

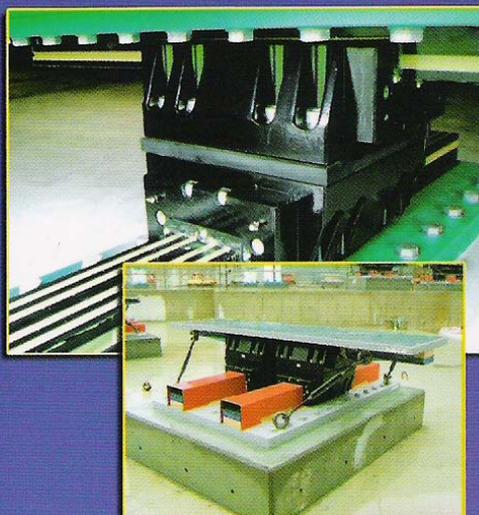
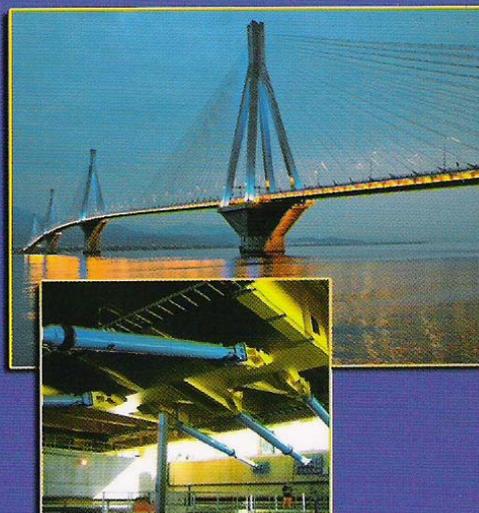
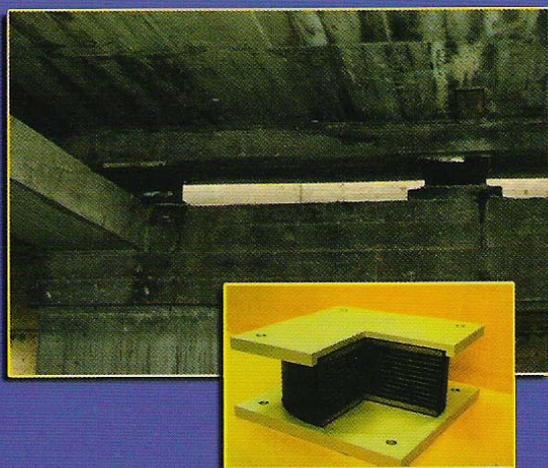


ESTRATTO DA:

A. Martelli - U. Sannino - A. Parducci - F. Braga

Moderni sistemi e tecnologie antisismici

Una guida per il progettista



21^{mo} SECOLO

ATTI DEL SEMINARIO DI STUDI SUI SISTEMI E TECNOLOGIE ANTISISMICI
Roma 12 Settembre 2007
Aula Magna del Consiglio Nazionale delle Ricerche



SISTEMI E TECNOLOGIE ANTISISMICHE
Roma CNR – Aula Magna – 12 Settembre 2007

Sviluppo ed applicazioni delle tecniche antisismiche presso la società TIS SpA di Roma.

Ing. R.marnetto – Responsabile del settore R&S – e.mail: r.marnetto@tis.it

Al fine di consentire una migliore comprensione della vasta problematica connessa alla protezione sismica delle strutture, la presente memoria si propone, volutamente per sommi punti, di fornire il completo percorso di approccio, con evidenza degli aspetti salienti e delle soluzioni tecnologiche ottimali.

L'intenzione è quindi di fornire uno strumento utile, anche a chi non fosse necessariamente avvezzo all'argomento, per poter affrontare il problema, riservandosi eventualmente di completarlo, a questo punto con maggiore cognizione di causa, di quelle notizie/informazioni di dettaglio che si ritenessero necessarie.

Come per tutti i problemi, la soluzione risiede nella conoscenza dei fenomeni che li generano e del modo in cui rispondono le parti coinvolte. Nella protezione sismica ciò si traduce nella comprensione delle caratteristiche che rendono *pericoloso* un terremoto a fronte degli aspetti che rendono *vulnerabile* una struttura.

Come tali aspetti di causa/effetto interagiscono e il ruolo che hanno in tali interazioni, rappresentano il passo successivo nel processo di comprensione del problema.

Dal *ruolo* delle interazioni e dal *come* queste agiscono è facile quindi trarre conclusioni sulle strategie più opportune per *disinnescare* un potenziale pericolo o per come renderne *accettabili* le conseguenze.

La definizione del livello di danno accettabile, riveste da parte sua un ruolo determinante nel bilancio costi/benefici (diretti ed indiretti) cui è condizionata ogni scelta strategica: dall'integrità totale → alla '*sola*' prevenzione del crollo della struttura.

La soluzione tecnologica, che realizza la traduzione nel campo del realizzabile della potenziale strategia, è l'anello di connessione tra l'obiettivo perseguito ed il conseguente costo richiesto.

Fatta questa rapida disamina del processo, non rimane che calarlo nel dettaglio del problema. Nella **figura 1** è rappresentato in sintesi il flusso fino alla caratterizzazione delle tipologie prestazionali correlate alle soluzioni tecnologiche disponibili.

Nella trattazione che segue, si è ritenuto utile sottolineare il significato ed il ruolo dei concetti riportati, in modo che si possano individuare più facilmente le varie scelte progettuali possibili in relazione alla loro congruenza economico-funzionale.



Figura 1: quadro sinottico del processo di inquadramento della Protezione Sismica delle strutture.

1. CONOSCENZA DEGLI ASPETTI DI INTERAZIONE

- **TERREMOTO:** per gli aspetti che competono alla protezione sismica delle strutture, il terremoto si configura come un evento *dinamico* con rilascio di *energia* e pertanto lo si caratterizza attraverso i due parametri conseguenti:
 - o il **contenuto in frequenze** per l'aspetto dinamico; anticipiamo che tale conoscenza permette di caratterizzare la *'fascia'* di strutture più esposta al sisma;
 - o il **contenuto in energia** che misura la potenziale capacità distruttrice liberata dal sisma; esso rappresenta infatti il lavoro che deve essere compiuto, dal sistema terreno-struttura, fino alla sua completa dissipazione; per quanto apparentemente ovvio, si ritiene utile sottolineare che, affinché il lavoro possa essere compiuto, in particolare da una struttura, è necessario che l'energia *'entri'* nella struttura stessa.
- **STRUTTURA**

Gli aspetti che ne influenzano la *'vulnerabilità'* possono elencarsi nei seguenti:



- la **risposta dinamica** che rappresenta, sintetizzandone la definizione, il modo di vibrare '*naturale*' della struttura se sollecitata dinamicamente; si consideri che quando il 'modo' naturale di vibrare di una struttura è in accordo con il 'modo' con cui l'azione esterna agisce, si attiva il fenomeno della *risonanza* con conseguente progressiva amplificazione dell'azione fino a valori teoricamente '*infiniti*'; tale effetto dipende solo dalla '*sintonia dinamica*' tra eccitazione e sistema investito e non dall'intensità di questa;
- la **resistenza** che rappresenta la capacità di sopportare le azioni conseguenti al moto imposto dal terremoto in regime '*elastico*';
- la **duttilità** che rappresenta la capacità di sopportare spostamenti oltre la soglia di 'rottura' (*plasticizzazione*) mantenendo il carico; questa, insieme alla caratteristica successiva, è una misura della capacità di assorbimento di energia;
- la sensibilità alla **fatica oligociclica**: ovvero la capacità di ciclare attingendo alla duttilità per un numero significativo di cicli, il che equivale alla capacità di dissipare più o meno energia durante lo scuotimento strutturale prima di arrivare al collasso.

- INTERAZIONE TRA TERREMOTO E STRUTTURA

- per quanto detto ai punti precedenti tanto maggiore è la sintonia dinamica tra terremoto (contenuto in frequenze) e risposta dinamica della struttura (periodo di risposta) tanto maggiore è l'energia che entra nella struttura;
- per soddisfare il conseguente bilancio energetico, l'energia che entra nella struttura potrà essere dissipata mediante:
 - il lavoro consumato nell'attrito interno ed è quanto avviene se la resistenza alle azioni indotte è tale da non comportare rotture e la struttura vibra '*elasticsearchamente*';
 - il lavoro di rottura consumato per raggiungimento del limite elastico;
 - il lavoro di 'ciclaggio' intorno alle rotture plastiche in relazione alla duttilità ed alla '*fatica oligociclica*' disponibile.

- LE STRATEGIE & LE SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Ne consegue con evidente immediatezza che, derivando il danneggiamento dall'energia che coinvolge il manufatto, tutto debba essere orientato alla sua gestione. A cominciare dall'*evitare che questa entri*, nel qual caso il problema del controllo della risposta è risolto all'origine, per proseguire creando opzioni di dissipazione il più strategiche ed efficienti possibile per limitare al massimo il danno e, in ultima analisi, prevenire il crollo.

In ordine di efficacia, intesa come livello di protezione, ovvero, di contenimento del danno, le strategie possono elencarsi quindi nelle seguenti.

