

# L'ADEGUAMENTO SISMICO DI EDIFICI ESISTENTI MEDIANTE ISOLAMENTO ALLA BASE

**Agostino Marioni<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Presidente ALGA S.p.A. Milano

## SOMMARIO

L'articolo illustra la tecnica dell'isolamento sismico per l'adeguamento sismico delle strutture esistenti. L'isolamento sismico, quando applicabile, permette di minimizzare gli interventi di rinforzo nella struttura e consente di operare con limitato disturbo alle attività che eventualmente si devono svolgere all'interno della struttura. Per l'inserimento degli isolatori nella struttura vengono descritte varie tecniche che comportano il temporaneo trasferimento dei carichi verticali a strutture ausiliarie ed il taglio della struttura. Vengono descritti alcuni esempi che utilizzano isolatori HDRB, LRB e a Pendolo Scorrevole.

## SUMMARY

The paper describes the seismic isolation for the retrofitting of the existing structures. Seismic isolation, when applicable, can minimize the necessary strengthening to the structure and also may be performed with limited disturbance of the activities running inside the structure. The paper describes several techniques used for the application of the isolators, consisting in the temporary transfer of the vertical loads to auxiliary structures and the cut of the columns. A few examples are described with isolators consisting of HDRB, LRB and Sliding Pendulum

## 1. INTRODUZIONE

L'isolamento sismico alla base, quando applicabile, è sicuramente la miglior strategia possibile per la protezione sismica delle strutture.

L'applicazione dell'isolamento alla base alle strutture esistenti comporta sicuramente qualche complicazione in più ma può ormai considerarsi una tecnica consolidata.

Sono stati completati numerosi progetti in tal senso in Italia ed all'estero, anche in strutture nelle quali si è dovuto garantire la funzionalità durante le operazioni di adeguamento. Il caso più frequente è rappresentato dagli edifici con ossatura portante in calcestruzzo armato, anche se non mancano esempi di applicazione ad edifici in muratura.

Il tema è di grande attualità poiché all'Aquila, dopo il terremoto del 2009, vi è un grande numero di edifici, prevalentemente residenziali, dove tale tecnologia è applicabile e che a breve inizieranno ad essere adeguati con questo metodo.

Lo Stato ha stanziato ingenti fondi e paga 400 € al metro quadro per gli edifici che vengono adeguati alle nuove norme sismiche, cifra che è molto spesso congrua per finanziare un intervento di questo genere, specialmente negli edifici multipiano di una certa importanza.

Lo scrivente è attualmente coinvolto nella progettazione dell'adeguamento sismico di una ventina di edifici per i quali si prevede l'inizio dei lavori entro la primavera 2011.

Nell'articolo vengono descritti i progetti più significativi in corso di esecuzione soffermandosi in particolare sulle analisi sismiche effettuate e sulle tecniche usate per l'adeguamento.

La tecnica più frequentemente utilizzata prevede la rimozione del carico verticale dai pilastri mediante l'azione di martinetti idraulici reagenti su di una coppia di morse che trasferiscono il carico per attrito. Una volta rimosso il carico del pilastro nella zona in cui si deve installare l'isolatore si procede all'asportazione di un concio di calcestruzzo ed all'inserimento dell'isolatore. Questa procedura è estremamente poco invasiva poiché concentra in un solo piano le operazioni e molto spesso consente di adeguare sismicamente l'edificio senza consistenti interventi di rinforzo nelle parti sovrastanti gli isolatori in quanto le accelerazioni dovute al sisma possono essere abbattute al disotto del livello di forze orizzontali per le quali l'edificio era stato progettato (generalmente nella zona di L'Aquila il 7% dei carichi verticali).

## 2 CONFRONTO FRA I VARI METODI DI ADEGUAMENTO SISMICO

La necessità di incrementare la resistenza al sisma di una struttura può derivare dall'inadeguatezza della struttura stessa, in quanto calcolata applicando normative che non tenevano conto delle azioni sismiche considerate nella normativa attuale, ovvero dalla necessità di recuperare una struttura danneggiata dal terremoto. Molto spesso poi a quest'ultimo caso è associato anche il primo.

