura 3

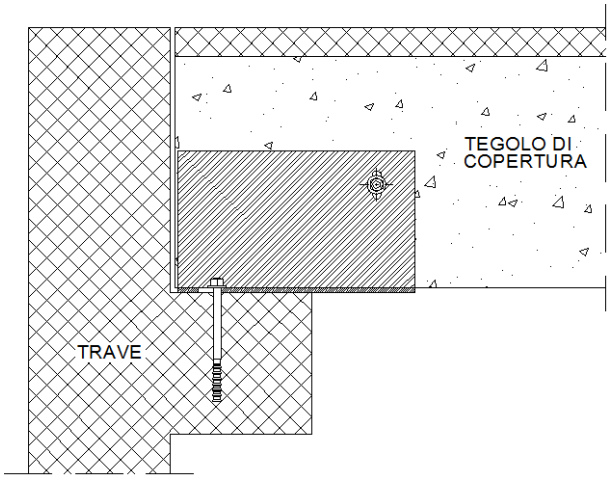


Figura 4

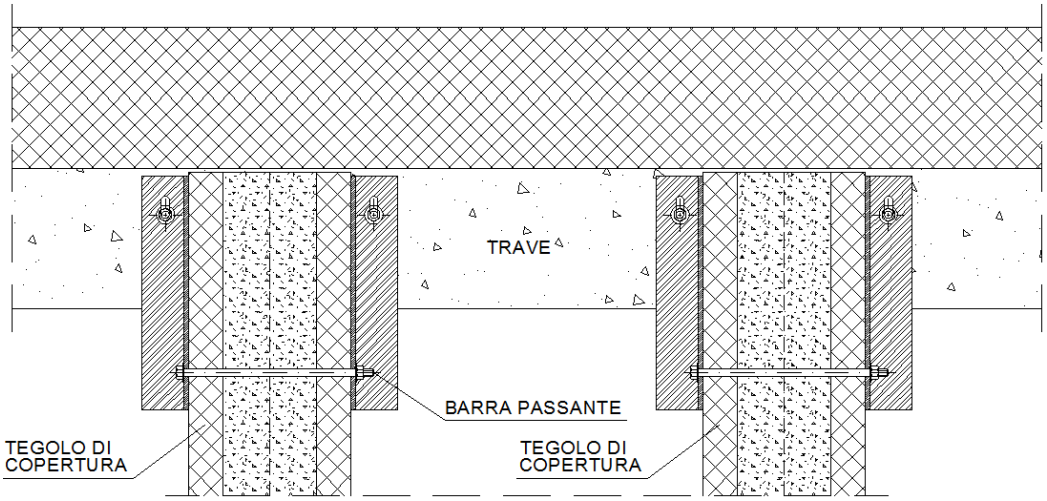


Figura 5

Un ritegno di questo tipo è utile esclusivamente ad evitare la perdita d'appoggio del tegolo. Nel caso sia necessario impedire anche il ribaltamento in senso trasversale, come accade per le travi a forma di "Y" o di "I", si deve ricorrere ad un collegamento diverso da quello rappresentato, per esempio utilizzando delle funi di acciaio.

6 Geometria del collegamento

Si descrivono in questa sezione alcune prescrizioni da osservare riguardo la geometria del collegamento. I tre elementi costituenti, cioè barre passanti, profilo a L di collegamento e tasselli sulla trave, devono infatti essere posti in posizioni adeguate in modo da evitare l'insorgere di tensioni e forze non previste (e non desiderate).

6.1 Barra passante sul tegolo

L'elemento che connette il tegolo al profilo di collegamento a L in acciaio è composto da una barra filettata, passante sulle anime dei tegoli.

Nel caso le anime verticali di due tegoli vicini siano adiacenti, o se sia presente del materiale sufficientemente rigido di sigillatura, una sola barra può passare attraverso entrambe le anime. Se invece le anime si trovano ad una certa distanza (come nel caso di tegoli a "pi greco") è conveniente che la barra attraversi solo una anima alla volta, per evitare l'insorgere di sollecitazioni indesiderate.

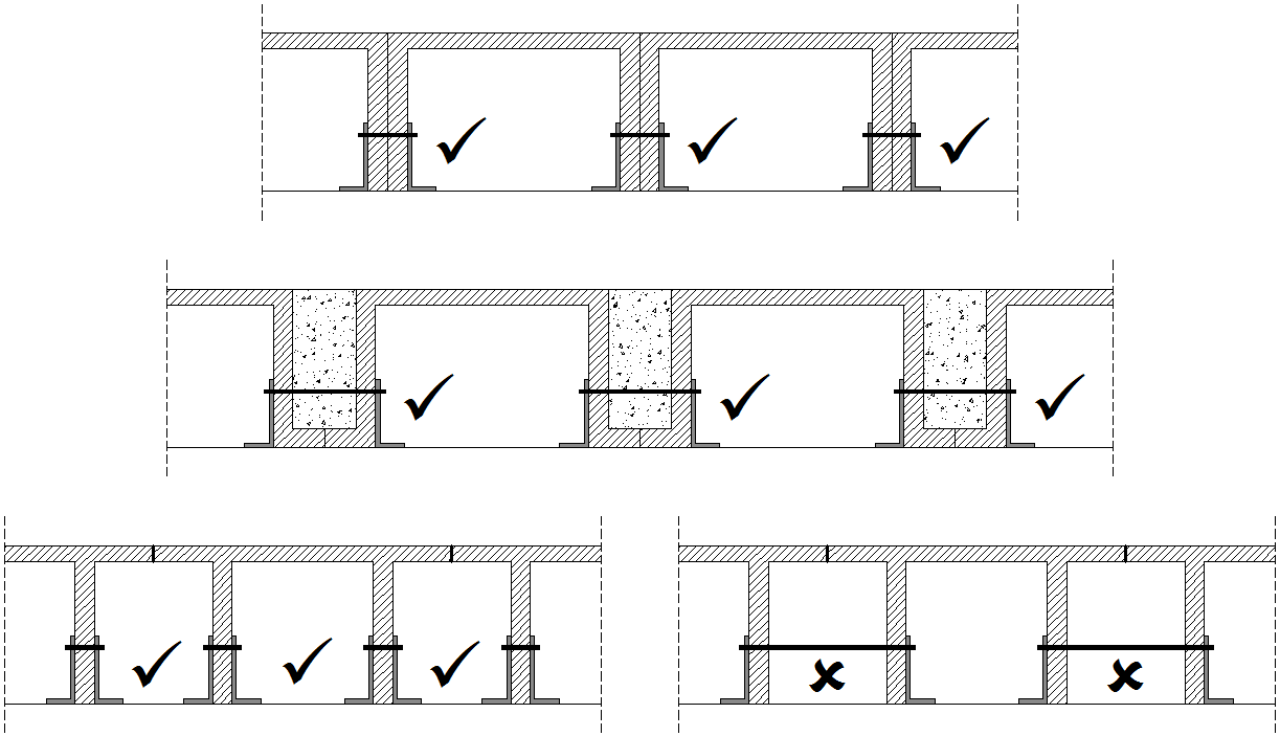


Figura 6

In questo tipo di intervento, e in generale anche in tutti gli altri che si possono attuare per il miglioramento o l'adeguamento sismico di un edificio, deve essere preservato lo schema statico originale delle strutture previsto in fase di progettazione. Alle estremità delle travi, progettate in semplice appoggio, non devono pertanto nascere significative sollecitazioni di tipo flessionale.

Come si può vedere dalla seguente immagine, la posizione della barra passante influenza l'entità del momento di incastro che può nascere alle estremità. Una rotazione dell'estremità della trave dovuta al carico variabile, provoca lo spostamento dei perni rispetto all'angolare.

Se i fori sull'angolare sono asolati e le barre sono in posizione centrale all'interno del foro, la componente verticale dello spostamento non induce alcuna sollecitazione sulla trave.

La componente orizzontale dello spostamento tende invece a spingere la barra contro l'angolare creando un (piccolo) incastro. Questo effetto è tanto maggiore quanto più alta è la barra rispetto all'appoggio. Si dovrà dunque posizionare la barra più in basso possibile, compatibilmente con la posizione delle armature come mostrato nella figura 9.

Il fatto invece che la barra sia posizionata entro l'appoggio, in corrispondenza dello stesso o fuori dall'appoggio influenza solo il verso dello spostamento verticale della barra rispetto al foro asolato.