1a EVITARE che l'energia entri nella struttura → massimizzazione della 'discordanza dinamica' tra terremoto atteso e struttura; ciò si può ottenere (vd. figura 2):

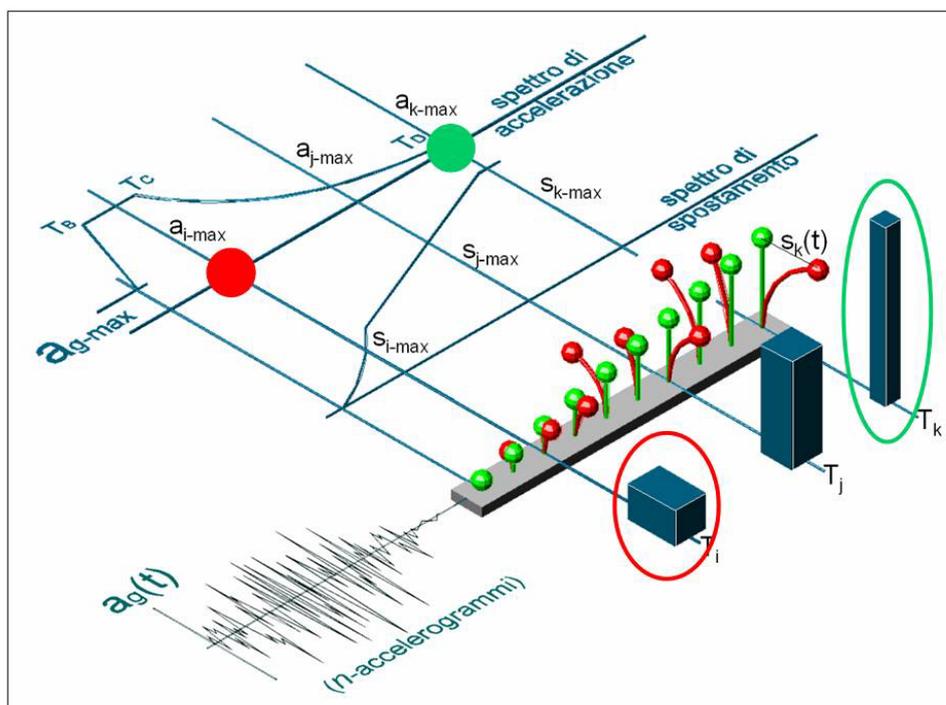


Figura 2: Correlazione della risposta dinamica strutturale con l'eccitazione sismica conseguente per un dato spettro di risposta

- a. per comportamento naturale: quando le strutture risultano 'isolate' per conformazione, ovvero vibrano in modo *disaccoppiato* rispetto alle principali caratteristiche dinamiche del terremoto (figura 3);
- b. per comportamento INODOTTO: realizzazione di una sconnessione **elastica** tra terreno e struttura mediante l'impiego di dispositivi di isolamento (figure 4 e 5 e Tavola1);
 - i. la rigidezza orizzontale è estremamente ridotta rispetto alla struttura;
 - ii. la deformazione si concentra nel piano di isolamento;
 - iii. l'eventuale capacità di assorbimento di energia durante il moto riduce gli spostamenti relativi tra terreno e struttura sia in termini di entità, che di numero di cicli.

NOTA 1.1: l'isolamento è un espediente tecnologico per la traslazione del periodo di risposta della struttura verso posizioni ad ordinata spettrale meno gravose; tale assunto presuppone che il sistema rimanga elastico; è pertanto consentito fare ricorso all'analisi elastica modale con riferimento allo spettro di risposta, eventualmente ridotto in funzione delle capacità dissipative del sistema adottato.

NOTA 1.2: essendo il comportamento elastico, a valle del terremoto non si hanno conseguenze di rilievo e non è pertanto richiesto nessun intervento post-sisma;

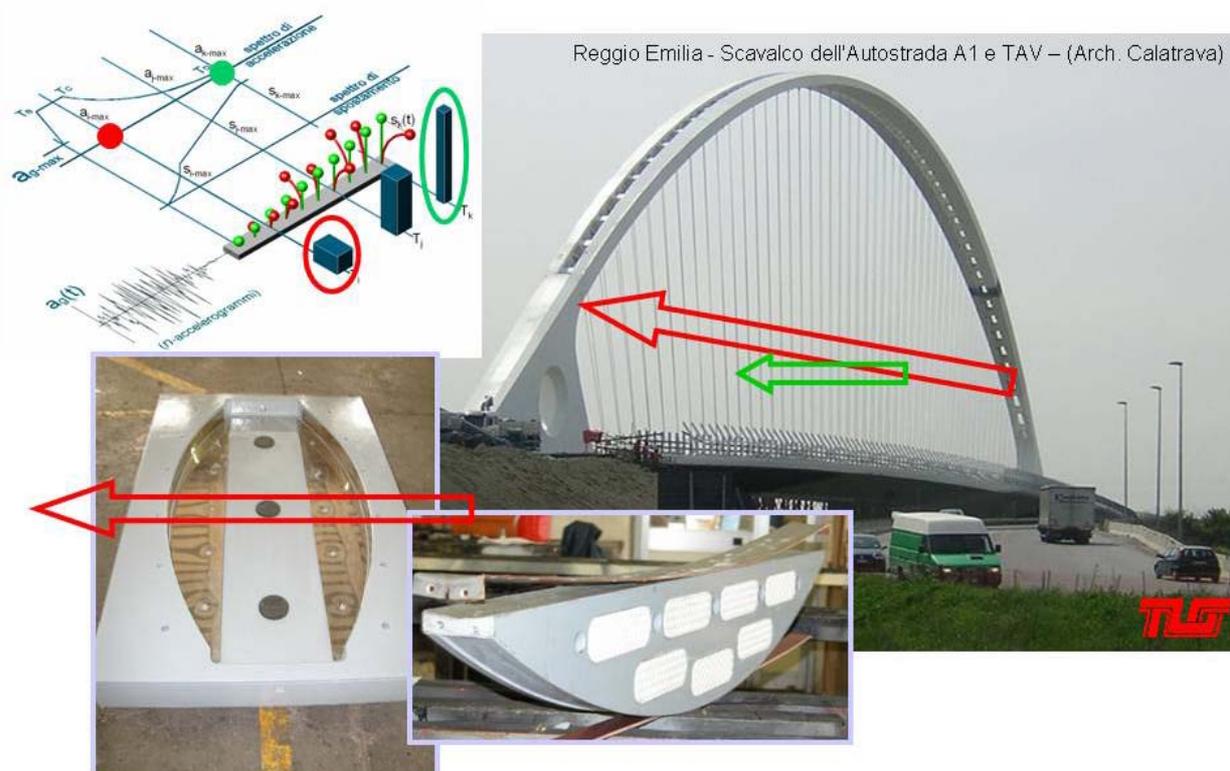


Figura 3: esemplificazione del 'peso' della risposta dinamica nella definizione delle sollecitazioni. Il vincolo sismico 'tradizionale' longitudinale evidenzia nel suo sbilanciamento geometrico il ruolo dell'azione conseguente nella direzione di massima risposta. Si noti la predisposizione alla rotazione nel piano conseguente alla grande deformabilità trasversale attesa, conseguente ad un periodo di risposta alto, che si traduce in una minore intensità dell'azione sismica.

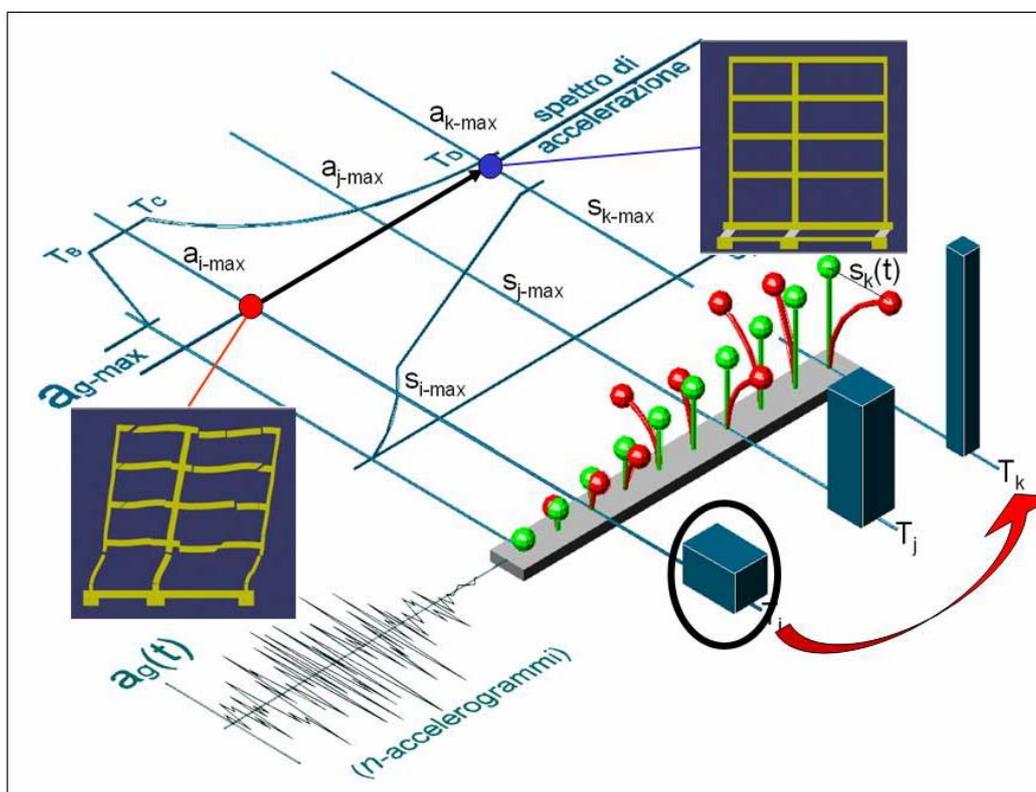


Figura 4: Effetto della traslazione del periodo di risposta mediante l'isolamento sismico

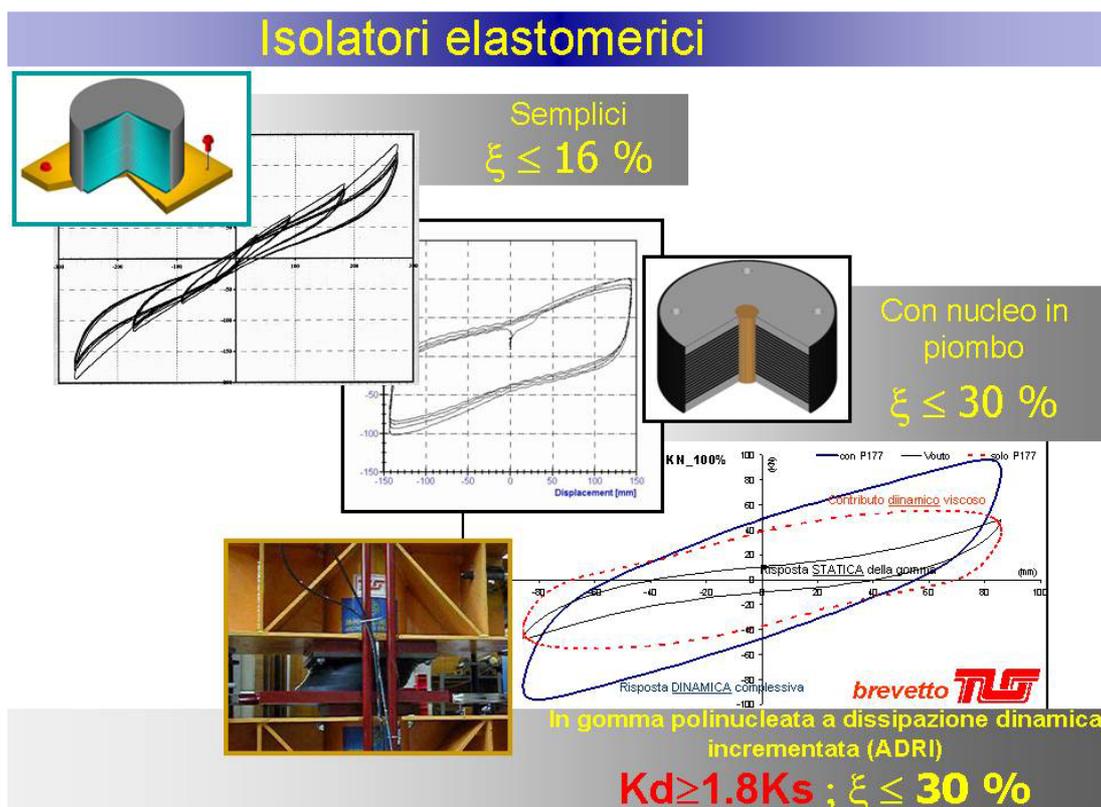


Figura 5: tipologie e relativi diagrammi di risposta dei più comuni isolatori in gomma.