L'adeguamento sismico può essere ottenuto sostanzialmente attraverso 3 sistemi che, in alcuni casi possono essere combinati tra loro:

- Il rinforzo strutturale, che può essere ottenuto mediante l'applicazione di armature aggiuntive, spesso realizzate mediante l'impiego di fibre di carbonio o di vetro. Come si può vedere nel grafico di figura 1 questa pratica rende la struttura più rigida senza incrementarne la capacità di dissipare energia e pertanto ne aumenta la risposta sismica. La struttura rinforzata dovrà pertanto essere calcolata per resistere ad azioni sismiche superiori a quelle della struttura originaria.
- L'applicazione di controventi dissipativi. Con tale tecnologia si incrementa la capacità della struttura di dissipare energia. I benefici in termine di riduzione dell'azione sismica sono però in parte annullati dal fatto che contemporaneamente i controventi dissipativi aumentano la rigidità della struttura, riducendo pertanto il periodo proprio, come è messo in evidenza nel grafico di figura 1. I controventi dissipativi possono essere isteretici o dotati di ammortizzatori viscosi. Solitamente per le strutture in calcestruzzo si preferiscono i primi che garantiscono un'attivazione con spostamenti minori, compatibili con la limitata deformabilità della struttura.
- L'isolamento sismico alla base. Come si vede dal grafico di figura 1 questo metodo consente una riduzione dell'azione sismica notevole, tale da minimizzare o addirittura eliminare la necessità di rinforzare la struttura. Quando questa circostanza è conseguibile il metodo dell'isolamento sismico è decisamente il meno invasivo in quanto permette di concentrare le operazioni ad un solo piano, il piano interrato o il piano terreno. L'applicazione dell'isolamento sismico richiede però che la struttura sia libera di muoversi in tutte le direzioni di una quantità che dipende dalla sismicità della zona, solitamente non superiore a 300 mm in Italia. Questo metodo non si applica pertanto ad edifici adiacenti ad altri, come spesso avviene nei centri storici. Difficilmente si applica poi ad edifici monumentali, anche se non mancano esempi in tal senso nel mondo.

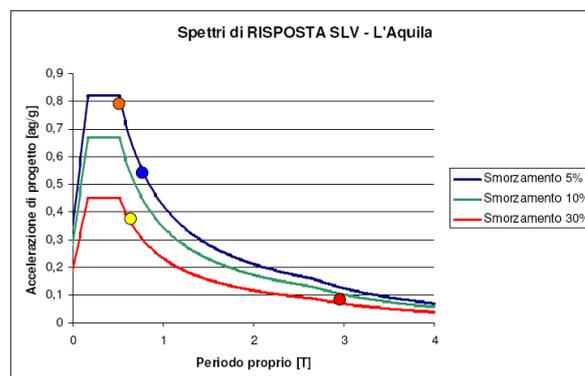


Figura 1 - Confronto fra vari sistemi di adeguamento sismico:

- Edificio esistente (punto blu)
- Rinforzo strutturale (punto arancione)
- Controventi dissipativi (punto giallo)
- Isolamento (punto rosso)

Il presente articolo si riferisce essenzialmente al terzo metodo, illustrando i sistemi applicativi ed alcuni esempi, riferiti a strutture con ossatura a travi e pilastri in calcestruzzo armato.

### 3. L'APPLICAZIONE DEGLI ISOLATORI SISMICI ALL'OSSATURA DI UN EDIFICIO IN CALCESTRUZZO ARMATO.

Questa operazione comporta il taglio della struttura in calcestruzzo e generalmente si possono avere tre casistiche:

- a) Muri o pilastri estesi. In tale caso si procede generalmente ad eseguire tagli localizzati in modo da poter inserire l'isolatore senza puntellazione della struttura. Una volta inseriti e debitamente solidarizzati gli isolatori alla struttura si procede al completamento del taglio della struttura. Questo metodo è applicabile se i cedimenti degli isolatori sono trascurabili, come è il caso per isolatori a pendolo scorrevole o in gomma ad elevata rigidità verticale.
- b) Pilastri in calcestruzzo armato quando la trave è in grado di sopportare il peso della struttura sovrastante. In tale caso si scarica il pilastro applicando dei martinetti idraulici sotto la trave. Questo caso si presenta per edifici di altezza limitata come nell'esempio dell'Aeroporto di Antalya descritto al successivo paragrafo 4.2.
- c) Negli altri casi, che sono peraltro i più frequenti, occorre trasferire il carico al pilastro stesso, nelle zone sotto e sovrastanti quella in cui si deve effettuare il taglio e l'inserimento dell'isolatore. Generalmente il trasferimento del carico viene effettuato mediante l'applicazione di morse metalliche che vengono serrate sul pilastro mediante barre di acciaio messe in tensione con martinetti idraulici con una forza tale da garantire con adeguato margine di sicurezza il carico verticale agente sul pilastro. Lo scrivente ha sempre operato considerando un coefficiente d'attrito acciaio-calcestruzzo pari a 0,4 (valore riscontrato mediante prove sperimentali) ed applicando un fattore di

