

# Strategie e strumenti per il progetto di interventi di rinforzo su muratura portante

Ing. Alessandra Bazzarin – CDM DOLMEN Srl

*Intervenire sul patrimonio edilizio della muratura esistente non è semplice: le problematiche sono varie e quindi la scelta della corretta strategia è essenziale: come può aiutarci un software? Scopriamo insieme gli strumenti DOLMEN di aiuto alla progettazione dell'intervento di rinforzo*

La schematizzazione del comportamento strutturale di un materiale complesso, disomogeneo ed altamente non lineare quale è la muratura, non è sicuramente semplice e questa complessità si evidenzia anche e soprattutto nella progettazione degli interventi sulle murature esistenti.

Un edificio in muratura, e questo vale in principal modo per le murature storiche, è una **struttura complessa**, ove tutti gli elementi cooperano nel resistere ai carichi applicati: ne consegue che il progetto di intervento e l'analisi strutturale richiedono spesso **notevoli semplificazioni**, e a volte lo studio di uno stesso edificio **sotto differenti aspetti**.

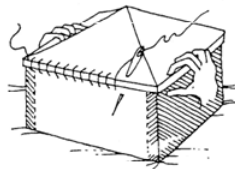
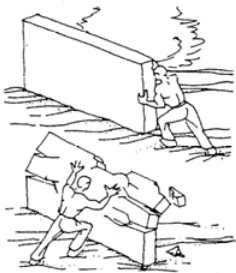


figura da Touliatos, 1996

L'edificio in muratura dovrebbe comportarsi come un organismo: il meccanismo scatolare di risposta alle azioni esterne (sisma, carichi) prevede una redistribuzione tramite un collegamento rigido di piano fra le pareti, che fa sì che ogni parete risponda unicamente alle azioni nel suo piano, in quanto la resistenza dei muri a forze agenti nel piano del muro è molto maggiore rispetto a quella in caso di forze agenti ortogonalmente al piano.



Meccanismo di primo modo



Meccanismo di secondo modo

Quando studiamo la scatola muraria diamo per scontato che questa ripartizione scatolare delle azioni esista, ma nelle strutture esistenti ciò non è garantito, e costituisce invece un'ipotesi di base, che potremmo dover realizzare in un secondo momento con interventi di rinforzo atti a scongiurare i meccanismi di primo modo, cioè i cinematismi connessi al comportamento delle pareti murarie al di fuori del proprio piano.

Focalizziamo per ora l'attenzione sulle verifiche relative ai **meccanismi di secondo modo**, cioè a quelle modalità di collasso che interessano la **risposta delle pareti nel proprio piano**, e richiedono di essere studiati in termini di sollecitazioni e deformazioni.

Dato che le verifiche di normativa presuppongono l'usuale ipotesi di conservazione delle sezioni piane, le formule di verifica ci conducono in modo naturale ad una **modellazione a telaio equivalente**. Uno dei punti critici di questa modellazione è la corretta **calibrazione dei parametri meccanici e dei valori di resistenza** che definiscono il comportamento della muratura: data l'estrema variabilità delle tipologie murarie, questi parametri sono sovente di incerta valutazione, soprattutto se non è possibile effettuare costose prove.

Sicuramente la Circolare del 2019 ci fornisce un valido aiuto, con la tabella C8.5.1 e l'insieme delle osservazioni ad essa relative, che si traducono poi in coefficienti correttivi dei valori tabellati.

**Tabella C8.5.1** -Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a:  $f$  = resistenza media a compressione,  $\tau_0$  = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3),  $f_{v0}$  = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3),  $E$  = valore medio del modulo di elasticità normale,  $G$  = valore medio del modulo di elasticità tangenziale,  $w$  = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	$f$	$\tau_0$	$f_{v0}$	$E$	$G$	$w$
	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(\*) Nella muratura a conci sbozzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.

(\*\*) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.

(\*\*\*) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici.

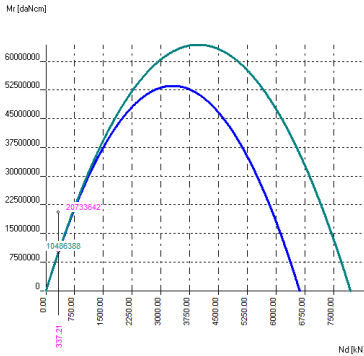
**Anche il software ci può aiutare a calibrare alcuni di questi valori.** Il primo test che consigliamo di fare, prima di effettuare lo studio approfondito delle criticità, è quello di eseguire una verifica delle murature sotto i carichi della combinazione "Quasi Permanente", generabile automaticamente a partire dalle singole condizioni elementari di carico. Se alcuni elementi della struttura risultano non verificati, con DOLMEN possiamo non fermarci alla semplice soluzione elastica lineare (di solito poco rappresentativa della reale capacità strutturale per le murature portanti), ma rappresentare la plasticizzazione di questi elementi all'interno di una procedura iterativa di analisi non lineare, chiamando di conseguenza in causa le riserve di resistenza degli altri elementi della compagine strutturale. Ovviamente ciò che ci si aspettiamo come risultato finale di quest'analisi non è una struttura plasticizzata sino alla labilità, ma la struttura così come ci è stata consegnata dal tempo, eventualmente con qualche piccola fessurazione locale, ma ancora suscettibile di un intervento di rinforzo. Se quindi la struttura risulta non verificata sotto questi carichi, probabilmente abbiamo usati valori delle resistenze un po' troppo cautelativi.

Questo procedimento è reso possibile dalla presenza, oltre all'usuale pushover, di una analisi non lineare dedicata alla verifica di combinazioni di carico (anche di soli carichi verticali) piuttosto che allo studio della struttura sino al suo collasso sotto crescenti carichi orizzontali.

Una volta dunque effettuata l'anamnesi, possiamo dedicarci alla **diagnosi**, ed esaminare come il software ci può aiutare ad individuare le criticità della struttura in esame, per poter progettare un efficiente intervento di rinforzo.