2a **ACCETTARE** che l'energia possa investire la struttura, ma **dissiparla intercettandola in ingresso**, mediante inserimento di dispositivi *in serie* che realizzino una sconnessione a soglia (risposta elasto-plastica → fusibile strutturale – figura 6 e 7);

- a. la rigidità orizzontale iniziale è paragonabile a quella della struttura a base fissa;
- b. raggiunta la soglia resistente la deformazione si concentra nel piano di sconnessione ciclando plasticamente, con conseguente alta dissipazione energetica;
- c. la capacità di assorbimento di energia durante il moto riduce gli spostamenti relativi tra terreno e struttura sia in termini di entità, che di numero di cicli.
- d. la tecnologia fornisce
 - i. dispositivi di sacrificio, se l'assorbimento avviene per plasticizzazione di materiale (figura 6);
 - ii. dispositivi riposizionabili, se l'assorbimento avviene per viscosità (dispositivi oleodinamici – fig. 7); in questo caso il controllo della forza nel piano richiede la combinazione di dispositivi secondo due direzioni ortogonali essendo i dispositivi oleodinamici intrinsecamente unidirezionali.

NOTA 2.1: la risposta strutturale essendo complessivamente non lineare non consente di fare riferimento allo spettro di risposta ed il dimensionamento richiede pertanto il ricorso ad un'analisi al passo con accelerogramma spettrocompatibile;

NOTA 2.2: la strategia consente un ottimo controllo della forza, ma genericamente richiede il riposizionamento della struttura a valle del sisma (potenziale deformazione residua dei dispositivi); dalle prove effettuate su tavola vibrante la presenza di una coda nell'accelerogramma agevola il naturale recupero della posizione originaria;

NOTA 2.3: la bassa sensibilità alla fatica oligociclica di tali tecnologie consente di poter immaginare la conservazione degli elementi di sacrificio anche dopo un sisma, purché venga verificato mediante simulazione numerica il numero di cicli plastici subiti a fronte di quello a rottura.

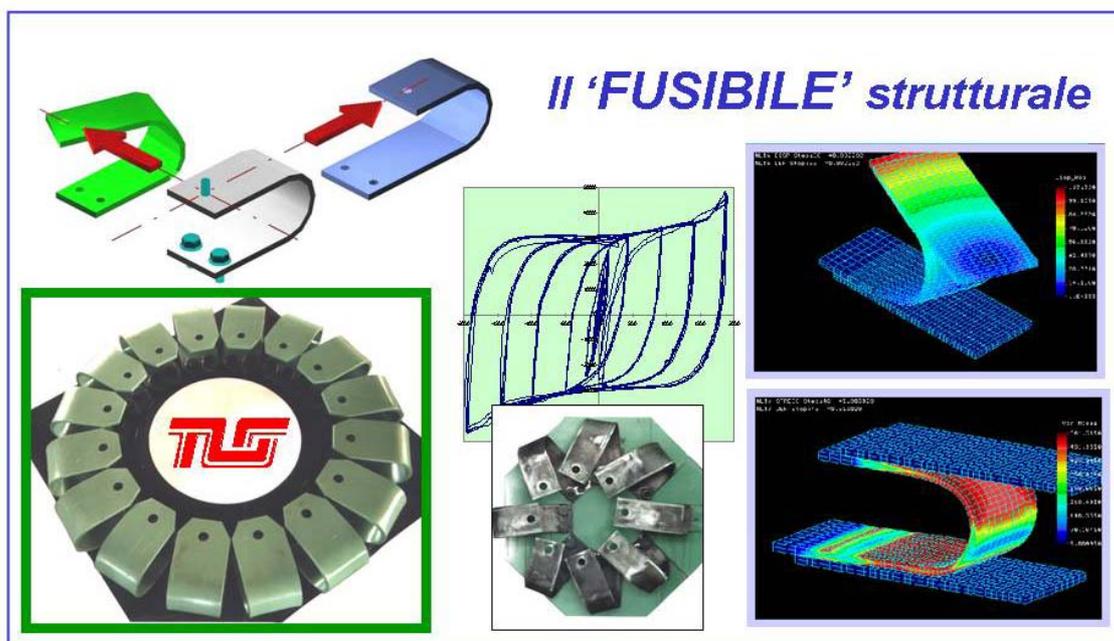


Figura 6: Dispositivo a soglia di impostazione meccanica per il controllo della risposta strutturale



Figura 7: Dispositivo a soglia di impostazione oleodinamica per il controllo della risposta strutturale

3a ACCETTARE che l'energia entri coinvolgendo la struttura, prevedendo però un controllo diffuso mediante l'inserimento di dispositivi in parallelo ad alta efficienza dissipativa che, limitando gli spostamenti di interpiano, risultano particolarmente efficaci nel limitare il danno sia strutturale che non strutturale (figura 8 e Tavola2).

NOTA 3.1: tali interventi sono sostanzialmente mirati a migliorare la risposta di strutture intelaiate esistenti; gli elementi in parallelo sono spesso strutture di controvento provviste di dispositivi ad alta efficienza sia dissipativa che a fatica.

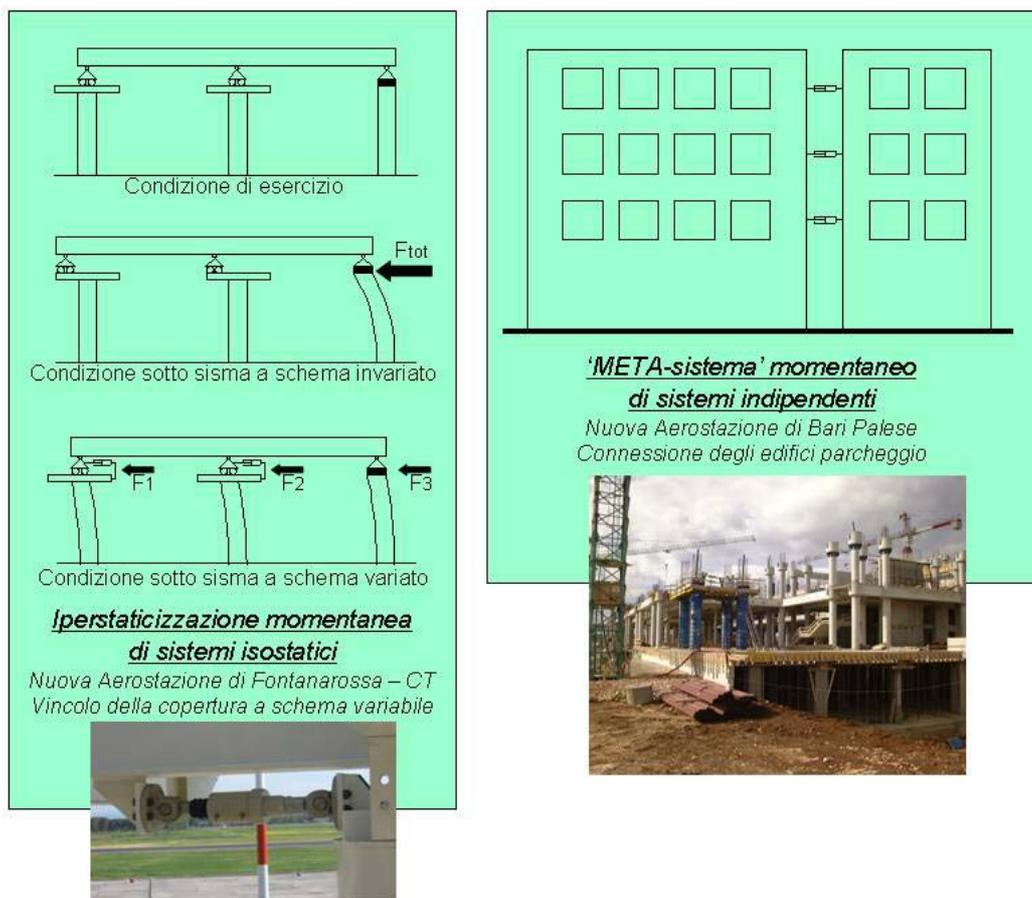


Figura 8: ruolo dei dispositivi di vincolo dinamico

4a ACCETTARE, come al punto precedente, che l'energia entri coinvolgendo la struttura, prevedendo ancora un controllo diffuso mediante l'ottimizzazione della risposta strutturale diretta: danno strutturale ritardato, diffuso, gerarchizzato ed efficiente:

- a. ritardato: mediante massimizzazione della risposta della struttura:
 - i. per coinvolgimento di tutti gli elementi resistenti disponibili (collegamenti strutturali);
 - ii. per rinforzo diretto di ogni singolo elemento (incremento di resistenza);
- b. diffuso: raggiungere il massimo numero di *rotture* prima del collasso corrisponde a massimizzare la dissipazione di energia;



- c. gerarchizzazione delle rotture: significa operare il rinforzo dei singoli elementi in modo che nel progredire del danno sia consentito di raggiungere il più alto numero possibile di rotture prima della labilizzazione strutturale (in un telaio ciò si traduce nel far sì che, nei nodi, si plasticizzino prima le sezioni di attacco delle travi e solo in ultimo quelle dei pilastri);
- d. efficienza: a significare che nel formarsi delle rotture, queste non siano di tipo *fragile*, ma presentino duttilità e capacità cicliche con conseguente elevata dissipazione energetica.