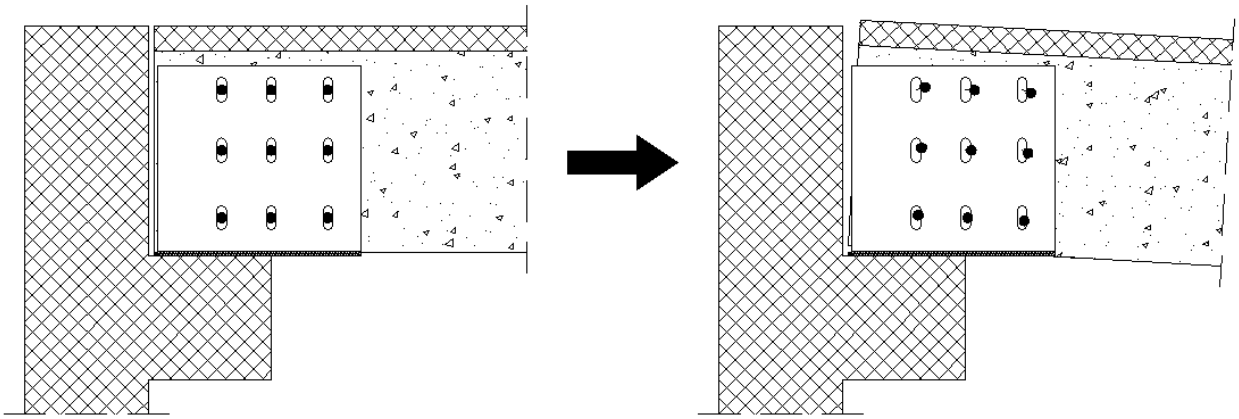


Figura 7

Al momento dell'installazione si deve cercare di posizionare la barra passante nella posizione che consenta la maggiore possibilità di movimento nella direzione verticale: all'estremità superiore dell'asolatura per barra esterna all'appoggio, al centro dell'asolatura per barra in corrispondenza dell'appoggio, e infine all'estremità inferiore dell'asolatura per barra interna all'appoggio.

La posizione della barra esterna all'appoggio è d'altra parte preferibile in quanto consente una migliore diffusione delle tensioni all'interno della trave, nel momento in cui il collegamento viene sollecitato. Se la barra fosse troppo vicina alla parte terminale del tegolo, infatti, il calcestruzzo tra la barra e l'estremità potrebbe essere espulso e si avrebbe quindi la rottura del tegolo. Una distanza adeguata dalla sezione terminale assicura una buona distribuzione delle tensioni su tutta la sezione, garantendo l'efficacia del ritegno.

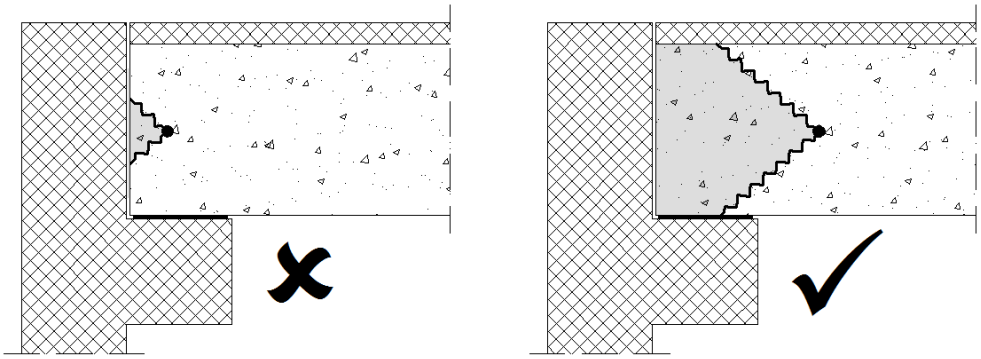


Figura 8

Nella figura seguente si vede che la posizione verticale della barra non può essere troppo bassa, perché si deve evitare di intercettare i trefoli di armatura del tegolo.

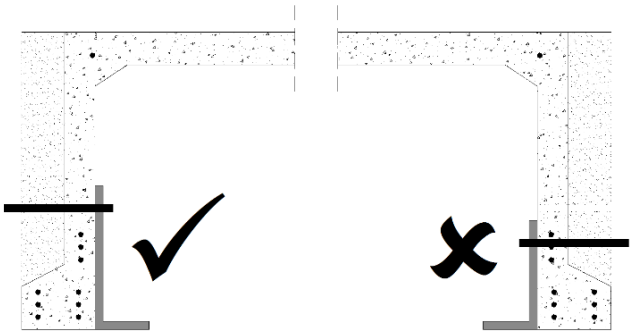


Figura 9

6.2 Profilo metallico di collegamento

Il profilo metallico di collegamento ha il compito di trasferire la sollecitazione orizzontale dal tegolo al tassello vincolato alla trave di appoggio tramite la barra passante. La successiva figura illustra un esempio di profilo metallico di collegamento.

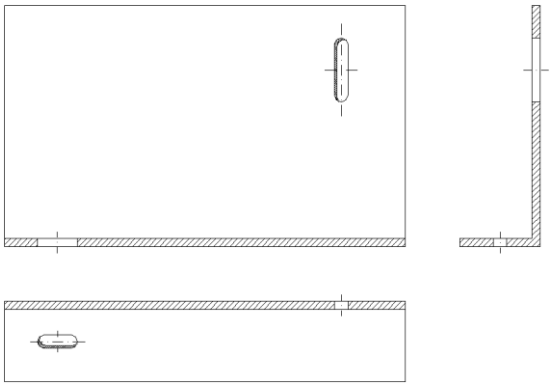


Figura 10

Le dimensioni dell'angolare sono funzione della posizione della barra passante e del tassello sulla trave, mentre lo spessore viene individuato in funzione dell'intensità delle forze che lo sollecitano.

Una caratteristica fondamentale di questo profilo è l'asolatura di entrambi i fori presenti. L'asolatura del foro sull'ala verticale serve a limitare il contrasto alla rotazione indotta dai carichi variabili, come descritto nel precedente § 6.1. È inoltre importante non provvedere ad alcuna stuccatura o riempimento di questo foro asolato.

L'asolatura del foro sull'ala orizzontale ha invece la funzione di garantire un certo margine sulla posizione del tassello, dando la possibilità di evitare un'eventuale barra di armatura longitudinale. Una volta messo in opera il tassello è però importante, diversamente da quanto descritto per il foro verticale, provvedere alla stuccatura di questo foro orizzontale (esistono set di "riempimenti sismici" adatti allo scopo) in modo da evitare fenomeni impulsivi o movimenti relativi indesiderati.

6.3 Tassello sulla trave

Il tassello sulla trave di appoggio del tegolo è l'elemento che si occupa del trasferimento alla trave delle sollecitazioni provenienti dal tegolo. La sua posizione deve essere sicuramente interna rispetto alle armature perimetrali dell'appoggio, ad una distanza dal bordo determinata in funzione dello stato di sollecitazione del collegamento, del diametro del tassello e della geometria dell'appoggio.

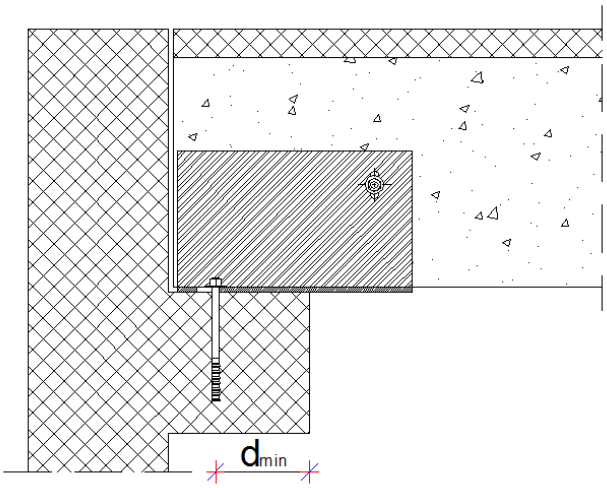


Figura 11

La distanza minima d_{min} è facilmente calcolabile tenendo conto dei possibili meccanismi di rottura del calcestruzzo tra il tassello e il bordo dell'appoggio. È consigliato l'uso di tasselli chimici (con resine non autoespandenti) in quanto non inducono tensioni nel supporto.