Partiamo proprio dal comportamento della muratura non rinforzata, così come ci viene descritto dalla normativa, per ricordare come lo sforzo normale e i valori di resistenza influiscano sui domini di resistenza dei pannelli murari.

Nelle verifiche di pressoflessione, aumentare la resistenza  $f_d$  del materiale secondo un fattore amplificativo modifica il dominio rappresentato in blu in quello rappresentato in verde, ma non modifica la parte della curva dove si ha un'insufficiente azione stabilizzante dello sforzo normale.

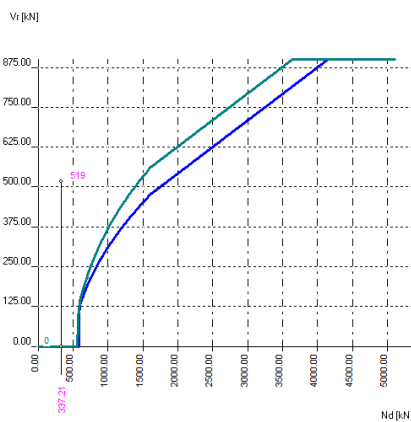


$$M_u = \left( l^2 \cdot t \cdot \frac{\sigma_0}{2} \right) \left( 1 - \frac{\sigma_0}{0,85f_d} \right) \quad [7.8.2]$$

Il taglio scorrimento, verifica tipica delle murature di tessitura più ordinata, con caratteristiche maggiormente simili a quelle odierne, presuppone un comportamento della sezione simile al calcestruzzo non armato, con parzializzazione.

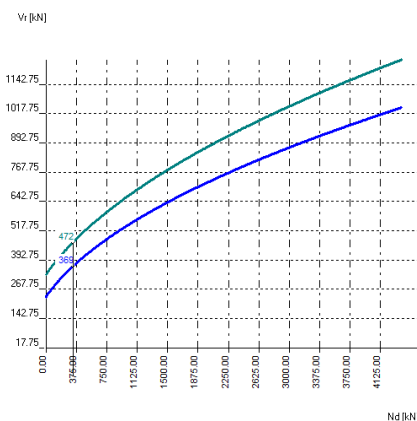
$$V_t = l \cdot t \cdot f_{vd} \quad [7.8.3]$$

Ne consegue che, in corrispondenza di un prefissato valore del momento flettente, devo avere un valore di N sufficientemente grande da rendere l'equilibrio possibile: inoltre, il valore di N influenza anche il valore della resistenza a taglio secondo la:



$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4 \sigma_n \quad [11.10.4]$$

Nuovamente, un incremento della resistenza a taglio in assenza di sforzo normale produce il passaggio dalla curva blu a quella verde, ma non modifica le problematiche dovute a sforzo normale insufficiente per l'equilibrio della sezione.



La verifica per taglio fessurazione risente invece maggiormente di un eventuale incremento delle resistenze o perlomeno rimane indipendente dalle tematiche connesse alla contemporanea verifica a pressoflessione, che configurano degli stati (N, M) non possibili:

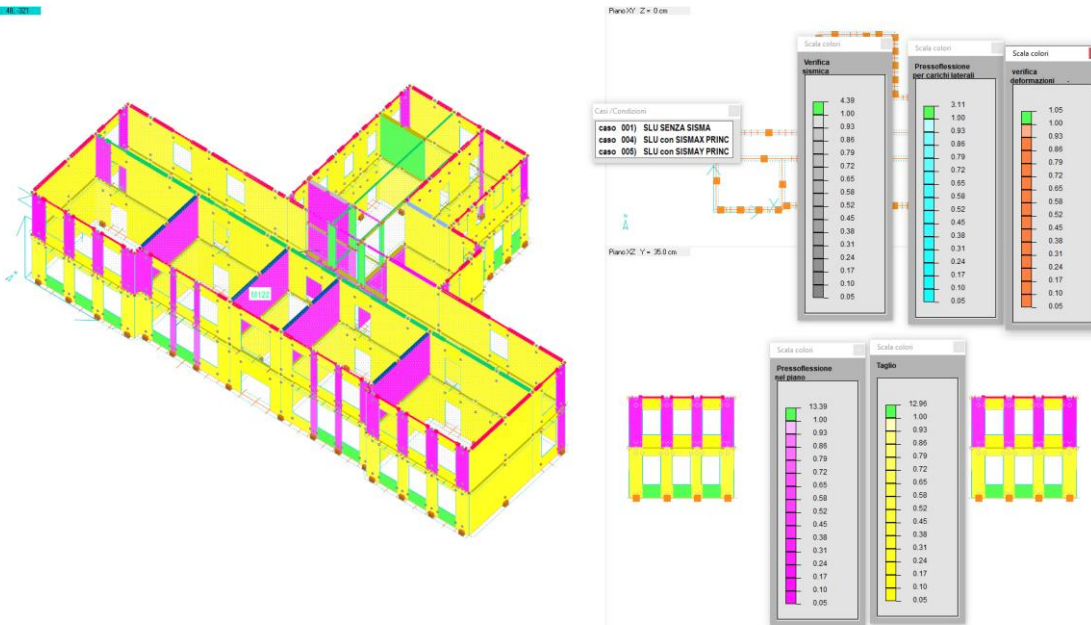
$$V_t = l \cdot t \cdot \frac{1,5\tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1,5\tau_{0d}}} = l \cdot t \cdot \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}} \quad [C8.7.1.16]$$

Queste semplici riflessioni ci portano a interrogarci, caso per caso, se sia meglio modificare radicalmente il comportamento della sezione introducendo, col rinforzo, un elemento in grado di fornire quella **capacità a trazione** che il materiale muratura non possiede o se invece agire incrementando le **resistenze del materiale**:

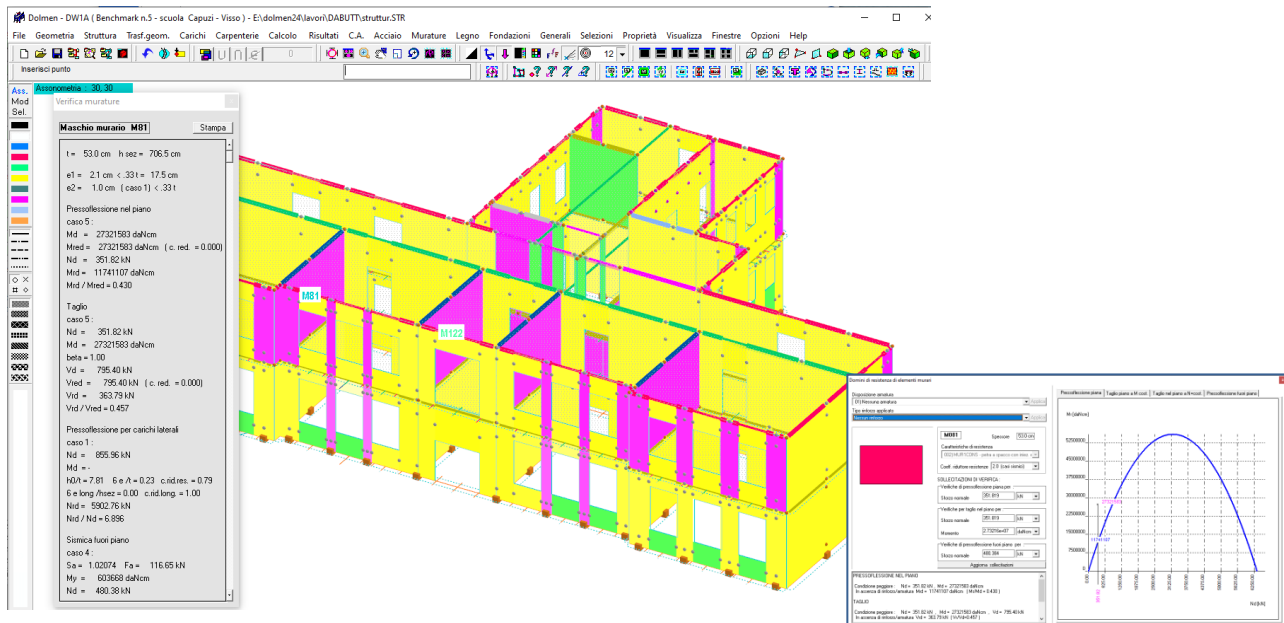
ovviamente la scelta è dipendente dalle problematiche (taglio o pressoflessione) e dalla tipologia del materiale muratura ( se tessitura regolare o meno): ne consegue che è particolarmente importante avere un quadro di insieme immediato e esplicativo delle problematiche, da poter anche interrogare approfonditamente per quanto riguarda il singolo pannello murario o la singola fascia di piano, e che ci consenta di visualizzare immediatamente le modifiche apportabili dal rinforzo.

A questo riguardo, DOLMEN ci offre molteplici possibilità di lettura e diagnosi della situazione.

Possiamo richiedere la **visualizzazione grafica delle varie verifiche** in contemporanea o solo di una di esse: questa presenterà in verde gli elementi verificati, e con colore dipendente dalla verifica con peggior coefficiente di sicurezza quelli non verificati



Possiamo richiedere la **stampa riassuntiva delle problematiche** riscontrate nel corso della verifica o viceversa interrogare lo stato di verifica del singolo pannello, effettuando una **lettura locale della verifica** o ancora visualizzarne i **domini di resistenza**.



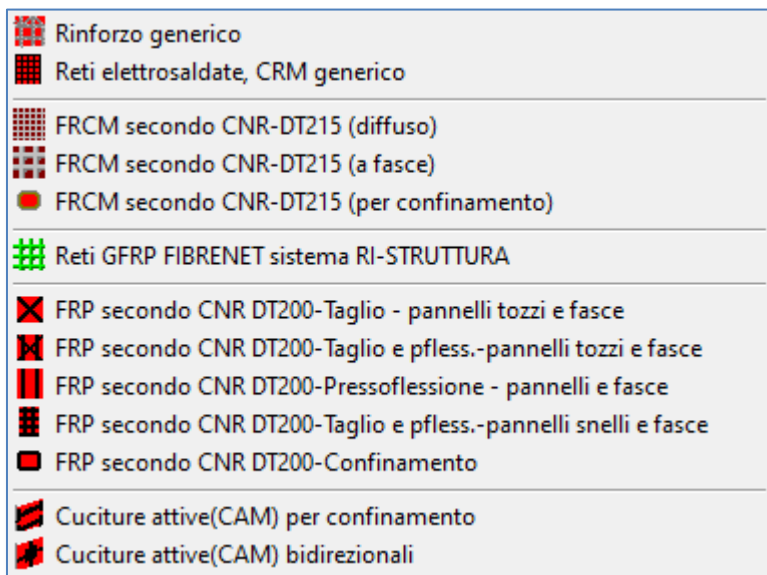
Tendenzialmente, potremmo operare una grossolana schematizzazione dicendo che le problematiche di insufficiente azione stabilizzante dello sforzo normale si verificano nel calcolo sismico in buone



condizioni, mentre cambi di destinazione d'uso con modifiche dei carichi verticali possono creare le necessità di un intervento che aumenti le resistenze.

Raggiunto quindi un quadro d'insieme, possiamo effettuare le nostre scelte.

DOLMEN ci offre una vasta libreria di rinforzi, direttamente integrata nel CAD tridimensionale dell'analisi strutturale, che ci consente di schematizzare tutte le principali tipologie di intervento.