sicurezza pari a 2. Prima di procedere al taglio del pilastro viene sempre effettuata una prova dell'efficienza delle morse applicando mediante i martinetti idraulici verticali un carico adeguatamente maggiorato rispetto a quello effettivo. Un esempio di questo tipo di attrezzatura è rappresentato nella figura 2, nella fase conclusiva, dopo l'inserimento dell'isolatore. In alternativa alle morse operanti per attrito sono state utilizzate carpenterie metalliche dotate di barre d'acciaio passanti attraverso il pilastro. Questa tecnica comporta la foratura del pilastro e non sempre è consigliabile in quanto spesso il calcestruzzo delle strutture esistenti è di qualità scadente.

Comunque venga inserito l'isolatore, lo schema statico della struttura viene alterato in quanto in un pilastro che prima era continuo viene inserita una cerniera ed inoltre le armature metalliche al suo interno vengono tagliate. Occorre pertanto apportare gli opportuni rinforzi in modo che la struttura modificata sia in grado di resistere alle sollecitazioni. I rinforzi sono generalmente costituiti da armature aggiuntive esterne (possono essere sia in acciaio sia in fibra di vetro o carbonio) o dall'aggiunta di un solaio che colleghi tra loro i pilastri o dalla combinazione di entrambi i metodi come illustrato al successivo paragrafo 4.1 per l'edificio Polifunzionale di Soccavo

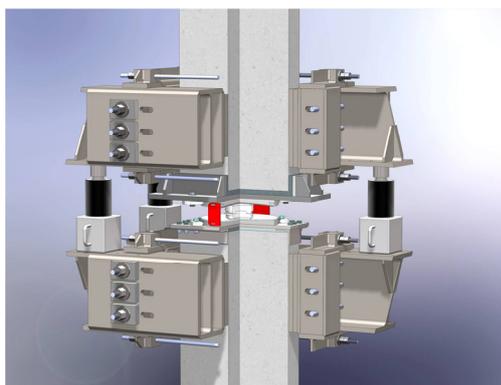


Figura 2 - Inserimento di un isolatore sismico in un pilastro in calcestruzzo armato, previo trasferimento del carico verticale mediante morse in acciaio

#### 4. ESEMPI APPLICATIVI

##### 4.1 L'edificio Polifunzionale di Soccavo (Napoli)

Esso consiste di una struttura a travi e pilastri in calcestruzzo armato avente dimensioni in pianta di 120 x 170 metri ed un'altezza di 20. Appartiene al Comune di Napoli.

La sua costruzione è iniziata nel 1976 ed è stata interrotta per mancanza di fondi nel 1979 allorché l'ossatura in calcestruzzo armato era stata completata. L'aspetto della struttura in questa fase è mostrato in Figura 3.

Nel 1999 il comune di Napoli decise di completare l'edificio ma nel frattempo la Normativa Sismica Italiana era cambiata e la struttura non era più adeguata alle azioni sismiche che implicavano un'accelerazione al suolo di 0,25g. L'isolamento sismico è risultato immediatamente essere la soluzione più efficace ed economica, permettendo al tempo

stesso di minimizzare i rinforzi strutturali da applicare alla struttura esistente.



Figura 3 - L'edificio Polifunzionale di Soccavo prima dei lavori di adeguamento

L'isolamento sismico è stato ottenuto inserendo 636 appoggi in gomma ad alta dissipazione di energia (HDRB) con smorzamento viscoso equivalente del 10%. L'uso degli HDRB ha permesso di spostare il periodo proprio della struttura da 0,7 a 1,75 s a di ridurre l'accelerazione da 0,42 a 0,14 g. Per tagliare i pilastri ALGA ha sviluppato delle speciali morse metalliche, da applicare sopra e sotto la zona di taglio e serrate al pilastro mediante barre di precompressione in modo da generare una forza d'attrito idonea a trasmettere il carico sopportato dal pilastro. Dopo l'applicazione delle morse il pilastro veniva scaricato mediante l'uso di martinetti idraulici, ne veniva tagliato un concio con sega a filo diamantato, infine veniva inserito l'isolatore, dopo di che si potevano rimuovere le morse. La fase di taglio è mostrata in fig. 4.