7 Stato di sollecitazione del collegamento

Si procede ad indagare la distribuzione delle forze all'interno degli elementi che costituiscono il collegamento. L'unica forza sollecitante esterna al collegamento, che è quella che può provocare la perdita d'appoggio del tegolo, è la forza orizzontale che si sviluppa in seguito all'applicazione dell'accelerazione sismica alla struttura. Tale forza totale, denominata nel seguito F_H, agisce nel baricentro G della sezione trasversale del tegolo (oppure, nel caso sia presente un riempimento di sigillatura tra i tegoli o ancora se sia presente un qualche tipo di rivestimento sopra il tegolo stesso, nel baricentro della sezione comprensiva di tali elementi).

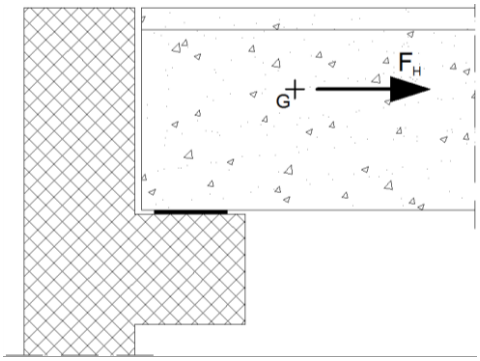


Figura 12

L'intensità della forza F_H deve essere determinata, numericamente o analiticamente, tenendo conto della geometria delle strutture, della loro massa e della loro quota rispetto allo zero sismico.

Il collegamento considerato in questo studio è bilaterale ma non ha un comportamento simmetrico: tutte le considerazioni e le formule presentate sono riferite al verso della forza che tende a produrre la perdita di appoggio, come indicato nelle figure.

Nel seguito si considera, a favore di sicurezza, che tutta l'azione sismica agente sul tegolo sia assorbita solamente da una delle due barre presenti alle estremità del tegolo.

Il peso proprio del tegolo e quello dei permanenti portati di copertura non vengono considerati per il dimensionamento: tali carichi infatti agiscono in direzione verticale e darebbero un contributo benefico, sviluppando una forza di attrito in corrispondenza dell'appoggio del tegolo che contrasterebbe lo scivolamento. La normativa vigente però vieta espressamente di considerare tale azione, prescrivendo al § 7.2.1 che *non è mai consentito fare affidamento sull'attrito conseguente ai carichi gravitazionali per assicurare la trasmissione di forze orizzontali tra parti della struttura, salvo per dispositivi espressamente progettati per tale scopo*.

7.1 Forza agente sulla barra passante

La barra passante sull'anima del tegolo è, nell'ordine, il primo elemento resistente del collegamento. Se installata correttamente, e cioè con le ali del profilo di collegamento a contatto con il calcestruzzo, la barra è sollecitata esclusivamente a taglio.

Si illustra preliminarmente lo schema statico adottato per l'analisi di questa situazione.

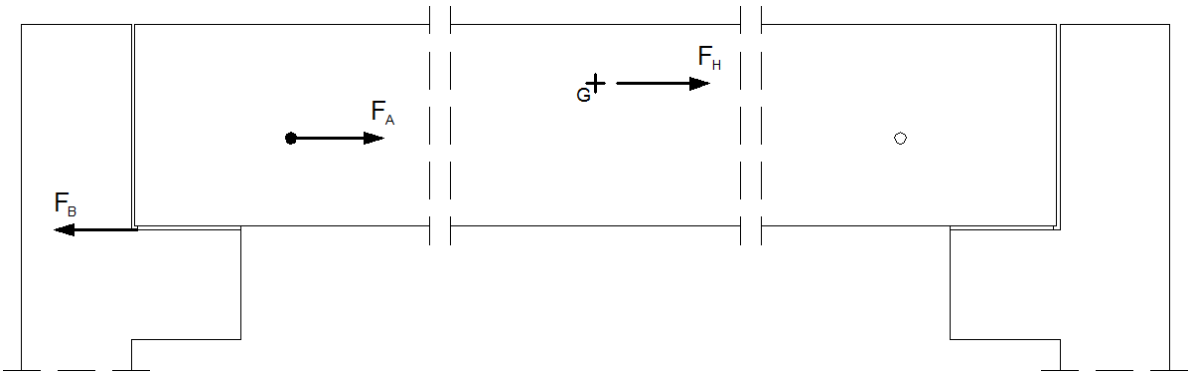


Figura 13

La forza F_A rappresenta la sollecitazione di taglio per la barra passante, mentre la forza F_B rappresenta l'eventuale attrito che si sviluppa tra il tegolo e il suo appoggio.

Se la forza di attrito F_B è maggiore o uguale alla forza orizzontale F_H, il perno non risulta sollecitato e la forza F_A è nulla.

Poiché però le Norme Tecniche per le Costruzioni prescrivono, come citato in precedenza, che non è possibile fare affidamento alle forze di attrito, la forza sulla barra risulta:

$$F_A = F_H$$

La forza sollecitante F_A va eventualmente divisa per il numero di superfici di taglio che interessano la barra passante.

Il risultato trovato apparirebbe immediato se le forze F_A e F_H agissero entrambe lungo la stessa direzione orizzontale: esse invece presentano delle eccentricità (denominate d ed e) che generano un momento. Questo momento però non influenza lo stato di sollecitazione del collegamento, in quanto si trasforma in una coppia di forze verticali in corrispondenza degli appoggi del tegolo come indicato in figura.

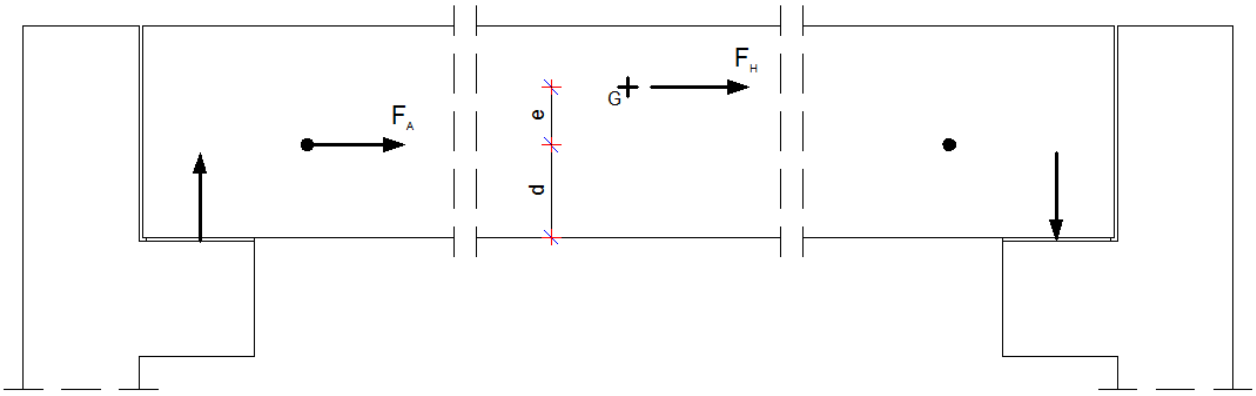


Figura 14

Queste due forze, che si originano per effetto delle eccentricità, sono generalmente di intensità molto bassa rispetto alle reazioni verticali dovute al peso del tegolo: infatti l'eccentricità complessiva di F_H è molto piccola rispetto alla luce tra gli appoggi ed inoltre la forza F_H è sempre una frazione del peso complessivo del tegolo.

A rigore è necessario comunque verificare che i carichi permanenti siano in grado di bilanciare il momento dovuto all'eccentricità, in corrispondenza di una delle estremità della trave; all'altra estremità si deve poi verificare la resistenza dell'appoggio considerando l'aumento della reazione verticale per effetto della coppia. Nel § 8 vengono presentati dei calcoli a dimostrazione delle considerazioni appena svolte.

In aggiunta alla sollecitazione tagliante F_A la barra passante è soggetta anche ad uno sforzo di trazione N_B illustrato schematicamente nella successiva figura, dovuto all'eccentricità c della forza F_A rispetto al tassello di ancoraggio.

Nello schema presentato, il vincolo posto nella parte superiore sinistra del profilo rappresenta il fatto che in quel punto la traslazione è impedita dalla presenza del tegolo.

Poiché si tratta di un sistema iperstatico la forza N_B dipende, oltre che dalla geometria del collegamento, anche dalla rigidezza del profilo e da quella del perno passante. Utilizzando dei modelli numerici si vede che al diminuire della forza V_T sul tassello la forza N_B aumenta, come si può vedere anche nell'esempio di calcolo presentato nel § 9.