Possiamo definire più schede di "disposizione rinforzo", descrivendo in dettaglio la tipologia scelta con l'assegnare i parametri che la definiscono: selezionando poi gli elementi murari ai quali applicare la "disposizione rinforzo", tutte le visualizzazioni delle verifiche vengono automaticamente aggiornate, fornendo anche informazioni su come il rinforzo applicato ha modificato il comportamento dell'elemento murario.

I soli rinforzi per i quali l'aggiornamento non è completamente immediato sono, per loro natura, quelli che modificano il peso e/o la rigidità dell'elemento: se la modifica è sostanziale, la struttura va ricalcolata, e le modifiche visibili prima del ricalcolo possono comunque costituire una sorta di anteprima dei miglioramenti effettivamente apportati.

Tra i rinforzi che agiscono in base al principio di inserire un elemento con elevate capacità a trazione, un ruolo storicamente importante è giocato dai rinforzi in **FRP (Fiber Reinforced Polymer)**, composti costituiti da fibre lunghe di materiali (carbonio, vetro o arammide) con elevatissima resistenza a trazione, che presentano un comportamento prevalentemente elastico lineare fino a rottura, annegati in una matrice organica polimerica.

Nei compositi fibrorinforzati le fibre svolgono il ruolo di elementi portanti sia in termini di resistenza che di rigidità.



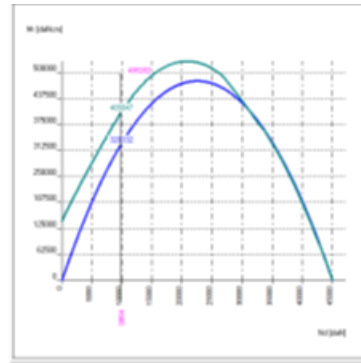
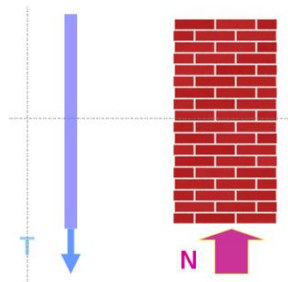
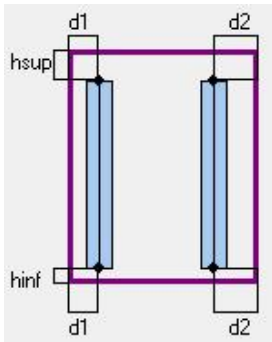
Disposizione FRP per problematiche di taglio in pannelli tozzi

La matrice, oltre a proteggere le fibre, funge da mezzo di trasferimento degli sforzi tra fibra e fibra ed eventualmente tra queste e l'elemento strutturale da rinforzare.

Vengono forniti come strisce di tessuto, e disposti sugli elementi da rinforzare in modo finalizzato al sanare le criticità rilevate, in modo da non interessare estese superfici del parametro murario al fine di preservare un'adeguata traspirabilità del sistema.

Le disposizioni dipendono dunque dalla problematica riscontrata: a titolo esemplificativo la disposizione atta ad agire nei confronti di problematiche prevalentemente di pressoflessione realizza un sistema costituito da un puntone di muratura compresso e dalla fascia in trazione (il composito è schematizzato come non resistente a compressione):

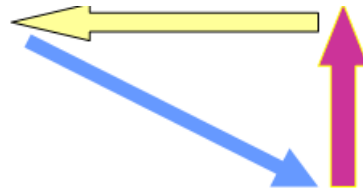
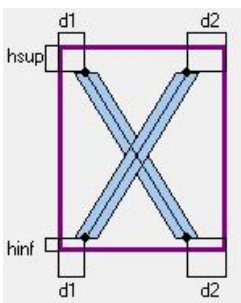
**FRP secondo CNR DT200-Pressoflessione - pannelli e fasce**



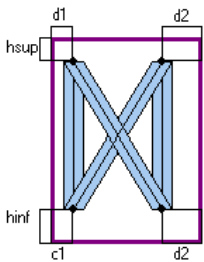
Le modifiche al dominio di resistenza a pressoflessione si collocano nella parte iniziale della curva, dove lo sforzo normale non offre sufficiente azione stabilizzante.

Analogamente le disposizioni previste per problematiche di taglio, o pressoflessione e taglio si basano sulla creazione di un traliccio resistente costituito dalla muratura compressa e dalla fibra tesa, e sono intese a sanare prevalentemente le problematiche legate all'azione sismica.

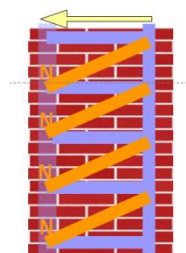
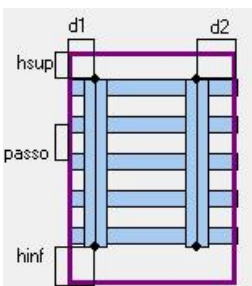
**FRP secondo CNR DT200-Taglio - pannelli tozzi e fasce**



**FRP secondo CNR DT200-Taglio e pfless.-pannelli tozzi e fasce**



**FRP secondo CNR DT200-Taglio e pfless.-pannelli snelli e fasce**



L'applicazione dei rinforzi in FRP è normata dalle **Linee Guida del CDNR, CNR-DT 200**, che prevedono un comportamento a taglio della muratura regolato principalmente da verifiche di taglio scorrimento su murature a tessitura regolare.

Questa tipologia di intervento ha comunque un **costo elevato** dovuto sia al costo dei materiali, sia alle difficoltà di posa: in base alle Linee Guida del CNR, "il personale preposto all'installazione deve possedere una specifica e comprovata abilità nei riguardi dell'applicazione di sistemi di rinforzo FRP a scopo strutturale".

Inoltre, le elevate caratteristiche di resistenza a trazione dei materiali innovativi costituenti il rinforzo sono fortemente penalizzate dal substrato: qualora la resistenza dell'adesivo utilizzato per l'applicazione del rinforzo sia più elevata della resistenza del materiale su cui è apposto il rinforzo, la perdita di aderenza tra il composito e la muratura avviene per decoesione di uno strato superficiale del mattone o del blocco di pietra o della malta.