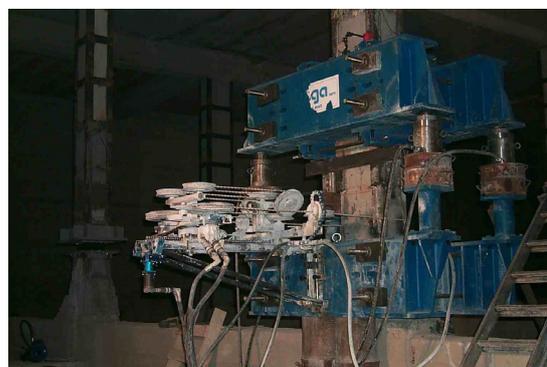


Figura 4 - Dettaglio delle morse e della sega a filo diamantato

Dopo il taglio i pilastri sono stati collegati fra loro sopra la quota degli isolatori mediante un solaio aggiuntivo e sono stati rinforzati esternamente da angolari metallici per compensare il taglio delle armature (vedi fig. 5).

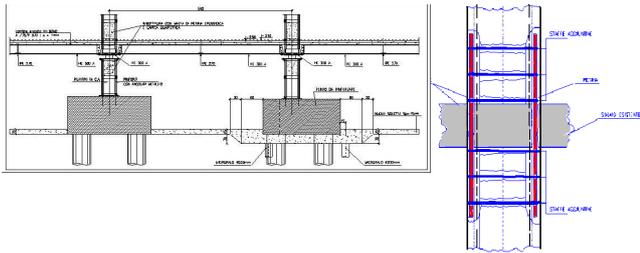


Figura 5 – Dettaglio del solaio aggiuntivo e dei rinforzi locali sui pilastri

Nelle figure 6, 7, e 8 sono mostrati il dettaglio di un isolatore, una fase di esecuzione del lavoro a l'edificio completato.

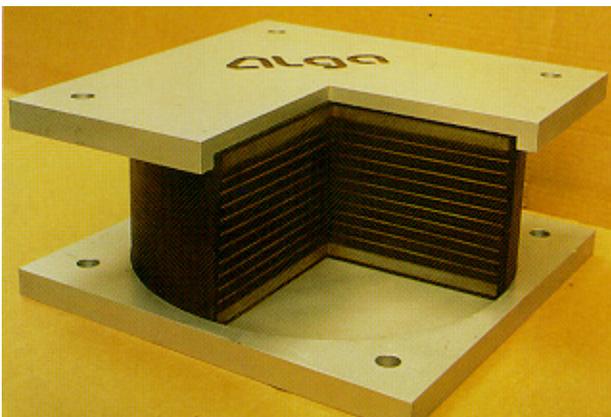


Figura 6 – Dettaglio di un HDRB



Figura 7 – Una fase di esecuzione del lavoro

Il costo dell'adeguamento sismico è risultato pari a circa il 4% del valore commerciale dell'edificio: un valore veramente trascurabile se paragonato ai benefici ottenuti. Senza contare che tra i benefici ottenuti vi era anche il valore commerciale del solaio aggiuntivo, circa 10.000 mq, largamente superiore al costo dell'operazione di adeguamento.



Figura 8 – L'edificio dopo il completamento dell'adeguamento sismico

#### 4.2 L'Aeroporto di Antalya, Turchia

L'aeroporto di Antalya (figura 10) smaltisce un traffico di quasi 20 milioni di passeggeri l'anno. Anche se la struttura era stata completata di recente (1994), l'ente proprietario ha deciso di effettuare l'adeguamento sismico per renderlo conforme alla più recente normativa.



Figura 9 – L'aeroporto di Antalya, 18,8 milioni di passeggeri nel 2008

La struttura consta di due corpi principali, come la maggior parte dei moderni aeroporti: l'area accettazione, negozi ed uffici ha tre piani con ossatura in calcestruzzo armato ed ha la parte centrale, in corrispondenza della sala principale, coperta da una struttura metallica leggera; l'area di imbarco, sbarco e gestione bagagli è anch'essa una struttura in calcestruzzo armato con un massimo di tre piani. In totale vi sono 358 pilastri in calcestruzzo armato.