Ipotizzando che la forza V_T sia nulla si ottiene pertanto il massimo valore di N_B, che può essere utilizzato a favore della sicurezza. Con questa ipotesi il sistema diventa isostatico e con un semplice equilibrio alla rotazione si ricava la relazione:

$$N_B = \frac{F_A \cdot c}{f}$$

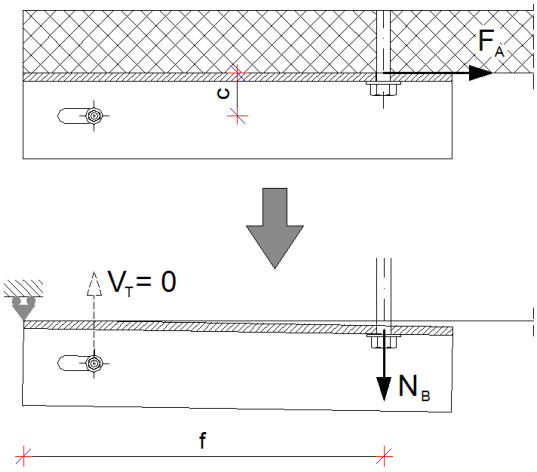
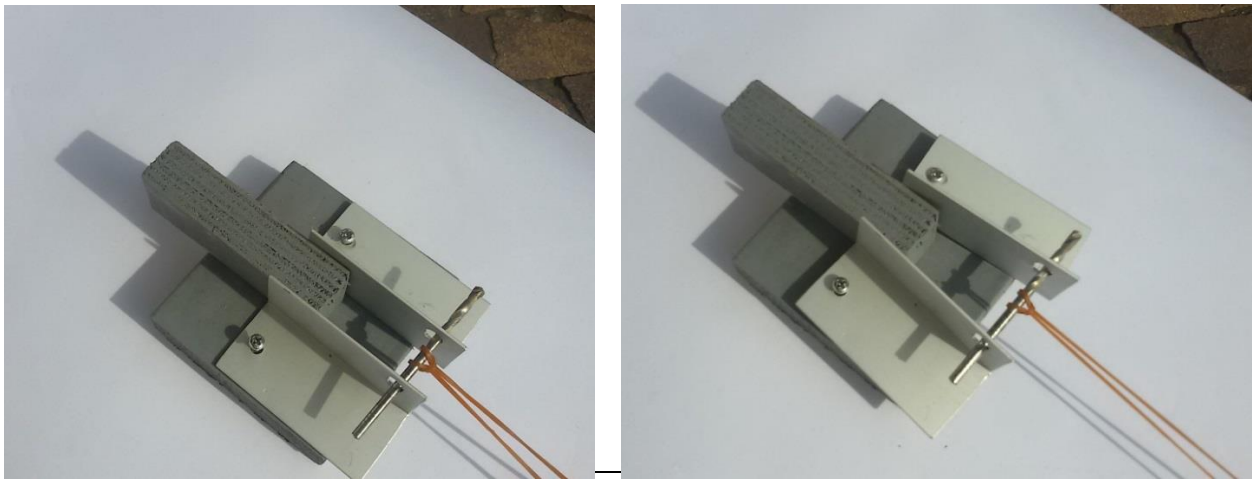


Figura 15



Modellino degli angolari in posizione di riposo

Applicazione di una forza orizzontale sulla barra

Figura 16

Nella precedente figura sono illustrate due foto di un modellino degli angolari di collegamento tegolo-trave. Il tegolo non è presente, è stato inserito solamente uno spessore nella parte posteriore degli angolari per simulare il vincolo fornito dell'anima del tegolo. Nella seconda immagine è evidente il cinematismo conseguente all'applicazione di una forza orizzontale sulla barra passante. Gli angolari tendono ad allontanarsi fra loro e questo movimento deve essere contrastato con la trazione N_B sulla barra.

7.2 Tensione sul calcestruzzo dell'anima del tegolo

Per effetto della resistenza a taglio con cui la barra si oppone all'azione della forza orizzontale F_H, all'interno dell'anima del tegolo si sviluppa una zona in cui agiscono delle sollecitazioni di compressione. Si considera che la barra sia rigida, in modo da trasmettere una distribuzione costante delle tensioni, come indicato in figura.

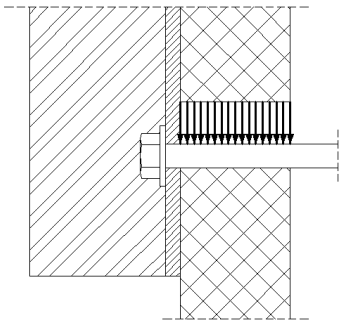


Figura 17

Denominati ϕ il diametro della barra passante e s lo spessore dell'anima del tegolo, la tensione σ_c agente sul calcestruzzo è pari a:

$$\sigma_c = \frac{F_A}{\phi \cdot s}$$

Tale tensione deve essere confrontata con quella resistente di compressione del calcestruzzo che costituisce il tegolo.

7.3 Tensione sulle armature longitudinali del tegolo

Se la barra è posta in posizione adeguatamente lontana dalla sezione terminale del tegolo, come indicato nella figura 8, viene assicurata la distribuzione delle tensioni su tutta la sezione di calcestruzzo. Tali tensioni devono essere assorbite dalle armature presenti all'interno del tegolo, che saranno soggette ad un incremento di tensione pari a:

$$\Delta\sigma_s = \frac{F_A}{A_s}$$

Dove A_s è l'area delle armature all'interno della sezione. Si dovrà quindi verificare se l'armatura del tegolo sia sufficiente.

7.4 Forze agenti sul tassello della trave

La forza orizzontale F_A si trasmette al tassello di ancoraggio sul tegolo attraverso il profilo angolare, le cui sollecitazioni saranno discusse nel seguito. Il primo schema utilizzato per il calcolo delle sollecitazioni sul tassello è rappresentato in figura.

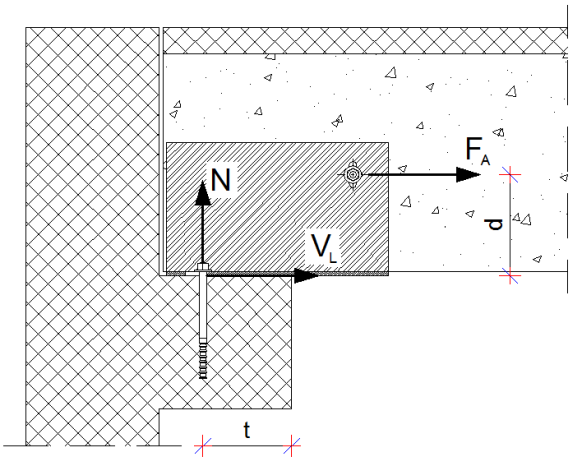


Figura 18

Il tassello è sollecitato da un'azione tagliante V_L parallela all'asse del tegolo e da una di trazione N. Successivamente per il tassello verrà studiata anche la sollecitazione V_T agente in direzione trasversale.

La forza F_A da utilizzarsi è quella agente sulla barra passante, sempre divisa per il numero di superfici di taglio coinvolte.

Imponendo l'equilibrio alla traslazione e alla rotazione si ricavano le due forze:

$$V_L = F_A$$

$$N = \frac{F_A \cdot d}{t}$$

Anche per la trazione N sul tassello vale quanto detto relativamente alle forze di incastro che possono instaurarsi all'estremità del tegolo: più in alto viene posta la barra passante, più aumenta il valore della trazione sul tassello.

Si osserva che l'equilibrio alla rotazione fa nascere una coppia di intensità $N \cdot t$ composta dalla trazione sul tassello e dalla compressione sul bordo dell'appoggio in calcestruzzo. La forza N deve essere utilizzata anche per verificare la compressione sul calcestruzzo della trave di appoggio.

Nella figura 16 si vede il cinematismo che induce la forza N sul tassello. Non è molto evidente, però si può osservare che nella posizione di riposo le teste delle viti del modellino non premono sugli angolari e sono staccate dagli stessi; nella configurazione deformata gli angolari sono invece a contatto con le teste delle viti.

Si espone ora lo schema statico impiegato per il calcolo dell'altra sollecitazione di taglio V_T sul tassello, agente in direzione trasversale rispetto all'asse del tegolo. L'immagine mostra il profilo di collegamento visto in pianta.

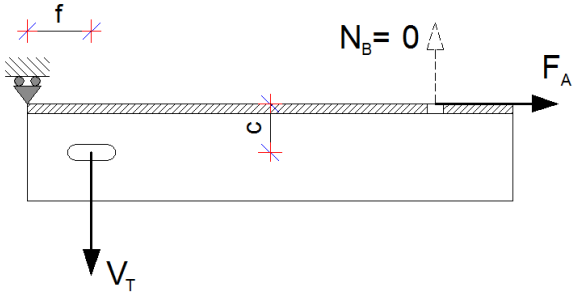


Figura 19

Anche in questo caso Il vincolo posto nella parte superiore sinistra del profilo rappresenta il fatto che in quel punto la traslazione è impedita dalla presenza del tegolo.