Il ruolo dell'aderenza tra murature e composito è di grande importanza, poiché la crisi per perdita di aderenza del rinforzo è un modo di rottura fragile e quindi indesiderabile: le CNR-DT200 schematizzano queste problematiche di *delaminazione* fornendo una limitazione alla tensione di progetto del nastro nel calcolo del dominio di resistenza dell'elemento rinforzato. Il calcolo della tensione di progetto per delaminazione secondo CNR-DT200 è ovviamente implementato in DOLMEN, ed è altresì possibile impostare invece la tensione di progetto come percentuale della tensione di rottura, ad es. per tener conto di eventuali prove sperimentali.

Ad oggi, anche per problematiche di traspirabilità, i rinforzi in FRP trovano la loro applicazione prevalentemente su strutture esistenti in c.a.

Sulla scia degli FRP, e basati sullo stesso principio, ovvero come rinforzi costituiti da tessuti in grado di conferire



all'elemento murario quella resistenza a trazione che gli difetta, sono stati sviluppati gli **FRCM, Fibre/Fabric Reinforced Cementitious Matrix/Mortar**, che vedono le fibre in materiali innovativi accoppiate a matrici inorganiche a base di calce o di cemento. Si è capito infatti che una delle chiavi per la buona riuscita dell'intervento non è tanto l'elevata capacità a trazione del rinforzo, quanto la sua compatibilità col substrato. La matrice inorganica fornisce queste caratteristiche, unitamente a migliori qualità in termini di traspirabilità.

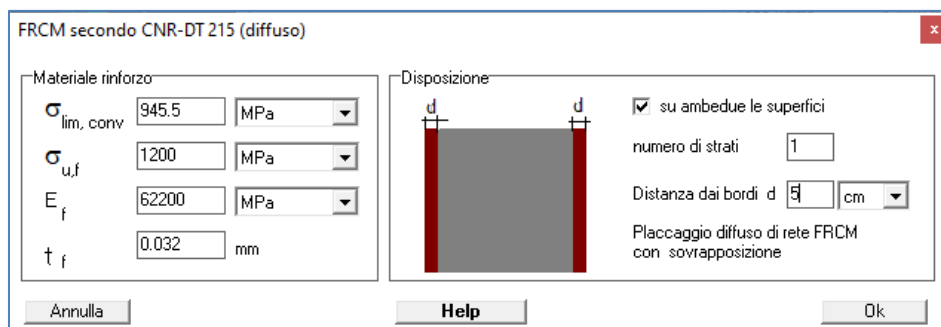
Le **Linee Guida CNR-DT 215/2018** ci dicono che "Generalmente i sistemi di rinforzo FRCM, nel caso in cui sia presente una singola rete, hanno uno spessore compreso tra 5 e 15 mm, al netto del livellamento del supporto. Nel caso di più reti lo spessore cresce, ma di solito è contenuto nei 30 mm." e che il passo delle maglie della rete non è mai maggiore di 30 mm. Ci troviamo quindi nuovamente in presenza di un tessuto, per il quale "L'elevato rapporto fra resistenza e peso consente di esaltare le prestazioni meccaniche dell'elemento strutturale rinforzato, contribuendo essenzialmente a resistere agli sforzi di trazione, senza incrementarne la massa o modificarne significativamente la rigidità."

Di conseguenza anche per gli FRCM, così come per gli FRP, la quantificazione dei miglioramenti apportati dal rinforzo agli elementi strutturali è immediata, ovvero non richiede un nuovo calcolo delle sollecitazioni in quanto non modifica la massa o la rigidità della struttura.

Le CNR-DT 215 descrivono gli FRCM in base alla stessa filosofia degli FRP, ovvero come elementi intesi a conferire un comportamento "a muratura armata": la formulazione delle verifiche è però più "empirica" e snellita, e prevede la possibilità di applicazione del rinforzo in modo distribuito sull'intera superficie o solo su parte di essa, prevalentemente al fine di ottimizzare la spesa del materiale.

Sostanzialmente, la quantificazione delle problematiche connesse alla delaminazione viene affidata al produttore, che fornisce in genere un sistema integrato di tessuto e connettori, corredato da valori certificati dei parametri atti a definire l'intervento secondo le CNR-DT 215, valutati secondo un insieme di prove opportunamente normate.

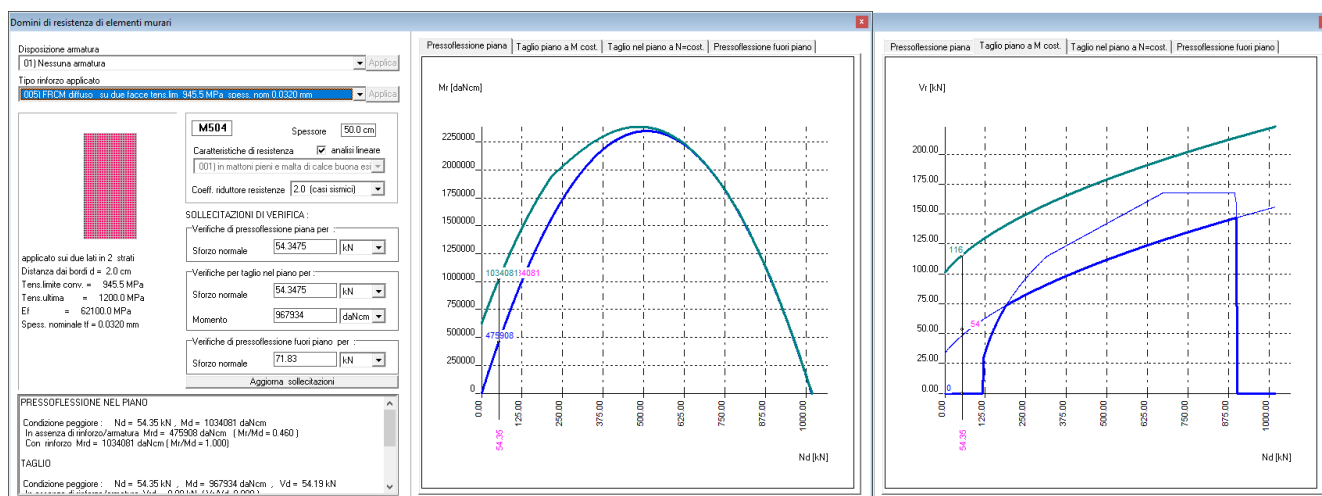
A titolo esemplificativo vediamo l'introduzione nella scheda di "disposizione rinforzo" dei parametri che caratterizzano il sistema GeoSteel Grid 200 di Kerakoll come rinforzo diffuso su muratura in laterizio (dal tasto "Help" della scheda è possibile accedere alla documentazione fornita da alcuni produttori):