Il progetto dell'isolamento è stato fatto utilizzando isolatori in gomma armata con nucleo di piombo (LRB) da inserire nei pilastri in calcestruzzo armato. Gli isolatori LRB sono stati scelti per ottenere uno spostamento del periodo proprio a 2,69 secondi con uno smorzamento viscoso equivalente del 28%. In questo modo si è riusciti a ridurre l'accelerazione nella struttura isolata sotto 0,1g e ad evitare la necessità di qualsiasi rinforzo strutturale. Lo spostamento della struttura col sisma di progetto è di  $\pm 150$  mm. La copertura metallica sopra la sala principale, che è sorretta da due parti indipendenti della struttura è stata provvista di appoggi a disco elastomerico mobili multidirezionali con corsa  $\pm 300$  mm.

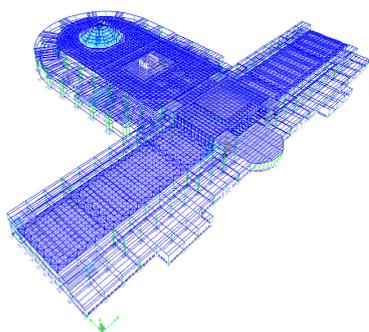


Figura 10 – La maglia strutturale dell'aeroporto di Antalya

L'installazione degli isolatori mediante taglio dei pilastri, era relativamente semplice perché la struttura sovrastante gli isolatori era leggera (solo due piani) e le travi erano in grado di sopportare il suo peso durante le fasi di taglio ed installazione degli isolatori. Pertanto è stato sufficiente posizionare delle colonne in profilati metallici a lato dei pilastri e scaricare il peso della struttura mediante martinetti idraulici come mostrato in Figura 11.



Figura 11 – Taglio dei pilastri con sega a filo diamantato

Una delle prescrizioni essenziali date dal committente era quella di non interferire con l'attività dell'aeroporto e di dare il minimo disturbo possibile alle attività collaterali quali i negozi e gli uffici. L'adeguamento sismico è stato completato durante 4 mesi invernali durante i quali il traffico aereo, prevalentemente turistico, è ridotto al minimo; si è operato in piccole aree per ridurre al minimo i necessari spostamenti dei negozi. La maggior parte dei pilastri era ricoperta di pannelli in FRC come mostrato in Figura 13, così che, a lavori ultimati l'intervento effettuato risultava pressoché invisibile.



Figura 12 – Dettaglio di un LRB dopo l'installazione



Figura 13 – Dopo il completamento dei lavori i pilastri sono stati nuovamente ricoperti dai pannelli di FRC che nascondono completamente l'intervento

#### 4.3 L'adeguamento sismico degli edifici danneggiati dal sisma a L'Aquila

Dopo il terremoto del 6 Aprile 2009 gli edifici sono stati classificati in sei categorie, dalla A "edificio agibile" alla F "edificio inagibile con grave rischio". Nella categoria E, alla quale appartiene circa il 20% del totale degli edifici, ricadono quelli inagibili che richiedono consistenti lavori di riparazione. Per tale categoria di edifici lo Stato ha stanziato la cifra di 400 €/m<sup>2</sup> per l'eventuale applicazione di un adeguamento sismico che ne garantisca l'idoneità almeno per l'80% alla normativa vigente (NTC2008). La cifra stanziata dallo Stato è tanto più congrua quanti più piani ha l'edificio, ma si può dire che in molti casi pratici è sufficiente a spesare l'intervento di isolamento alla base.

Gli edifici esistenti a L'Aquila e classificati in categoria E sono in gran parte condomini con ossatura a travi e pilastri in calcestruzzo armato, risalenti agli anni '70. In quell'epoca L'Aquila era classificata zona sismica di seconda categoria e gli effetti del terremoto, in base alla normativa allora vigente, erano presi in conto applicando alla struttura delle forze orizzontali statiche pari al 7% dei carichi verticali e

verificando le strutture col criterio delle tensioni ammissibili. E' evidente che, nella maggior parte dei casi, si può evitare o quanto meno ridurre drasticamente la necessità di interventi di rinforzo strutturale se, mediante l'isolamento sismico, si riesce a ridurre le accelerazioni della struttura ad un valore minore o uguale a 0,07g