ESEMPLIFICAZIONI TECNOLOGICHE

1° strategia: l'ISOLAMENTO alla base.

Tradizionalmente si avvale dell'uso di dispositivi in gomma, che in funzione delle capacità dissipative possono differenziarsi in (figura 5):

- a. **gomma piena**: ovvero realizzati per successione di strati di gomma intercalati da lamierini in acciaio. La presenza dei lamierini è legata all'esigenza di contrastare l'espansione laterale del corpo di gomma, conferendo una alta rigidità verticale, quando ai dispositivi viene richiesto anche il trasferimento di carichi verticali; la risposta è assimilabile ad elastica;
- b. **gomma piena con nucleo in piombo**: sono della stessa tipologia di cui al punto precedente, con un nucleo centrale in piombo che conferisce maggiore dissipazione; la risposta del nucleo di piombo altera quella complessiva del dispositivo in una risposta elasto-plastica;
- c. **gomma polinucleata con liquido viscoso all'interno**: è una tecnologia sviluppata dalla TIS SpA in grado di fornire una risposta dinamica diversa da quella statica, con forte incremento di dissipazione di energia conseguente al contributo viscoso della pasta contenuta all'interno, che si esplica solo per deformazioni di tipo dinamico;

Proprietà comuni a tali tecnologie sono la semplicità strutturale e l'affidabilità conseguente alla mancanza di parti delicate esposte, articolazioni strutturali complicate, una intrinseca protezione agli agenti/fattori di invecchiamento, una sostanziale assenza di manutenzione.

2° strategia: il CONTROLLO IN INGRESSO dell'energia.

Come anticipato, tale strategia si estrinseca nell'adottare dispositivi a soglia, che consentono un eccellente controllo del livello di forza scambiato tra due parti strutturali connesse, a scapito di uno spostamento relativo di tipo plastico.

- a. **MECCANICI** (figura 6): una tecnologia estremamente efficace messa a punto dalla TIS SpA è quella relativa all'impiego di elementi in piatto metallico ripiegati ad U, di opportuno spessore. In relazione alla composizione degli elementi dissipativi, la risposta di tali dispositivi può essere sia assialsimmetrica, che differenziata secondo due direzioni principali.



- b. **OLEODINAMICI (figura 7):** nel caso di risposta a soglia hanno il vantaggio di poter essere riposizionabili senza manifestare alcuna conseguenza strutturale dopo il cimento sismico.

3° strategia: il CONTROLLO DIFFUSO dell'energia per inserimento di dispositivi in parallelo.

Nel caso di strutture intelaiate tradizionali (a base fissa) è possibile conseguire una forte dissipazione dell'energia inserendo all'interno delle maglie di telaio elementi di controvento dotati di dispositivi in grado di fornire alta dissipazione con piccoli spostamenti. Il contributo dei dispositivi è condizionato al mantenimento della struttura in regime elastico o appena oltre la fessurazione.

a. RISPOSTA A SOGLIA:

- i. **MECCANICI (Tavola2):** in questo caso la TIS SpA ha messo a punto una tecnologia estremamente efficace in quanto il potenziale dispositivo dissipativo è stato ricavato direttamente nelle piastre di coprigiunto di collegamento tra la struttura di aggancio al nodo strutturale e l'asta di controvento. Tramite lavorazione meccanica viene ricavata per riduzione dello spessore una zona a plasticizzazione per taglio. Dopo l'eventuale deterioramento sismico è sufficiente la semplice sostituzione della piastra di coprigiunto con una nuova senza altra necessità di intervento.
- ii. **OLEODINAMICI:** dispositivi di tipo oleodinamico possono essere interposti tra maglia di controvento (a V rovescia) e struttura per fornire il contributo dissipativo.

b. RISPOSTA ELASTICA:

- i. ricorrendo ai controventi realizzati con fili in Leghe a Memoria di Forma (**Tavola3**), è stata ampiamente dimostrata la grande capacità di richiamare la struttura, anche dopo forti deformazioni, alla sua posizione originale senza alterazione della capacità portante. Per limitare gli spostamenti possono essere previsti dispositivi a dissipazione viscosa posti in parallelo al sistema di richiamo elastico. L'alta efficienza dimostrata rende tale tecnologia estremamente efficace su strutture a telai snelli dove si massimizza l'efficacia del richiamo elastico anche a fronte di possibili cernierizzazioni nei nodi.

4° strategia: a CONTROLLO DIFFUSO dell'energia per ottimizzazione del comportamento strutturale

Ottimizzare la risposta strutturale significa perseguire il più alto livello di risposta che essa è in grado di dare.

E' ovvio che prima di aumentare la resistenza di ogni singolo elemento strutturale sia opportuno che tutti gli elementi in grado di dare un contributo siano coinvolti nel momento opportuno. Ciò sta a significare la necessità di realizzare collegamenti che riconducano la risposta, altrimenti affidata a singoli elementi, ad una risposta *globale*.

Questo discorso ha validità sia per le strutture nuove che per quelle esistenti, in particolare in muratura.



In molte strutture, dove sono presenti esigenze di spostamenti relativi in esercizio dovuti ai fenomeni lenti, ci si trova nella necessità di avere un vincolo fisso (cerniera) rispetto a n vincoli mobili (carrelli). Tipico esempio (figura 8) sono le grandi coperture su molteplici punti di appoggio o gli impalcati continui di viadotto. In queste situazioni l'azione sismica viene normalmente a concentrarsi sull'unico vincolo fisso. Gli elementi su cui insistono i carrelli non partecipano, infatti, all'assorbimento di alcuna aliquota di tale azione.

I dispositivi di accoppiamento dinamico consentono invece di poter coinvolgere ogni elemento resistente evitando la concentrazione dell'azione su un unico punto. Questo con evidente miglior funzionamento strutturale, ridondanza nella risposta, possibilità di ottimizzazione delle dimensioni e delle resistenze dell'unico elemento altrimenti coinvolto, con maggiore estetica, il più delle volte, del manufatto finale.

Per quanto attinente alle murature, molto spesso slegate tra loro o comunque poco collaboranti per via di cattivi collegamenti lungo il contorno di contatto sia tra le pareti, che con gli orizzontamenti, si propone di seguito un sistema (CAM – Cucitura Attiva dei Manufatti) che si è dimostrato assai efficace superando simulazioni al vero estremamente severe. Nei paragrafi successivi viene dedicato spazio specifico a tale presentazione,

Per concludere invece la panoramica sulle strutture intelaiate in cemento armato si accenna al sistema DIS-CAM sviluppato per il controllo della gerarchia delle resistenze, oltre che per il rinforzo e incremento della duttilità delle sezioni di nodo.

Il DIS-CAM (Tavola7) è basato su un elemento di nodo realizzato con un profilo metallico angolare lavorato in modo da presentare una opportuna riduzione di sezione tale per cui la reazione è differenziata in relazione al piano di azione della forza.

In particolare per azione agente sull'ala integra la risposta sarà di tipo flessionale, condizionata dalla riduzione di spessore su quella ortogonale. Per azione agente sulla faccia 'lavorata' la reazione è invece di trazione con maggiore resistenza e rigidità. Ponendo quindi, opportunamente collegato, l'elemento in aderenza al nodo, in particolare con l'ala 'ridotta' aderente al pilastro, si ottiene un incremento di resistenza della sezione di pilastro, mentre la trave avrà la 'precedenza' nel parzializzarsi, comportando, nella rotazione conseguente, un notevole contributo dissipativo per via della plasticizzazione flessionale della sezione ridotta.

E' evidente come, in questo modo, sia possibile, oltre ad un incremento di resistenza e di dissipazione complessiva di nodo, ottenere anche l'importante prestazione del ricondizionamento della gerarchia delle resistenze, forzando la cernierizzazione prima nelle sezioni di trave e, quindi, successivamente nel pilastro, ottenendo la massimizzazione dell'efficienza nella risposta strutturale.

E' altresì da sottolineare quanto sia importante che il collegamento dell'elemento di rinforzo avvenga mediante Cucitura Attiva (CAM), ovvero attraverso cerchiaggio *in forza* della sezione.

Ne rende efficace dimostrazione la prova eseguita presso il Laboratorio del DiSGG (Dipart. Strutture Geologia e geotecnica) dell'Univ. della Basilicata su provini di pilastro privi di armatura e rinforzati con diverse tecniche di consolidamento (figura 9).