Fra i parametri caratterizzanti abbiamo ora una tensione limite  $\sigma_{lim, conv}$  che dipende sia dal tessuto che dal tipo di muratura alla quale è applicato, e riassume le limitazioni connesse alle varie problematiche di delaminazione. La  $\sigma_{u,f}$  rappresenta il valore caratteristico della tensione ultima di rottura per trazione del composito e viene utilizzata nelle verifiche a pressoflessione fuori piano delle sezioni di mezzeria, per determinare il valore limite della tensione di calcolo del rinforzo.  $E_f$  è il modulo elastico del tessuto secco (valore medio):  $t_f$  è lo spessore equivalente. Per gli FRCM le CNR-DT 215 prevedono esplicitamente la possibilità di effettuare l'intervento su una sola faccia, quantificando la capacità della sezione che si ottiene in questo caso.

Il comportamento a pressoflessione della sezione rinforzata è quello di una sezione che si mantiene piana, divisa dall'asse neutro nel tratto compresso al quale competono i valori di  $E$  ed  $f_d$  della muratura, mentre la zona tesa è caratterizzata dai valori della  $\epsilon_{lim, conv}$  e di  $E$  del tessuto. DOLMEN crea per punti il dominio di resistenza facendo variare lo stato deformativo della sezione, e utilizza il dominio così creato per tutte le verifiche sull'elemento.

Le Linee Guida descrivono inoltre il miglioramento della resistenza a taglio come un contributo, con formulazione simile a quella della muratura armata, che si somma alla resistenza della muratura non rinforzata, resistenza da valutarsi in ogni caso (anche per le murature che potrebbero richiedere anche la verifica a taglio/scorrimento) con la formula relativa alla verifica di taglio/trazione o taglio fessurazione: questo perché, inserendo nel regime delle sollecitazioni il tessuto resistente a trazione, si rendono possibili quelle configurazioni a basso sforzo normale e quindi ad elevata eccentricità che non erano possibili per il pannello non rinforzato.



Il contributo aggiuntivo a taglio non è correlato allo sforzo normale agente sulla parete, ma dipende anche dalla geometria del pannello e in particolare dal rapporto base/altezza. Il dominio di resistenza a taglio presentato in DOLMEN è quello che si ha in contemporanea presenza del momento di verifica.



Oltre agli FRCM in disposizione continua, è possibile utilizzare anche le disposizioni a strisce:

FRCM secondo CNR-DT 215 (a fasce)

**Materiale rinforzo**

$\sigma_{lim, conv}$   MPa

$\sigma_{u,f}$   MPa

$E_f$   MPa

$t_f$   mm

**Disposizione**

su ambedue le superfici

numero di strati

Larghezza nastro  cm

Distanza dai bordi d  cm

Passo verti. MAX p<sub>v</sub>  cm

(del baricentro dei nastri più esterni)

Passo orizz. MAX p<sub>o</sub>  cm

Buttons: Annulla, Help, Ok

Aumentando le dimensioni e il passo delle fibre, entriamo nel campo del **CRM (Composite Reinforced Mortar)**, che comprende sia le moderne reti in fibra di vetro che il classico betoncino, che hanno in comune il fatto che l'intonaco è realizzato con malte a matrice inorganica e applicato con spessori che vanno dai 30 mm delle reti in fibra di vetro agli spessori maggiori richiesti dalle tradizionali reti elettrosaldate. Non essendo un tessuto, è applicabile a qualunque tipo di muratura, anche quelle che presentano una superficie esterna irregolare: i sistemi che prevedono l'uso di diatoni risultano inoltre particolarmente utili per le murature a doppio paramento.

Lo spessore maggiore rispetto a quello dei rinforzi in tessuto modifica rigidità e inerzie della struttura: la circolare ne descrive il comportamento tramite un coefficiente moltiplicativo di moduli elastici e resistenze, al pari di altri interventi di rinforzo:

**Tabella C8.5.II** -Coefficienti correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato; ristilatura armata con connessione dei paramenti.

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonacoarmato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (***)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3

Questo tipo di comportamento è rappresentabile in DOLMEN assegnando il "Rinforzo generico":

Rinforzo generico

Descrizione

Coeff. moltiplicativo delle resistenze

Coeff. moltiplicativo dei moduli elastici E, G

Incremento di spessore  cm

Peso specifico  kN/m3

Buttons: Annulla, Help, Ok

Il “**Rinforzo generico**” consente di schematizzare un qualunque tipo di rinforzo il cui effetto sia riassumibile tramite un **moltiplicatore di resistenze e moduli**, ed eventualmente un incremento di inerzie: ma questo tipo di schematizzazione, come abbiamo visto ricordando le formule di normativa, non aiuta (dal punto di vista numerico) il comportamento del pannello nelle situazioni di eccentricità del carico o di carichi orizzontali. Inoltre, mentre questa modellazione appare sufficientemente rappresentativa degli effetti ad es. di iniezioni di miscele leganti, è probabilmente penalizzante nei confronti dell’intonaco armato che, se realizzato con gli opportuni accorgimenti, dovrebbe poter offrire un contributo a trazione così come gli FRCM. A differenza degli FRCM però, il CRM non ha Linee Guida ad esso dedicate, o meglio dedicate alla formulazione delle verifiche conseguenti al suo inserimento.