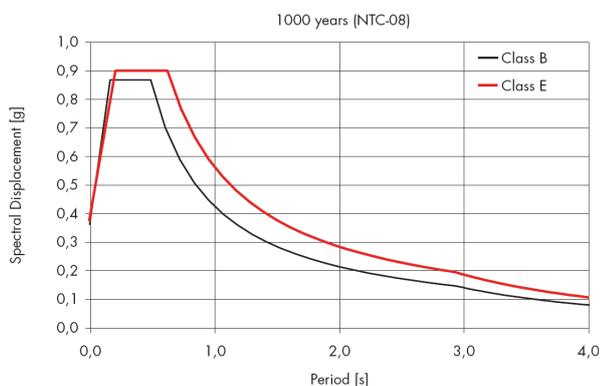


Figura 14 – Spettri di risposta per la città di L'Aquila per smorzamento 5%

Dagli spettri di risposta per la città di L'Aquila si vede che, per ottenere un'accelerazione residua di 0,07g è necessario spostare il periodo oltre i 3 secondi, con smorzamento viscoso equivalente dell'ordine del 28%.

Si riesce facilmente a raggiungere questi valori con gli isolatori a pendolo scorrevole, mentre è molto difficile (compatibilmente con gli ingombri disponibili) con isolatori di altro tipo, ad esempio LRB.

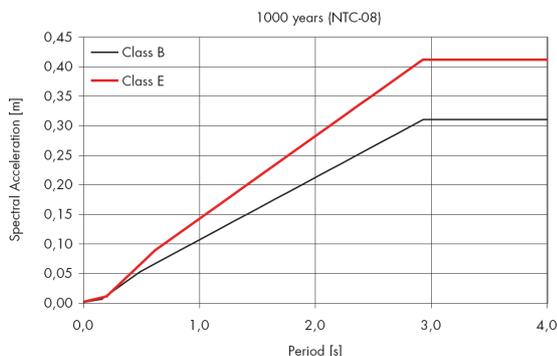


Figura 15 – Spettri dello spostamento per la città di L'Aquila per smorzamento 5%

Innanzitutto con gli isolatori a pendolo scorrevole si possono limitare gli spostamenti in quanto essi non danno luogo ad effetti di eccentricità, essendo il baricentro delle rigidità sempre coincidente con quello delle masse. Pertanto si può considerare come spostamento di progetto quello fornito dallo spettro di risposta, non amplificato. Facendo riferimento agli spettri qui sotto riportati si ricava, con uno smorzamento viscoso equivalente del 28%, uno spostamento massimo dell'ordine di 250 mm.

Utilizzando isolatori in gomma o in gomma-piombo, bisognerebbe considerare uno spostamento di progetto

amplificato del 30% per tenere conto dell'eccentricità e pertanto di circa 325 mm. Inoltre, poiché non è praticamente possibile realizzare isolatori in gomma con rigidità tanto basse da ottenere un periodo superiore ai 3 secondi, è necessario combinare questi isolatori con appoggi scorrevoli, aventi rigidità nulla. Gli appoggi scorrevoli, con spostamenti in tutte le direzioni di 325 mm, avrebbero dimensioni decisamente ingombranti per poter essere incorporati nei pilastri di un edificio esistente.

Nella figura 16 sono rappresentati in scala uniforme, gli isolatori a pendolo scorrevole a una e due superfici di scorrimento, gli isolatori in gomma e gli appoggi scorrevoli, tutti dimensionati per un carico verticale di 2000 kN e per gli spostamenti di progetto rispettivamente di 250 e 325 mm

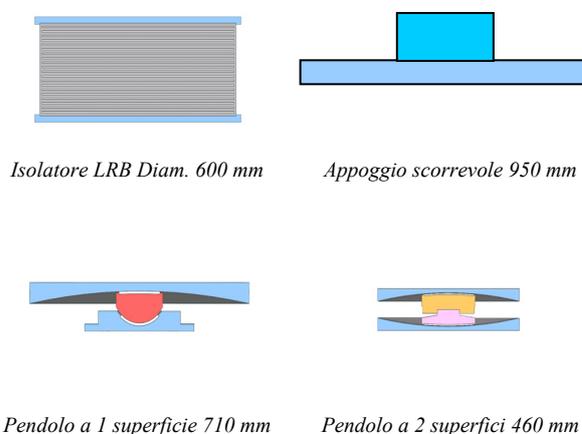


Figura 16 – Dimensioni relative di isolatori e appoggi

In base a queste considerazioni ne consegue che l'uso degli isolatori a pendolo scorrevole è particolarmente vantaggioso per l'adeguamento sismico degli edifici esistenti ed è la soluzione che ALGA propone in tutti i casi da lei finora esaminati – circa una ventina - attualmente in fase di approvazione a L'Aquila.