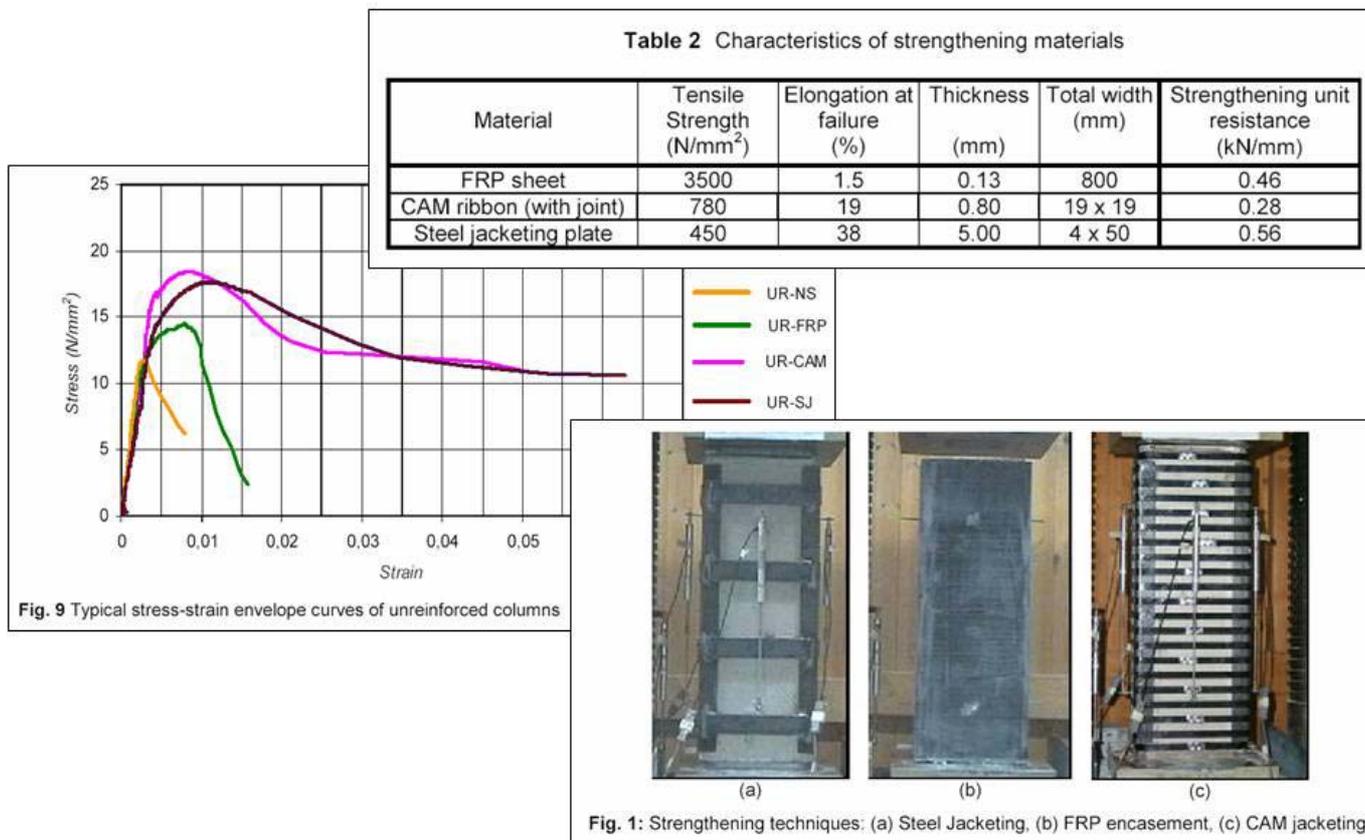


Figura 9: *comparazione dell'efficacia del confinamento attivo mediante il sistema CAM rispetto alle tecnologie alternative: angolari con calastrelli e fasciatura in teli di carbonio.*

A fronte del comportamento di riferimento del pilastro nudo di campione, si evince come sia il sconfinamento realizzato con fibre, che quello con angolari e calastrelli, comportino comunque un dissesto del pilastro (cambio di rigidità oltre la resistenza massima del pilastro nudo) prima che sia attivato il contributo portante, per altro con poco guadagno e nessun incremento duttilità verticale nel caso delle fibre:

Tra calastrelli e rinforzo con il CAM l'incremento di resistenza è assolutamente paragonabile, così come il guadagno in duttilità. Vale però la pena soffermarsi su tre aspetti relativi al CAM:

- fino al raggiungimento del carico massimo il pilastro all'interno è rimasto perfettamente integro: la rigidità infatti non ha cambiato di pendenza;
- il sistema ha richiesto molto meno materiale, circa la metà, a dimostrazione del fatto che il rinforzo è intrinsecamente più ottimizzato;
- l'affidabilità è molto maggiore in quanto il ruolo del confinamento e la coazione sono sotto stretto controllo essendo il pretensionamento attuato mediante dispositivo meccanico tarato.

IL SISTEMA CAM PER IL RINFORZO DELLE MURATURE

Nelle costruzioni tradizionali in muratura, cui appartiene una larga percentuale del patrimonio edilizio nazionale, la struttura dell'apparecchio murario è molto spesso disordinata. Ne consegue che l'eventualità di collasso è legata principalmente alla perdita di equilibrio, sia locale, che globale, piuttosto che al superamento delle caratteristiche resistenti degli elementi lapidei. Le Cuciture Attive (CAM) si presentano come un sistema efficacemente idoneo sia alla ricompattazione del tessuto murario in se, che al collegamento dei vari paramenti murari tra loro.

Esso si basa (figura 10) sulla realizzazione di una serie di cuciture con nastro di acciaio richiuse in forza su se stesse, con un carico di pretensionamento predeterminato (nelle murature di circa 4500 N). Si comprende quanto possa essere preziosa l'azione di confinamento e di legatura dei paramenti murari nell'ipotesi di una muratura a sacco, realizzando tale applicazione una sorta di microincatenamento diffuso. Nella continuità che si ottiene nel procedere di foro in foro fino al completamento del reticolo nei vari campi di parete, si attiva inoltre la possibilità per la muratura di disporre di cospicue riserve a trazione, utilissime nell'incrementare la resistenza alle azioni agenti ortogonalmente al piano.

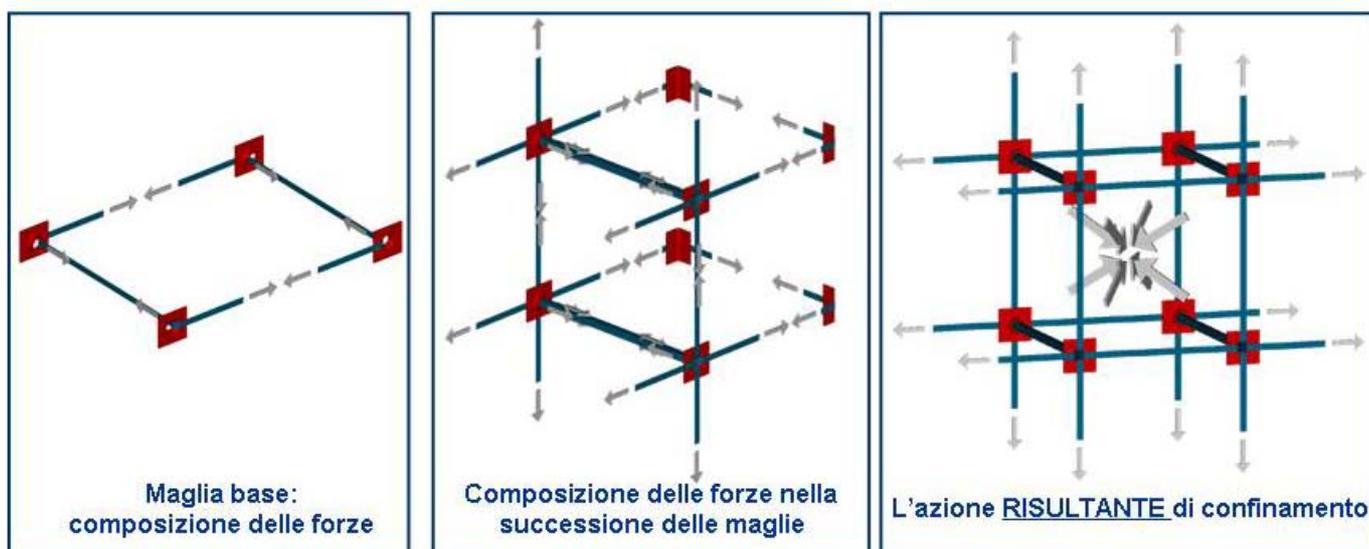


Figura 10: Sistema CAM: schemi base della composizione delle forze nell'azione di confinamento/compattazione esercitata dal sistema in opera

Le cuciture, che sono ottenute impiegando un nastro sottile di acciaio inossidabile opportunamente stirato e ad altissima duttilità (40% di allungamento a rottura), possono essere adeguatamente dimensionate sia in distribuzione che in spessore: fino a 3-4 avvolgimenti sovrapposti nelle cuciture diffuse; fino a 6-8 avvolgimenti sovrapposti negli incatenamenti. Ogni avvolgimento è sempre e comunque indipendente dagli altri e singolarmente richiuse su se stesso.

I nastri d'acciaio realizzano un sistema continuo di tirantatura, in grado di adattarsi alle irregolarità della muratura, sia in orizzontale, lungo tutta la parete rinforzata, che in verticale, per tutta l'altezza. Le forze di



compressione contribuiscono a migliorare sia la resistenza a taglio che la resistenza flessionale dei singoli maschi murari e delle pareti nel loro insieme.

Tale intervento risponde ai più aggiornati criteri del restauro miranti alla affidabilità ed alla reversibilità delle operazioni eseguite ed è previsto sia dalla Circolare Ministeriale LL.PP. del 10 aprile 1997, n. 65/AA.GG. (Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche" di cui al D.M. 16 gennaio 1996), sia dall'O.P.C.M. 3431.

Per una distribuzione ad orditure orizzontale e verticale ,lo schema resistente di riferimento è la maglia triangolare che ne consegue, dove ai due cateti in trazione, i nastri di acciaio, corrisponde una ipotenusata compressa, la biella in muratura.

La presenza delle cuciture viene computata sommando la resistenza a taglio espressa dalle formule convenzionali, al contributo relativo ai nastri sia orizzontali, che verticali, considerando i cinematismi di rottura con riferimento al PLV

L'eventuale rottura per presso flessione, generalmente, si manifesta prima mediante lo schiacciamento del piede della parete e dopo, per pareti molto snelle, mediante il rocking, ossia il ribaltamento dell'intero maschio murario. Si può tenere conto della resistenza a presso flessione del pannello adottando un legame costitutivo parabola-rettangolo a compressione ed elasto plastico a trazione, considerando l'incremento a pressione dovuto al confinamento e quello a trazione legato alla presenza delle tirantature.

E' attualmente disponibile un codice di calcolo automatico per il dimensionamento degli interventi (www.edilcam.com)

I principali vantaggi strutturali connessi all'applicazione del sistema di tiranti attivi per il miglioramento del comportamento strutturale possono pertanto riassumersi nei seguenti:

- incremento della resistenza a compressione degli elementi strutturali, attraverso il contenimento della dilatazione della sezione trasversale;
- incremento della resistenza a taglio indotto dalla presollecitazione verticale;
- incremento della duttilità.