Un contributo importante alla comprensione e alla valutazione degli effetti di **reti in fibra di vetro** è stato dato dalla campagna sperimentale di prove condotta da **Fibre Net** in collaborazione con molte Università Italiane, con lo scopo di calibrare queste valutazioni: le formulazioni proposte da Fibre Net sono state implementate in DOLMEN come tipologia di rinforzo specifica.

I risultati sperimentali portano ad una quantificazione delle modifiche apportate ai moduli elastici dell’elemento rinforzato, dipendente dallo spessore della muratura escluso il rinforzo, dallo spessore dello strato di intonaco e dal modulo di taglio dell’intonaco: più interessante ancora è il fatto che sia stata formulata una relazione che consente di stimare la resistenza a trazione equivalente della muratura rinforzata  $f_{t(R)}$ :

$$f_{t(R)} = \beta \cdot \left( f_{t(NR)} + f_{t,int} \cdot \frac{t_{int}}{t_{(NR)}} \right)$$

Dove:

- $t_{(NR)}$  spessore della muratura escluso il rinforzo;
- $t_{nt}$  spessore dello strato di intonaco;
- $f_{t(NR)}$  resistenza a trazione della muratura non rinforzata;
- $f_{t,int}$  resistenza a trazione della malta da intonaco;
- $\beta$  coefficiente che tiene conto dell’efficienza dell’intonaco armato sulla resistenza a trazione in funzione del tipo di muratura

Il dominio di resistenza a pressoflessione viene quindi calcolato in DOLMEN in modo analogo a quello degli FRCM, vale a dire come quello di una sezione avente valori di resistenza a trazione e resistenza a compressione fra loro differenti: in alcuni casi inoltre, la presenza del rinforzo potrebbe comportare anche un effetto di confinamento, e quindi anche un aumento del valore della resistenza a compressione, che viene opportunamente tenuto in conto.

Dalla resistenza a trazione equivalente viene valutata la resistenza a taglio/fessurazione della muratura rinforzata, in base alla correlazione:

$$f_{td} = 1.5 \tau_0$$

Per quanto concerne la verifica a taglio/scorrimento, in base alle sperimentazioni effettuate il suggerimento di Fibre Net è quello di non valutare il contributo del rinforzo come quello di una armatura a taglio vera e propria, ma di incrementare il valore della resistenza a taglio della muratura: DOLMEN però applica alle verifiche a taglio la stessa strategia che le CNR DT215 suggeriscono per i rinforzi FRCM, vale a dire si basa per la muratura

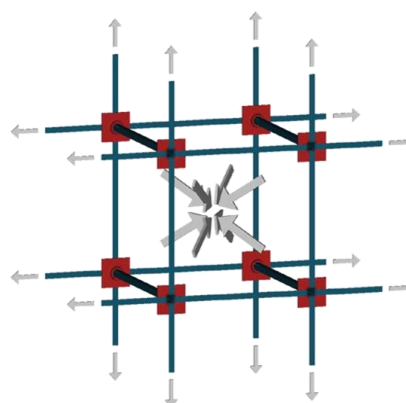
rinforzata sulla sola verifica di taglio-fessurazione, effettuata con il valore amplificato della  $\tau_0$ . Questa strategia è giustificata anche dall'osservazione che in genere la verifica a taglio/scorrimento è più penalizzante generalmente nel tratto iniziale (cioè per bassi valori di N) del dominio di resistenza a taglio, quando si hanno valori di eccentricità non sostenibili da una sezione non armata e non resistente a trazione: ma la presenza di un elemento, la rete, in grado di resistere a trazione cambia radicalmente la situazione, rendendo possibili eccentricità maggiori.

DOLMEN fornisce inoltre uno strumento che consente di descrivere gli effetti di una **rete elettrosaldata** o di un **generico CRM** come insieme di più caratteristiche. Se spessore strato e peso specifico sono stati definiti, il rinforzo modifica le inerzie dell'elemento. In base alle caratteristiche della rete il dominio di pressoflessione viene valutato come quello di una sezione dove la zona compressa ha il modulo elastico e la resistenza della muratura (eventualmente aumentata dal coefficiente di confinamento) e la zona tesa ha il modulo elastico e la resistenza della rete, divisa per un coefficiente di modello che esprime le limitazioni sull'effettiva collaborazione

fra rinforzo e muratura, nonché il fatto che la rottura per scollamento della rete è una rottura di tipo fragile.

Il dominio di resistenza a taglio viene valutato, in analogia alle CNR-DT215, aggiungendo un contributo dovuto alla rete alla verifica a taglio/fessurazione.

Come abbiamo potuto vedere in base alle problematiche relative alle tipologie di rinforzi sinora esaminate, il punto cruciale degli interventi sulle murature è la effettiva collaborazione tra rinforzo e supporto: l'obiettivo dell'intervento è sovente quello di ottenere un comportamento a muratura armata, ma questo molto spesso non è possibile dato che il rinforzo non nasce messo in opera insieme alla muratura e inserito in essa. Un soluzione a questa problematica potrebbe essere il metodo **CAM<sup>®</sup> (Cuciture Attive Manufatti)**, brevettato da **EDIL CAM Sistemi**, ovvero un sistema di cuciture che "realizza un reticolo tridimensionale in coazione che permette la compattazione della massa muraria, il collegamento tra i paramenti esterni e la creazione di una armatura diffusa sulla parete". Si tratta di una maglia tridimensionale di nastri in acciaio inox di spessore < 1mm, messi in tensione, che realizzano al contempo diafani di collegamento e un'armatura diffusa sulla parete.