Poiché si tratta di un sistema iperstatico la forza V_T dipende, oltre che dalla geometria del collegamento, anche dalla rigidezza del profilo e da quella del perno passante. Si dimostra che la situazione più sfavorevole si ottiene considerando nulla la rigidezza della barra passante, come si può vedere anche nell'esempio di calcolo presentato nel § 9.

Ipotizzando che la forza N_B sulla barra passante sia nulla, si ottiene pertanto il massimo valore di V_T, che può essere utilizzato a favore della sicurezza. Con questa ipotesi il sistema diventa isostatico e con un semplice equilibrio alla rotazione si ricava la relazione:

$$V_T = \frac{F_A \cdot c}{f}$$

Il valore così calcolato è approssimato a favore della sicurezza, in quanto al crescere della rigidezza della barra passante la forza V_T cala di intensità.

Anche per questa forza si osserva che l'equilibrio alla rotazione fa nascere una coppia di intensità $V_T \cdot f$ composta dal taglio sul tassello e dalla compressione sull'anima del tegolo, dove nello schema precedente è stato posto un vincolo alla traslazione. La forza V_T deve essere utilizzata anche per verificare la compressione sul calcestruzzo del tegolo.

La verifica del tassello, usualmente condotta attraverso software dedicati, deve essere eseguita utilizzando le forze N, V_L, e V_T precedentemente calcolate.

Particolare importanza rivestono la distanza del tassello dal bordo di calcestruzzo e lo spessore del supporto.

7.5 Tensioni agenti sul profilo di collegamento

L'ultimo elemento oggetto di indagine è il profilo di collegamento: esso connette i due elementi finora descritti: la barra passante ed il tassello.

L'angolare di collegamento è soggetto ad un sistema di sollecitazioni di flessione, taglio e trazione, in funzione della geometria e delle rigidezze dei vari elementi. La complessità geometrica impedisce di ricavare delle espressioni semplificate per calcolare i parametri di sollecitazione, e quindi per una rigorosa verifica sarebbe necessario ricorrere ad un modello agli elementi finiti.

È però possibile fare alcune considerazioni che consentono di evitare le verifiche più complesse.

Alcune simulazioni numeriche effettuate consentono di stabilire che la verifica più gravosa per l'angolare risulta essere quella a flessione; d'altra parte, se il profilo non resiste alle sollecitazioni di flessione derivanti dall'applicazione della forza sismica attraverso la barra passante, plasticizza e tende ad assumere una configurazione rettilinea fra la barra passante ed il tassello di ancoraggio. Questo comportamento implica anche una dissipazione di energia.

Nella figura seguente è rappresentato uno degli angolari, sul quale è tracciata la minima lunghezza della spezzata $\ell_1+\ell_2$ fra i punti di ancoraggio del tassello (punto A) e di ancoraggio della barra passante (punto B). Se il punto B trasla verso B' per effetto della forza F_A e l'angolare si plasticizza non essendo in grado di resistere a flessione, lo spostamento δx si arresta quando la distanza fra i punti A e B' diventa pari al segmento rettilineo di lunghezza $\ell_1+\ell_2$.

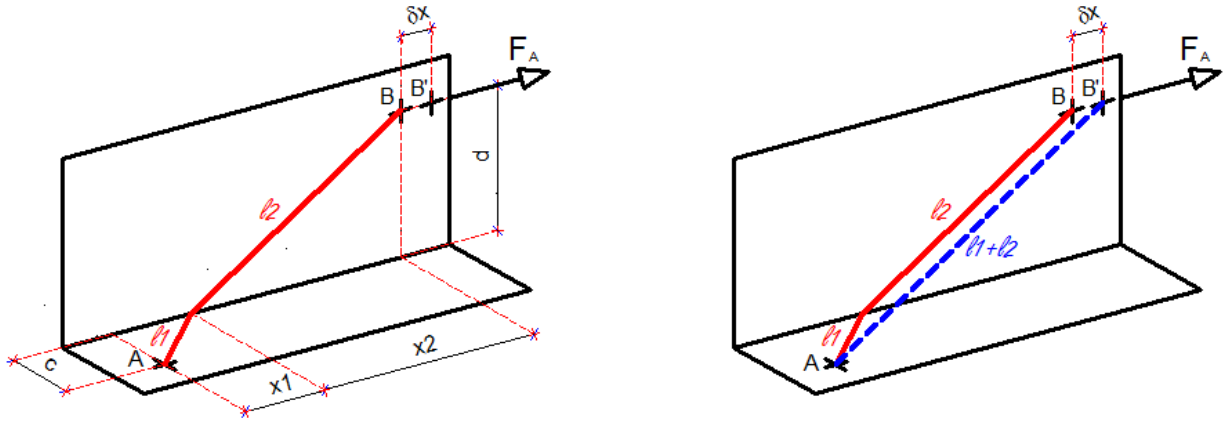


Figura 20

La rottura dell'angolare è pertanto governata dalla resistenza del piatto che costituisce l'angolare, in corrispondenza dei fori.

Quanto descritto è confermato da una prova sperimentale condotta su un modellino fisico, come si può vedere nelle figure seguenti. Nelle immagini da 1 a 3 lo spostamento aumenta finché l'angolare si dispone in modo rettilineo fra i punti A e B. Aumentando ancora lo spostamento si provoca la rottura in corrispondenza di uno dei fori.

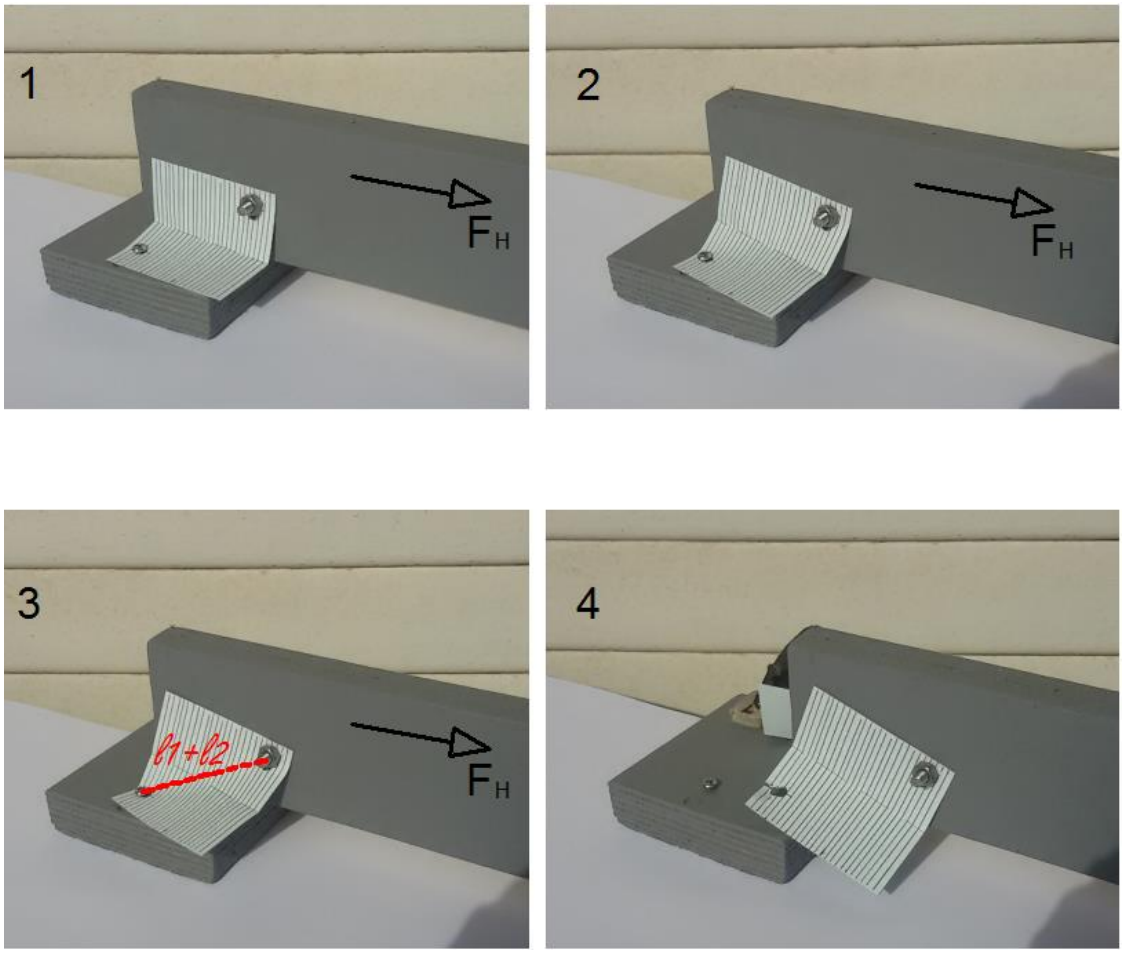


Figura 21

Alla luce di quanto esposto, le verifiche del profilo di collegamento si riducono alle seguenti:

- rifollamento in corrispondenza del foro relativo alla barra passante sull'anima del tegolo;
- rifollamento in corrispondenza del foro relativo al tassello sulla trave di appoggio;
- punzonamento in corrispondenza del foro relativo al tassello sulla trave di appoggio.