Inoltre:

- ruolo attivo dell'armatura che, imprimendo uno stato di precompressione alla muratura, ne ritarda la formazione di lesioni e sconnessioni, aumentandone la resistenza;
- la resistenza dell'acciaio viene ampiamente sfruttata in quanto, già a valle di piccole deformazioni, per via del pretensionamento, è in grado di offrire il massimo contributo;
- l'utilizzo dell'acciaio inox garantisce una consistente duttilità d'insieme, incrementando le riserve di sicurezza nelle condizioni limite di lavoro della struttura;
- la tecnologia è reversibile, poco invasiva e facilmente celabile e pertanto estremamente adatto in miglioramenti/adeguamenti/consolidamenti di beni culturali (figura 11);

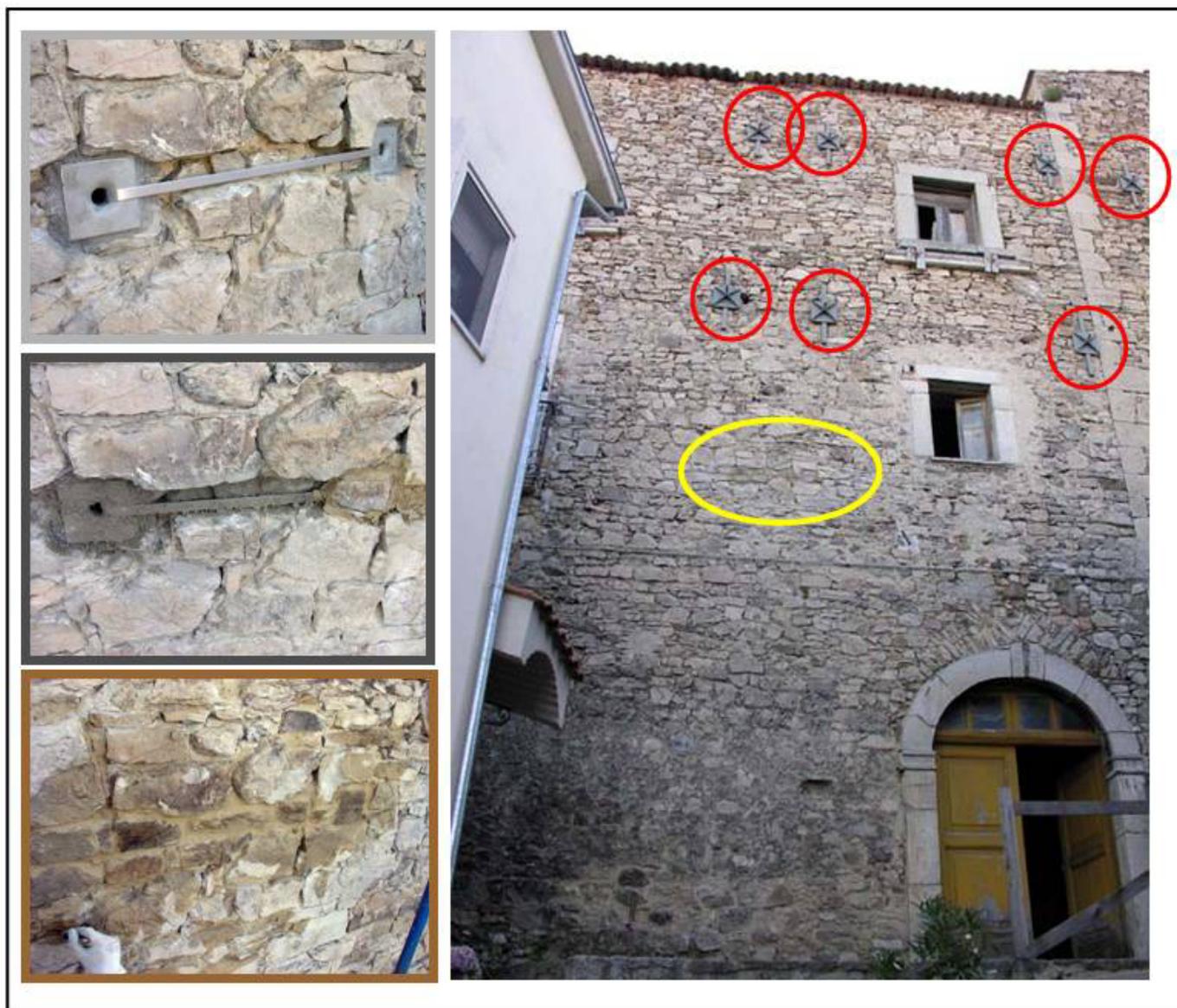


Figura 11: Castello di Lupara (CB) – evidenza dell'esito formale dell'intervento di incatenamento (catena binata realizzata con il sistema CAM – contorno giallo) a fronte delle testimonianze degli incatenamenti precedenti di tipo classico (capochiave – cerchiature rosse)

- l'acciaio inox garantisce l'affidabilità nel tempo del sistema;
- l'efficacia delle legature trasversali e dei collegamenti tra avvolgimenti adiacenti è assicurato meccanicamente in maniera totalmente controllabile ed affidabile;
- facilità di realizzazione ed affidabilità dei collegamenti in verticale anche tra piani successivi e senza demolizione dei solai, con miglioramento delle caratteristiche flessionali delle pareti anche per azioni fuori piano;
- consente l'adozione di intonaci tradizionali, senza l'alterazione delle masse strutturali;
- il sistema risolve il problema delle connessioni tra pareti ortogonali, l'incatenamento di pareti non rettilinee ed i collegamenti dei cordoli alle pareti (figura 12).

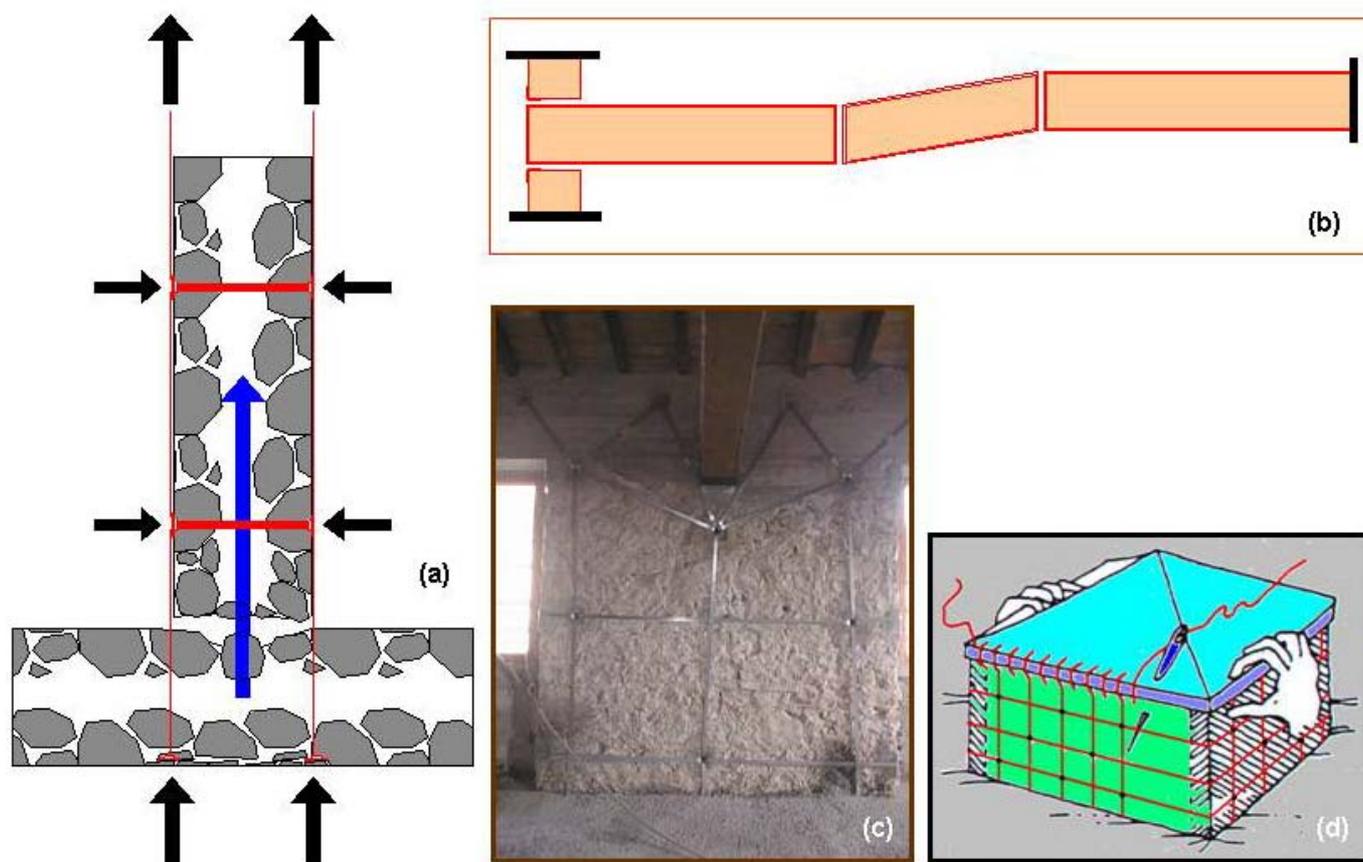


Figura 12: Sistema CAM – a) efficacia degli incatenamenti tra pareti ortogonali; b) possibilità di seguire agevolmente andamenti non rettilinei; c) legatura dei cordoli; d) comportamento 'a scatola'.

- l'adattabilità e la piena efficacia anche nelle applicazioni a pareti geometricamente irregolari,
- la piena compatibilità con gli impianti, facilmente aggirabili grazie alla flessibilità del sistema e sempre accessibili,
- la possibilità di effettuare interventi "chirurgici", rapidi e limitati a singole porzioni di muratura, senza dover demolire gli intonaci e gli impianti.

Tra le tecnologie alternative se ne rammentano, evidenziandone gli aspetti maggiormente contrastanti, le due più diffusamente utilizzate.

L'intonaco cementizio armato, realizzato con rete elettrosaldata di acciaio ordinario al carbonio, presenta una serie di inconvenienti, ampiamente verificati nelle innumerevoli applicazioni realizzate dal '76 ad oggi, consistenti principalmente: nel funzionamento passivo delle armature, efficaci solo dopo deformazioni e sconessioni nella muratura; nei limitati incrementi di resistenza, il cui limite superiore è determinato dall'aderenza tra intonaco e muratura; nella bassissima duttilità; nell'estrema invasività, nella forte deperibilità nel tempo, nella scarsa efficacia dei collegamenti tra pannelli di rete, dei collegamenti trasversali, ove presenti, e dei collegamenti tra piani successivi, ove presenti, nella scarsa efficacia del collegamento tra pareti ortogonali, nel non trascurabile incremento delle masse ($\approx 100-200 \text{ kg/m}^2$ di parete) e, infine, nel peggioramento delle condizioni termogrometriche.