La scelta di isolatori a pendolo a una o a due superfici di scorrimento è dettata di volta in volta dalle condizioni geometriche e dallo spostamento della risultante che è diverso nei due casi come mostrato nella figura 17.

La tecnologia degli isolatori a pendolo scorrevole è ben collaudata ed è già stata impiegata da ALGA in numerose applicazioni in Italia ed all'estero. L'applicazione più significativa resta senz'altro quella per il progetto C.A.S.E. all'Aquila per il quale ALGA ne ha forniti quasi 5000 dei quali circa 1000 assoggettati a prove dinamiche. Il componente più importante degli isolatori a pendolo scorrevole è sicuramente il materiale di scorrimento che deve garantire attrito costante e resistenza alle elevate temperature che si manifestano all'interno del dispositivo per effetto della dissipazione di energia. ALGA per tale scopo ha messo a punto con il Politecnico di Milano un materiale – Hotslide – le cui eccezionali caratteristiche di resistenza alle alte temperature prodotte dalla dissipazione di energia (cioè alla conversione dell'energia del terremoto in calore) sono messe a confronto con le prestazioni di altri materiali sintetici nel grafico della figura 18.

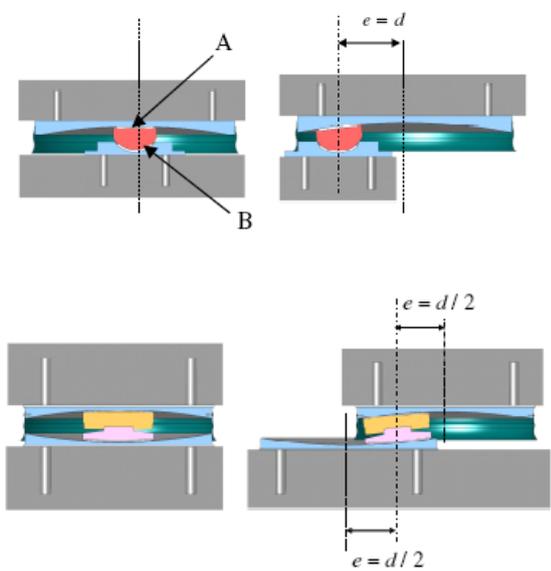


Figura 17- Lo spostamento della risultante prodotto da isolatori a pendolo scorrevole a una superficie e a due superfici di scorrimento

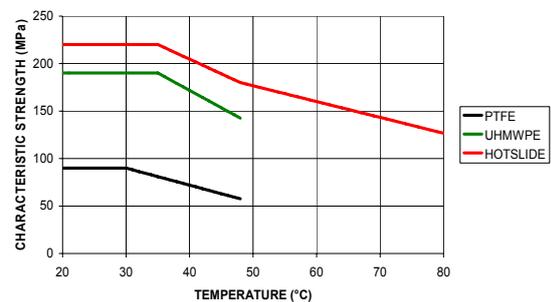


Figura 18 – Il materiale di scorrimento innovativo Hotslide presenta elevate caratteristiche di resistenza alle elevate temperature

Per un tipico intervento di adeguamento sismico su di una palazzina condominiale a L'Aquila, le fasi operative sono riportate schematicamente nella figura 19.

Nella figura 20 è rappresentato un dettaglio tipico di un pilastro perimetrale con gli interventi di adeguamento da effettuare ed in particolare:

- Il muretto contro terra per creare l'intercapedine necessaria a permettere lo spostamento di progetto dell'edificio
- Il rinforzo della parte inferiore del pilastro, al di sopra della fondazione esistente
- Il solaio aggiuntivo che collega fra loro le estremità dei pilastri al di sopra degli isolatori
- L'isolatore a pendolo scorrevole con gli elementi metallici che lo collegano alle strutture