Le verifiche di resistenza vanno condotte utilizzando i valori delle forze calcolati nei precedenti paragrafi.

Resta un aspetto da approfondire: poiché questi dispositivi vengono dimensionati per impedire la perdita di appoggio dei tegoli, si deve controllare che la loro deformazione non sia eccessiva, tale da rendere inutile la loro posa in opera.

Per controllare questo aspetto sono stati calcolati i massimi spostamenti orizzontali δx considerando diverse geometrie dell'angolare, ed i risultati sono riportati nella figura seguente, nella quale le dimensioni sono in mm. La distanza c del tassello dall'ala verticale dell'angolare è stata considerata pari a 50 e 100 mm; l'altezza d della barra passante è stata considerata pari a 100, 200 e 300 mm; la distanza orizzontale $x1+x2$ dei punti A e B è stata considerata pari a 200, 400 e 500 mm.

Gli spostamenti maggiori si ottengono quando c è pari a 100 mm: d'altra parte, come si è visto nei precedenti § 7.1 e § 7.4, all'aumentare della distanza c aumentano anche le forze N_B sulla barra passante e V_T sul tassello. Considerando allora tutte le controindicazioni legate ad una posizione del tassello lontana dal tegolo, risulta decisamente consigliabile mantenere compatto l'angolare, posizionando il tassello il più vicino possibile al tegolo.

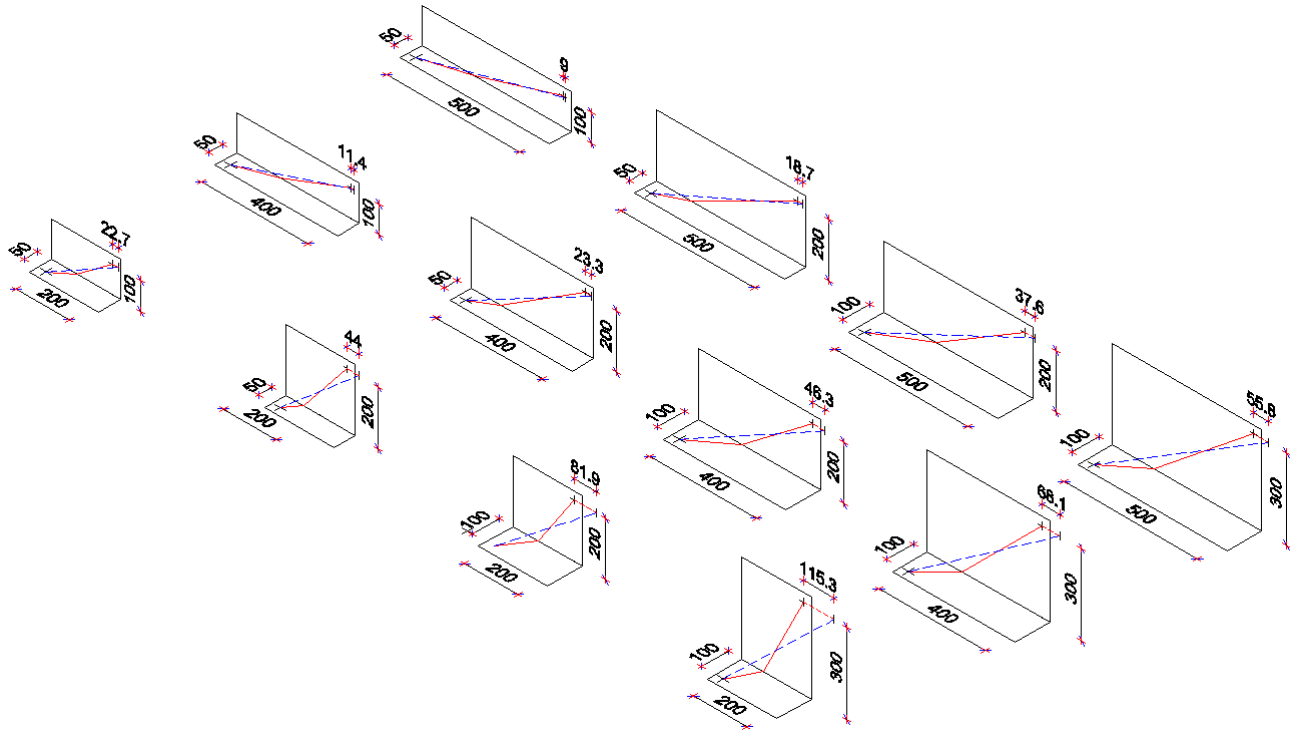


Figura 22

Considerando ora quanto già esposto a proposito della distanza della barra passante dall'estremità del tegolo (v. figura 8) e della sua posizione verticale (v. figura 9), si riportano nella seguente figura i risultati ottenuti con valori verosimilmente realistici delle distanze d e $x1+x2$, mantenendo invece c pari a 50 mm. L'altezza d viene fatta variare fra 200 e 300 mm, mentre la distanza $x1+x2$ viene fatta variare fra 300 e 500 mm.

Nel peggiore dei casi lo spostamento orizzontale del tegolo (punto B) risulta pari a 45.5 mm.

Nella progettazione degli angolari contro la perdita di appoggio si deve pertanto controllare che la profondità di appoggio sia compatibile con la possibilità che si verifichi il comportamento estremo sopra descritto.

Si tratta comunque di una richiesta facilmente soddisfatta nelle situazioni reali.

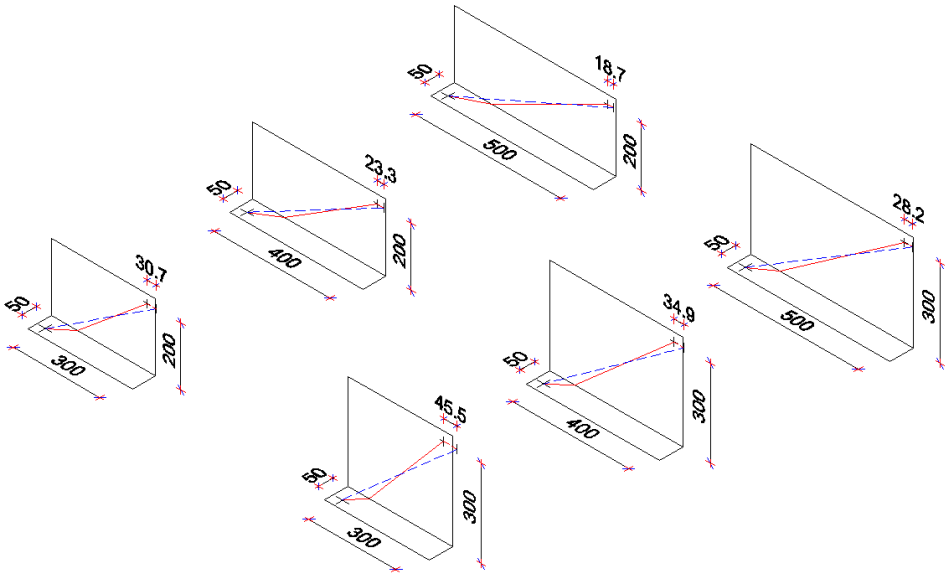


Figura 23

8 Considerazioni relative alla forza agente sulla barra passante

Viene di seguito presentato un modello numerico che approfondisce il problema del trasferimento della forza sismica F_H alla forza F_A sulla barra passante.

Viene considerata una forza sismica F_H di 1000 kg.