Analogamente può ritenersi per lo meno incerta l'efficacia conseguita mediante l'uso di fasce e/o teli in fibra di carbonio, essendo questa di fatto del tutto dipendente dall'interfaccia con la muratura, con tutti i dubbi che possono conseguire da banali considerazioni di affidabilità oggettiva, quali il modo in cui vengono chiamati a collaborare materiali estremamente eterogenei tra loro, oltre che la forte dipendenza legata alla cura della posa. Fermo restando che alcun contributo possono addurre all'incremento a compressione della muratura lì ove tali fasce corrano per ampie lunghezze e, come sempre accade, non siano richiuse in cerchiaggi ben proporzionati. Inoltre non si ottiene significativo incremento di duttilità non avendone la fibra, il cui comportamento è notoriamente rigido-fragile. La fortissima differenza di comportamento tra muratura e fibra rende inoltre poco coerente l'abbinamento, con conseguenti pericolose concentrazioni di carico.

I costi dell'applicazione del CAM sono significativamente variabili, in relazione al tipo di intervento ed alle quantità coinvolte. Il sistema CAM, contrariamente ad altre tecnologie come quella dell'intonaco cementizio, va progettato e calibrato in relazione alle effettive esigenze di rafforzamento. Facendo riferimento all'intervento tipico di rafforzamento antisismico mediante reticolo a maglia quadrata o rettangolare, il costo è funzione, ovviamente, del lato della maglia, perché da esso dipendono sia la quantità di materiale (nastri, piastre e angolari in acciaio inossidabile), sia le lavorazioni richieste. Facendo riferimento ad una maglia quadrata di lato 50-55 cm, o rettangolari equivalenti, con rafforzamento costituito da doppio nastro sovrapposto, il costo di applicazione del CAM, con esclusione di stonatura e/o tracce nell'intonaco e successiva intonatura, è dell'ordine dei 120-200 Euro per mq di parete (ovviamente per entrambe le facce). Occorre, peraltro, ricordare che l'adozione del CAM risolve anche i problemi di connessione tra pareti ortogonali, problemi che, nel caso di adozione di altri tipi di intervento di rafforzamento delle murature (intonaco cementizio armato o fibre) richiederebbero interventi aggiuntivi mediante iniezioni armate di costo elevato e notevole invasività.

Per quanto riguarda la durata, come già detto in precedenza, l'adozione sistematica dell'acciaio inossidabile garantisce livelli di affidabilità certi ed elevatissimi, sicuramente irraggiungibili con altre tecnologie.

A sottolineare l'efficacia del sistema, si ritiene a questo punto particolarmente significativa l'esperienza condotta nell'ambito del progetto TREMA (vd Tavola8), condiviso tra TIS SpA, Università della Basilicata, Servizio Sismico Nazionale ed ENEA (Casaccia-Roma).

Molto sinteticamente, a maggior ragione perché l'evidenza dei risultati è di per se stessa estremamente eloquente, l'esperimento ha indagato, per procedura comparativa, l'efficacia del CAM su strutture murarie fortemente vulnerabili, a sacco, con malta povera e distribuzione strutturale irregolare.

Sono state realizzate con minuziosa cura (gli elementi lapidei, per rispettare i criteri della tessitura ed organizzazione della muratura sono stati sgrossati singolarmente) due costruzioni in scala pseudo-reale: 1 a 1.5. Muratura a sacco. Malta povera. Due piani. Solai in legno, non rigidi nel piano. Distribuzione delle masse e delle rigidità fortemente irregolare mediante aperture opportunamente distribuite sui quattro lati.

Le due strutture sono state quindi poste su tavola vibrante e portate, per incrementi di accelerazione di picco di 0.5 g fino a rottura, per quello 'nudo' di riferimento, e fino a livelli di accelerazione esaustivi, per quello rinforzato con criterio di adeguamento. Quale input sismico è stato utilizzato l'*accelerogramma di Colfiorito del Terremoto Umbria Marche 1997*.

Il risultato riteniamo non lasci dubbi in merito (figura 13).

Modello 'nudo'

- a 0.15g ha manifestato distacchi strutturali per separazione delle pareti e caduta di parti murarie tali da configurarsi inagibile e fortemente pericolante;
- a 0.30 g si è avuto il crollo rovinoso;

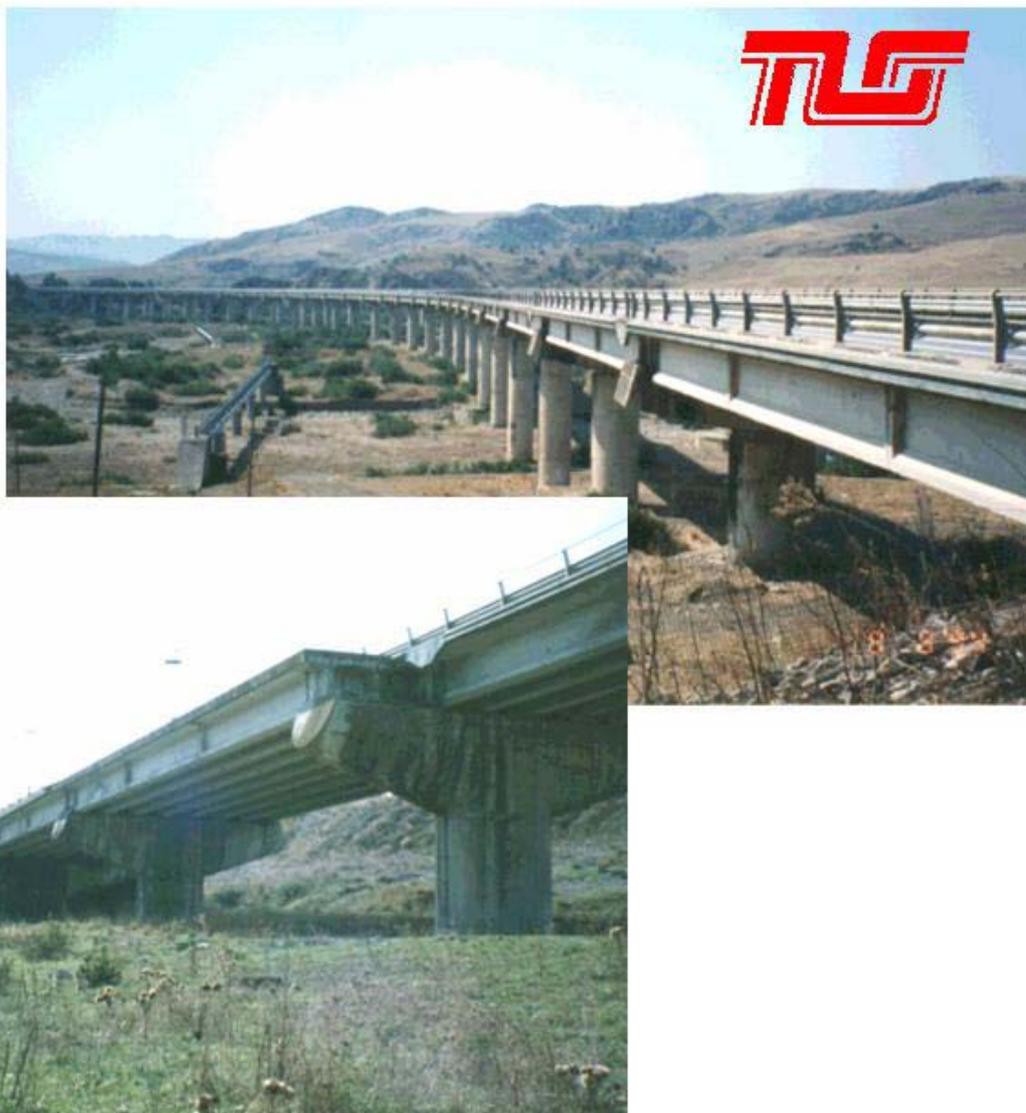
Modello ADEGUATO con il CAM

- Massima accelerazione efficace: 1.0 g
- Lesioni e piccoli crolli localizzati
- Piena efficienza strutturale



Figura 13: Sistema CAM – comparazione esiti dopo prova su tavola vibrante presso il Laboratorio ENEA (Casaccia – RM)

TAVOLA I



**Intervento Esteso di Adeguamento Sismico
Infrastrutturale - SICILIA (in fase di conclusione)**

Collegamento Autostradale A19 PA-CT

n. 25 VIADOTTI

n. 1112 HDRI - High Damping Rubber Bearing

n. 1314 LRI - Lead Rubber Bearing

n. 244 ADRI - Added Damping Rubber Bearing

TAVOLA II



The Palm Jumeirah Access Bridge – DUBAI - EMIRATES



Static scheme:	6*60 mt continuous spans
Construction modality:	casting in situ
Number of HDRI:	58
HDRI dimensions (mm):	1150*900*410 (max)
Maximum preregulation (mm):	75
Structural Engineer:	Leonardth, Andra und Partner
Supervisor Authority:	PARSON Ltd



TAVOLA III



Fasi relative alla posa ed alla realizzazione della struttura in corrispondenza di un isolatore

n.6 ADRI - Added Damping Rubber Isolators (TIS SpA)

n.12 SM - Slitte Multidirezionali (TIS SpA)



Ragusa - CASA PRIVATA isolata (in costruzione)

TAVOLA



**Potenza – Scuola Domiziano Viola – Adeguamento sismico
 Controventi con coprigiunti dissipativi – TIS SpA**

TAVOLA V



**Progetto TREMA (SSN/DPC-UniBA-ENEA-TIS)
 Bagnoli - Prove di rilascio su telaio al vero**

**Adeguamento con controventi ricentranti
 Controventi in Leghe a Memoria di Forma (NITINOL)**

**Spostamento impresso: 7 cm
 Spostamento residuo: 0 cm**



Diagramma esemplificativo Forza-Spostamento di un controvento in LMF alla stato Austenitico

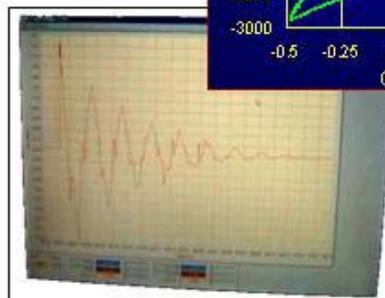
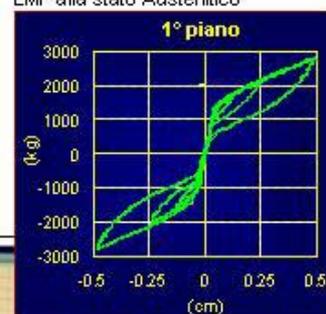