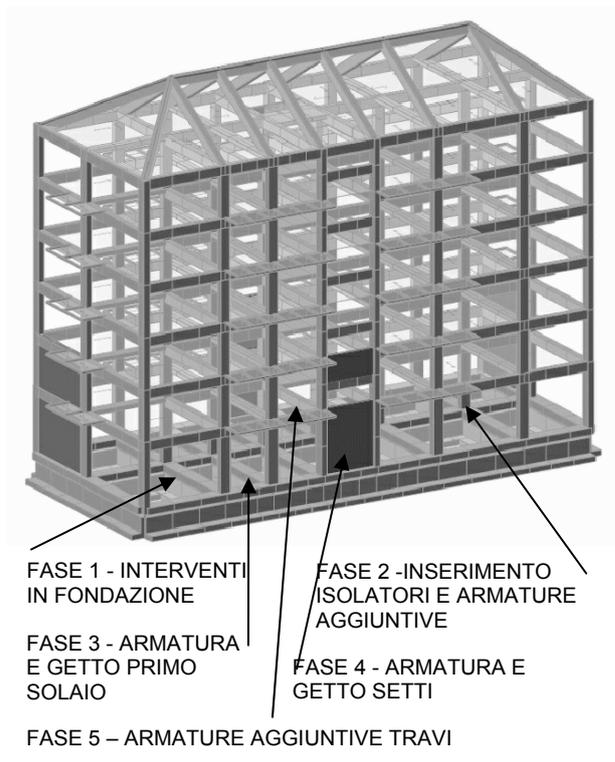


Figura 19 – Le differenti fasi operative per un intervento di isolamento sismico

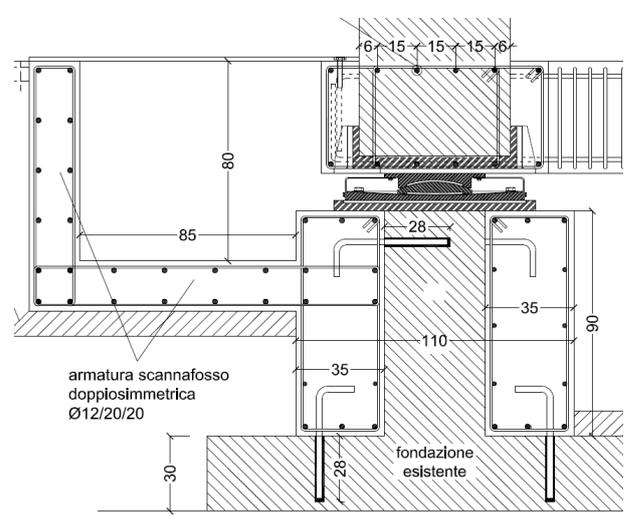
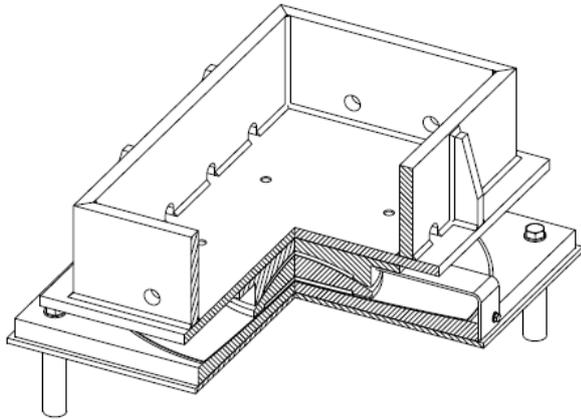


Figura 20 – Dettaglio di un isolatore a pendolo scorrevole e delle strutture adiacenti con gli interventi necessari per l'adeguamento

Nella figura 21 è rappresentato in assonometria l'isolatore a pendolo scorrevole e le carpenterie metalliche per il collegamento alle strutture. In particolare nel caso in esame:



*Figura 21 – Dettaglio di un isolatore con le carpenterie metalliche per il fissaggio alle strutture*

- Il fissaggio alla parte inferiore, nella quale si hanno dei getti in opera, è fatto mediante zanche metalliche.

- Il fissaggio alla parte superiore è fatto mediante un bicchiere metallico nel quale entra il pilastro dopo l'esecuzione del taglio.

Nella figura non è mostrato il parapolvere che è sempre presente quando la superficie di scorrimento principale presenta la concavità verso l'alto mentre può essere omesso quando la superficie principale è posta superiormente con la concavità verso il basso.

Ovviamente questi dettagli non sono che degli esempi riferiti ad una condizione particolare. Nella pratica le situazioni che si incontrano sono molteplici ed i dettagli costruttivi possono essere molto diversi.

## **5. CONCLUSIONE**

Quando applicabile l'isolamento sismico è sicuramente la tecnica più efficace ed economica per l'adeguamento sismico. Inoltre l'isolamento sismico ha il grande vantaggio di proteggere dal terremoto anche il contenuto della struttura e le parti non strutturali.

Ogni progetto di isolamento sismico pone dei problemi differenti da risolvere. Gli esempi descritti in quest'articolo mostrano come le tecnologie esistenti possano essere adattate alle situazioni più disparate.