Il modello numerico utilizzato è raffigurato nelle successive figure, la seconda delle quali rappresenta un ingrandimento.

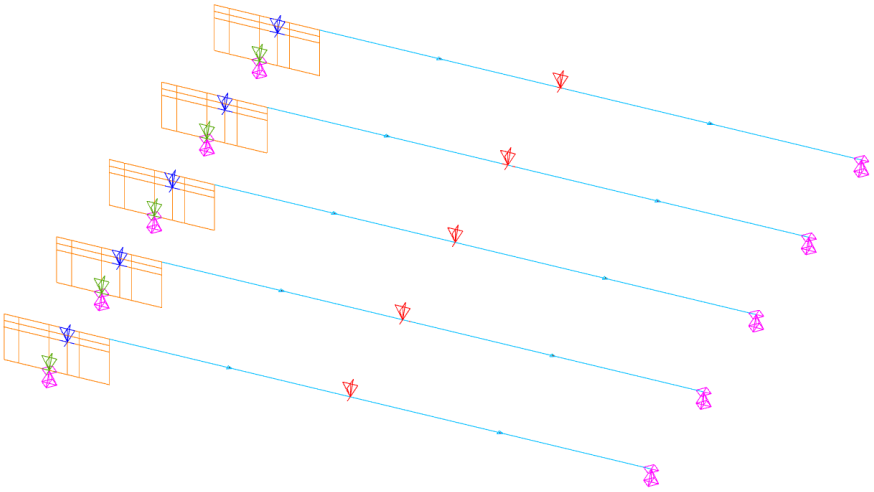


Figura 24

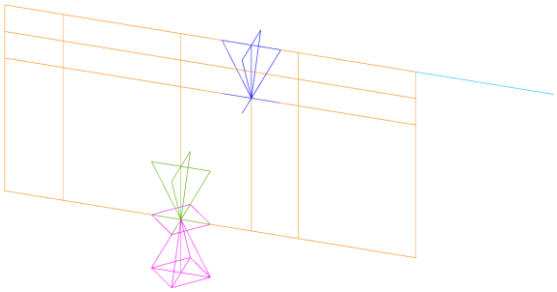


Figura 25

La parte iniziale del tegolo, dove è presente il collegamento, è schematizzata con degli elementi bidimensionali di tipo shell. Alla base di questi elementi è posto un vincolo che blocca solamente gli spostamenti verticali ed una forza orizzontale che rappresenta l'azione dell'attrito. Alla quota della barra passante viene introdotta un'altra forza orizzontale, che rappresenta la forza sulla barra stessa.

La rimanente parte del tegolo è schematizzata con una semplice asta con un vincolo di appoggio scorrevole all'altra estremità. Questa asta è posizionata alla quota del baricentro del tegolo e nella sua mezzeria agisce il carico orizzontale sismico, visibile nella figura seguente.

Le forze di attrito e sulla barra passante vengono fatte variare progressivamente, andando così a formare i cinque casi rappresentati nel modello e visibili in figura: la forza di attrito viene fatta progressivamente calare dal valore di F_H fino al valore nullo, mentre contemporaneamente la forza sulla barra passante viene fatta crescere da 0 fino all'intensità di F_H.

Questa simulazione mette in evidenza che trascurando l'attrito la forza sulla barra passante è massima. Il fatto che la normativa italiana non consenta di considerare l'attrito nel calcolo dei dispositivi contro la perdita di appoggio risulta pertanto cautelativo.

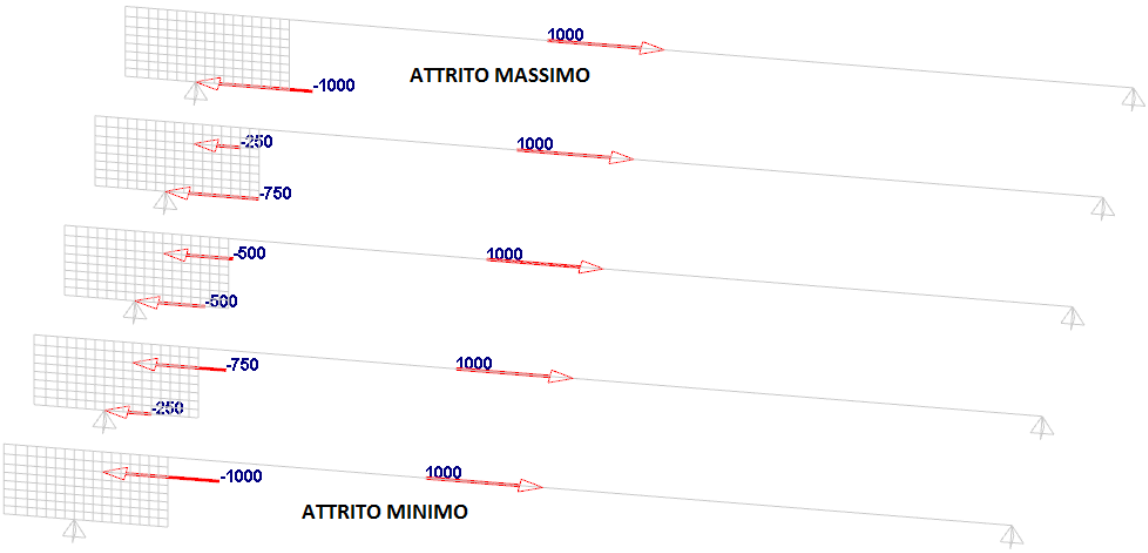


Figura 26

L'equilibrio alla traslazione è sempre garantito dalla somma della forza di attrito e della forza F_A sulla barra passante, mentre l'equilibrio alla rotazione viene garantito da una coppia di forze verticali che nascono alle estremità della trave. Questa coppia ha un valore massimo nel caso in cui l'attrito sia in grado di assorbire tutta la forza sismica, come si vede dall'immagine seguente.

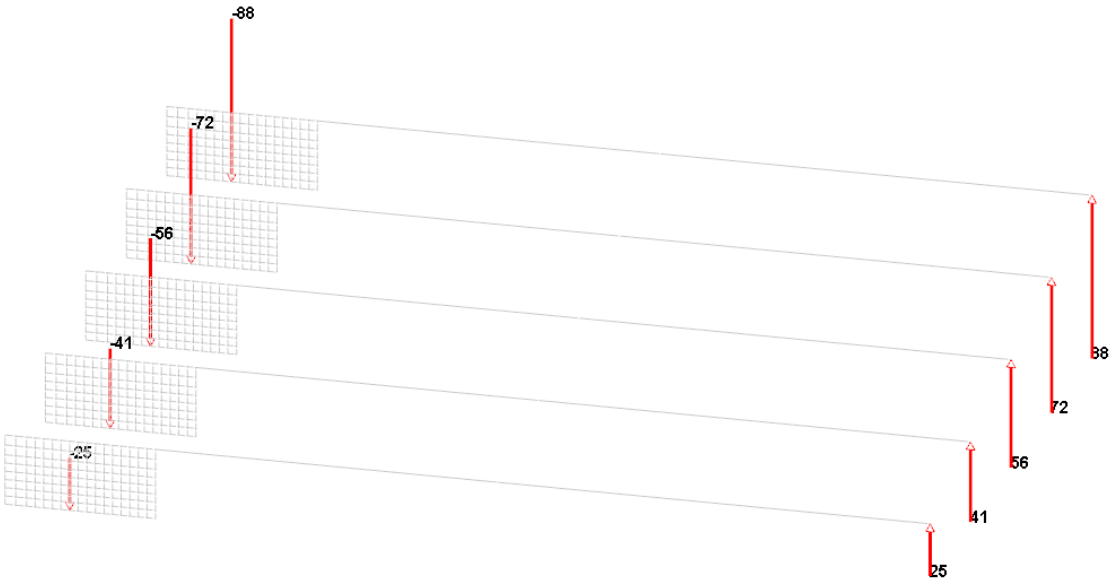


Figura 27

9 Esempio di calcolo delle forze agenti sul tassello

Viene di seguito presentato un esempio di calcolo delle forze agenti sul tassello, utilizzando le formule riportate nel § 7.4 e confrontandole con i valori ottenuti utilizzando un modello numerico agli elementi finiti.

Nella figura seguente viene riportato schematicamente uno dei due angolari di collegamento del tegolo alla trave, con l'indicazione delle diverse grandezze secondo la simbologia precedentemente adottata.