Diagramma Spostamento-Tempo con evidenza della capacità di recupero della posizione indeformata e dell'alto smorzamento

TAVOLA VI



Nuova Aerostazione di Fontanarossa – CT

Piazzale transiti isolato
 n. 18 isolatori ADRI 640/2.70/±210
 n. 20 slitte TDM 640/±210

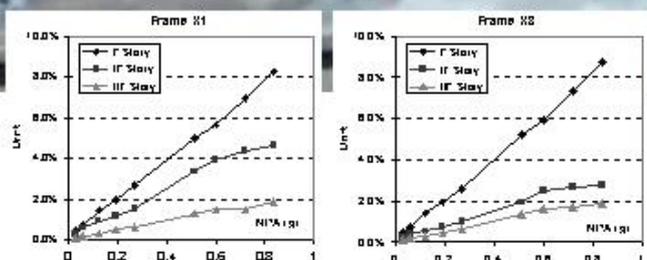
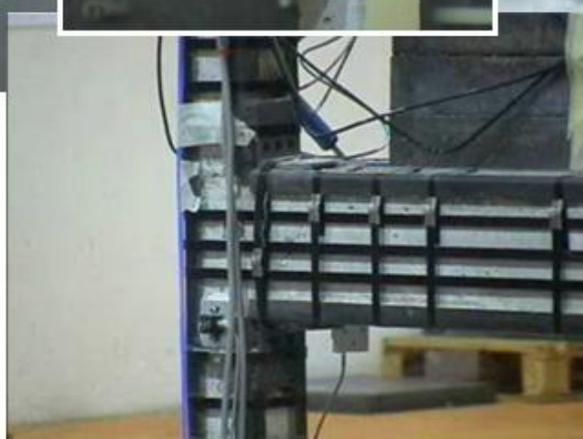
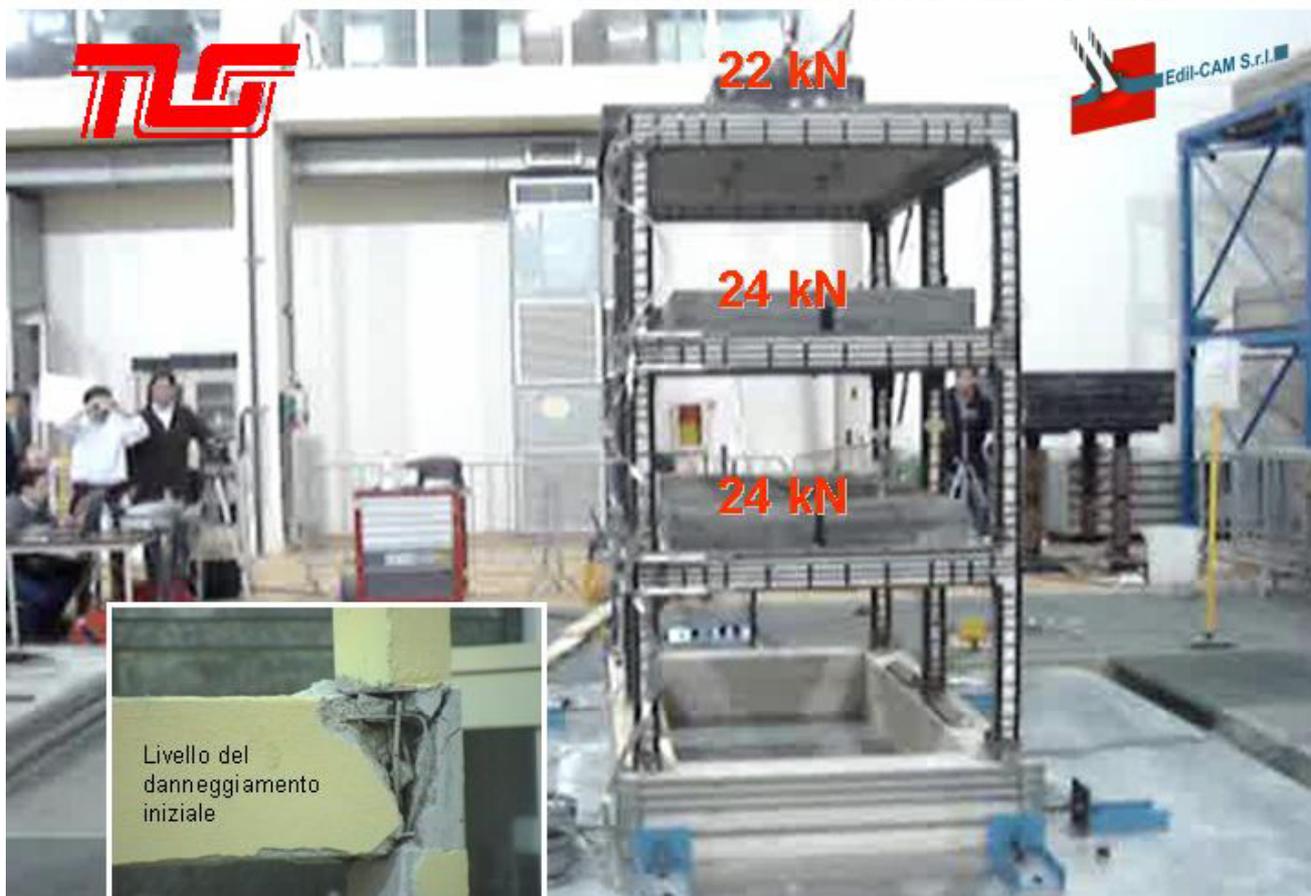
Rampe di accesso isolate
 n. 4 isolatori ADRix 2.70/±290
 n. 6 isolatori ADRix 1.40/±290
 n. 52 slitte TDM 270/±290

Copertura con dispositivi di accoppiamento dinamico
 n.36 ACP35/±50



TAVOLA VII

**Sistema DIS-CAM per il
 Rafforzamento e aumento delle capacità dissipative tramite dispositivi di nodo**



Progetto TREMA
 Laboratorio prove dinamiche ENEA Casaccia (RM)
 Modelli 3D, scala 1:4
 Adeguamento con **DIS-CAM** su mod. danneggiato
 Accelerogramma di Northridge PGA **0.84g**

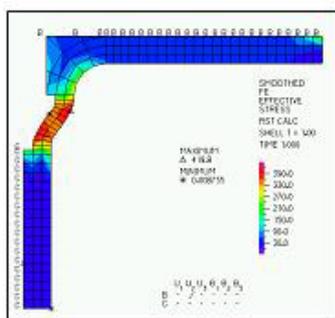
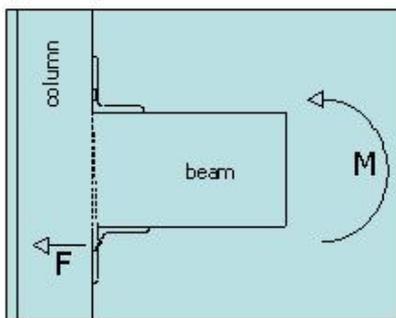
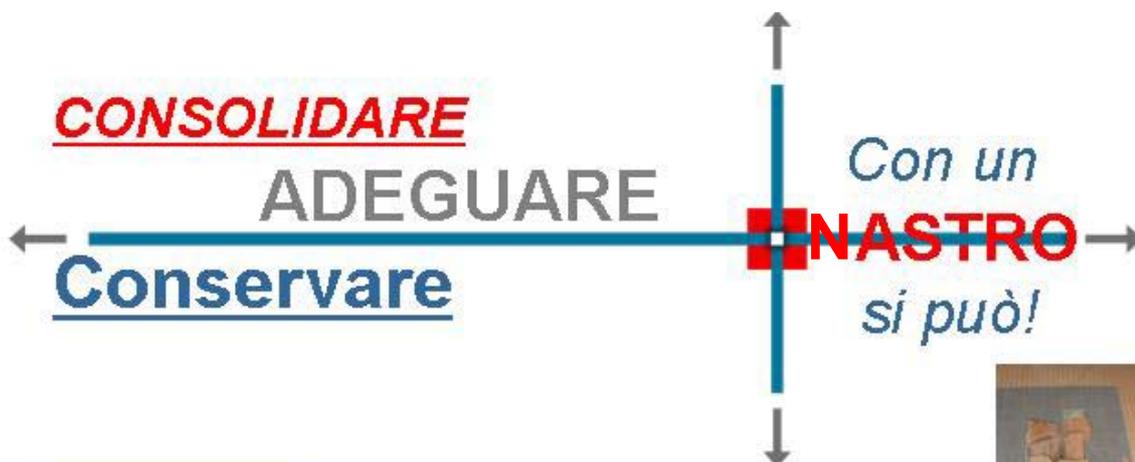


TAVOLA VIII



Progetto TREMA (www.unibas.it/trerem/index.htm)
 ENEA Casaccia (Roma) – Laboratorio prove dinamiche
 Modelli gemelli, scala 1:1.5
 Terremoto Umbria Marche 1997
 Accelerogramma di Colfiorito scalato
 Muratura a doppio paramento - Legante povero



(dicembre 2006)
 Modello di riferimento originale **a fine** prova
 Massima accelerazione efficace: **0.3 g**
Esito:
COLLASSO TOTALE



25 kN
 Masse
 aggiuntive
 25 kN

(novembre 2006)
 Modello rinforzato con CAM **a fine** prova
 Massima accelerazione efficace: **1.0 g**
Esito:
 -Lesioni e piccoli crolli localizzati
 -Piena efficienza strutturale
 -Si noti la zona intonacata praticamente integra

Grande incremento della Resistenza
 Elevata Duttilità Strutturale
 Durabilità (nastro in acciaio INOX)
 Facilità/Rapidità di posa
 Economia globale
 Leggerezza

Il sistema CAM

Cuciture Attive dei Manufatti



Reversibilità
 ... e molto altro!

**LICENZIATARIA
 ESCLUSIVA
 per l'applicazione**

Edil-CAM Srl
 V.le dei Caduti per la Resistenza, 79 - 00128
 ROMA
 Tel. 06/507.36.02 - fax.06/507.00.46
www.edilcam.com - e.mail: edil-cam@libero.it