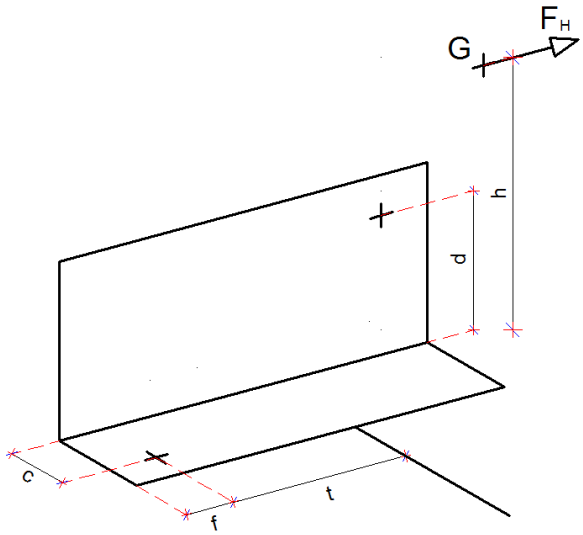


Figura 28

Si considerano i seguenti valori:

- forza orizzontale indotta dall'azione sismica F_H = 1000 kg
- quota della barra passante d = 250 mm
- quota del baricentro G del tegolo h = 350 mm
- distanza del tassello dal bordo dell'appoggio t = 200 mm
- distanza tra il lato dell'anima del tegolo e il tassello c = 50 mm
- distanza tra l'estremità del profilo di collegamento e il tassello f = 100 mm

La forza F_H agisce alla quota G del baricentro del tegolo.

Utilizzando le formule ricavate nel § 7.4 si ottengono le seguenti forze:

- F_A' (per ogni superficie di taglio) = F_A / n = 1000 / 2 = 500 kg
- V_L = F_A' = 500 kg
- N = $F_A' \cdot (d / t)$ = 500 · (250 / 200) = 625 kg
- V_T = $F_A' \cdot (c / f)$ = 500 · (50 / 100) = 250 kg

L'immagine seguente rappresenta il modello numerico implementato per rappresentare il profilo a L di collegamento tra la barra passante e il tassello.

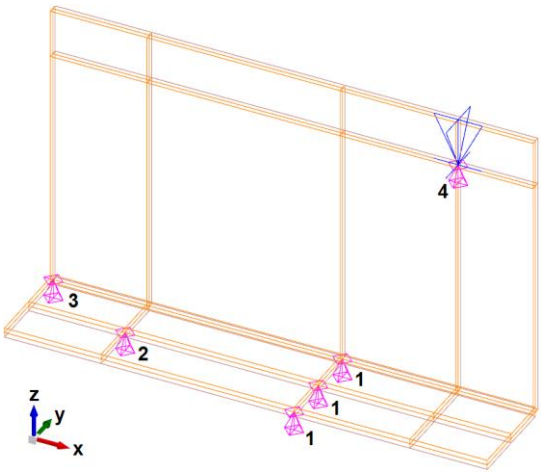


Figura 29

I vincoli nei punti 1 bloccano esclusivamente il movimento lungo z e rappresentano l'appoggio del profilo sul bordo della trave; il vincolo nel punto 2 blocca tutte le traslazioni e riproduce il tassello; il vincolo nel punto 3 blocca solamente lo spostamento in direzione y e rappresenta il contrasto alla rotazione nel piano x, y attorno al vincolo 2, offerto dall'anima del tegolo; infine il vincolo nel punto 4 blocca anch'esso solo la traslazione in direzione y, e riproduce la barra passante: a quest'ultimo vengono assegnate diverse rigidezze per studiarne l'effetto. In corrispondenza del punto 4 è applicata una forza in direzione x, di intensità pari a quella di F_A'.

L'immagine seguente rappresenta la mesh di calcolo, con i vincoli e la forza appena descritti: sono stati modellati due angolari, con diversi valori della rigidezza orizzontale *Ky* sul vincolo 4: sono stati considerati i valori *Ky* uguale a 0 kg/cm (come ipotizzato nel § 7.4) e *Ky* uguale a 400000 kg/cm (corrispondente all'incirca alla rigidezza di una barra ϕ16 in acciaio della lunghezza di 100 mm).

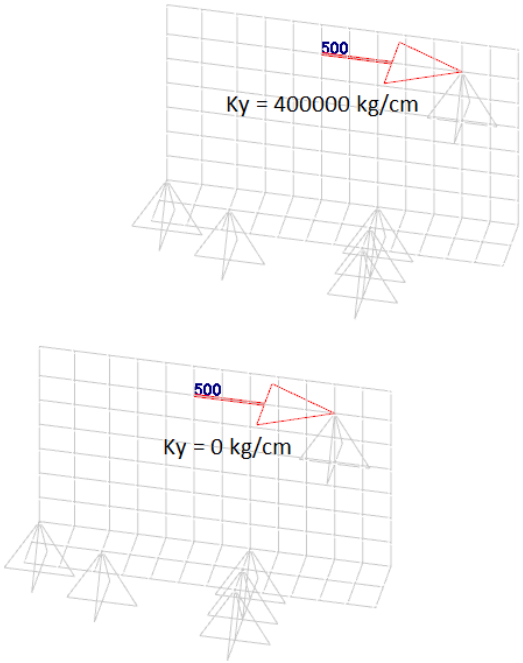


Figura 30

I risultati in termini di reazioni vincolari sono rappresentati nella seguente figura.

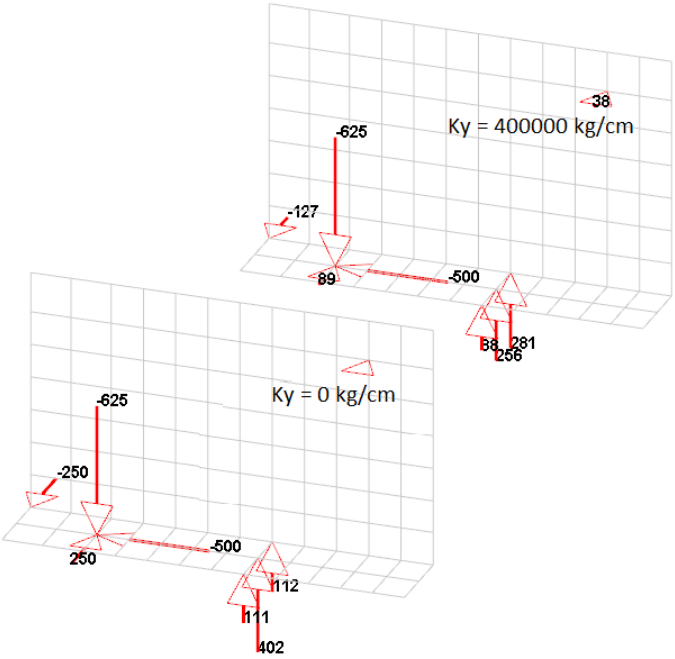


Figura 31

- Risultati con Ky uguale a 0 kg/cm

  Sul tassello si ottengono gli stessi valori ricavati con le formule del § 7.4.

  La reazione sul vincolo 3 (anima del tegolo) è pari a 250 kg ed è uguale a V_T.

  La somma delle reazioni sui vincoli 1 (bordo di appoggio del tegolo sulla trave) è pari a 625 kg ed è uguale alla trazione N sul tassello (111 + 402 + 112 = 625).

- Risultati con Ky uguale a 400000 kg/cm

  Sul tassello l'unica differenza riguarda una diminuzione della reazione trasversale V_T.

  La reazione sull'anima del tegolo diminuisce, mentre la reazione sul bordo di appoggio del tegolo sulla trave rimane pari a 88 + 256 + 281 = 625 kg ma con una distribuzione più uniforme.

In entrambi i casi le forze V_L e N sono uguali a quelle calcolate con le formule del § 7.4, pari rispettivamente a 500 kg e 625 kg.

All'aumentare della rigidezza assiale della barra passante diminuisce la reazione orizzontale V_T sul tassello. Si conferma pertanto quanto esposto nel § 7.4 dove si è detto che risulta cautelativo considerare nulla la reazione orizzontale N_B sul tassello.

10 Bibliografia

[1] Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, "Valutazione della vulnerabilità e interventi per le costruzioni ad uso produttivo in zona sismica";

[2] Gruppo di Lavoro Agibilità Sismica dei Capannoni Industriali, "Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici monopiano non progettati con criteri antisismici";

[3] Ministero delle Infrastrutture, "D.M. 14/01/2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni";

[4] Presidenza del Consiglio dei Ministri, "O.P.C.M. 3274 del 20/03/2003 - Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".