Per come è costituito, il sistema di cuciture attive rientra in quella categoria di rinforzi che non modifica rigidzze o inerzie del pannello rinforzato, e non richiede quindi un nuovo calcolo delle sollecitazioni.

La valutazione degli effetti del CAM sulla scatola muraria è implementata in DOLMEN secondo le "LINEE GUIDA CUCITURE ATTIVE A MARCHIO CAM®" fornite da EDIL CAM Sistemi.

Sistema CAM (Cuciture Attive Muratura) per rinforzo PARETI

Disposizione a quinconce

Larghezza nastri 1.9 cm

Tens di pretensionamento residua 50 MPa

**NASTRI ORIZZONTALI**

Num. nastri orizz. sovrapposti 1

Spessore nastro/i orizz. 0.9 mm

Tensione di calcolo fyd 318 MPa

Interasse nastri orizzontali [Passo verticale] 80 cm

**NASTRI VERTICALI**

Num. nastri vert. sovrapposti 2

Spessore nastro/i vertic. 0.9 mm

Interasse nastri verticali [Passo orizzontale] 80 cm

Num. nastri di spigolo 1

Spessore nastro/i di spigolo 1.0 mm

Distanza dallo spigolo 16 cm

Tensione di calcolo fyd [Nastri vert. e di spigolo] 318.0 MPa

Help Annulla

Tematica completamente differente dalle precedenti è quella dei **rinforzi per confinamento**, dedicati a pannelli murari di forma approssimativamente quadrata o circolare, soggetti prevalentemente a sforzo normale. L'obiettivo dei rinforzi per confinamento è quello di incrementare la resistenza a compressione della muratura. Possiamo conseguire questo risultato sia fasciando la muratura con degli FRP, sia utilizzando degli FRCM, sia realizzando una disposizione di nastri CAM®. Le formule che consentono di valutare l'incremento di resistenza implementate in DOLMEN sono rispettivamente quelle delle CNR DT200, CNR DT215 e delle Linee Guida di EDIL CAM Sistemi.

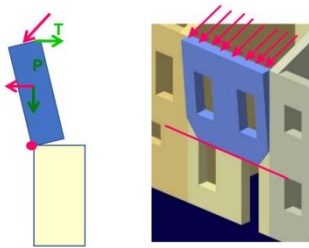
Potendo quindi scegliere fra tutte le tipologie di rinforzi a disposizione, e in base quanto ci dice in svariati modi la diagnostica anch'essa implementata in DOLMEN, siamo in grado di calibrare la nostra strategia sul tipo di criticità riscontrate.

C'è ancora un'osservazione che ci può aiutare, per quanto riguarda la scatola muraria. Ricordando che abbiamo a che fare con un materiale altamente non lineare, e che quindi la sola verifica lineare non è sufficientemente rappresentativa della reale capacità strutturale, dobbiamo pensare alle nostre verifiche di stato limite ultimo come al risultato finale di verifiche successive durante le quali gli elementi più deboli si plasticizzano redistribuendo le azioni agli elementi più forti. In questo contesto, quando un elemento di piccole dimensioni raggiunge il suo limite, le azioni gravanti su di esso possono tranquillamente essere riassegnate ad altri. Ha quindi senso **agire principalmente sugli elementi di maggiori dimensioni**, evitando di ampliare l'intervento agendo su tutti gli elementi di dettaglio, meno funzionali alla capacità ultima della struttura.

Tutte le informazioni che abbiamo inserito all'interno dell'ambiente grafico tridimensionale per studiare l'intervento di rinforzo sulla scatola muraria, ci tornano poi utili nel momento in cui andiamo a studiare i possibili cinematismi di collasso, ovvero i **meccanismi di primo modo**. In questo caso, l'attenzione si focalizza su una porzione della struttura, che consideriamo idealmente isolata, individuata sulla base di sconnessioni, presenti o potenziali, quali potrebbero essere quadri fessurativi o insufficiente qualità delle connessioni fra le

pareti. E' in questo ambito che andremo a rappresentare quelle azioni il cui effetto non si studia nel telaio equivalente, dove la scatola muraria è data per garantita.

Consideriamo a titolo esemplificativo il caso più immediato, il **ribaltamento semplice**: motivazione della verifica

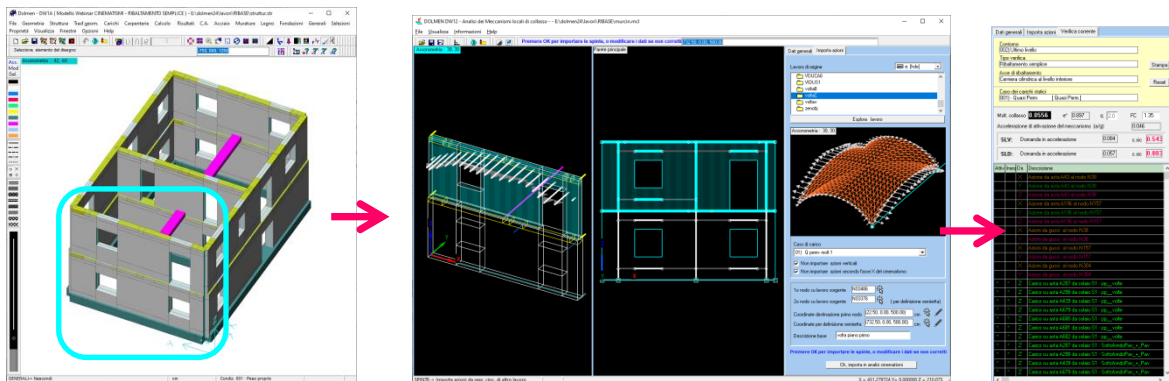


può essere il fatto di aver notato un insufficiente collegamento alle pareti ortogonali, l'assenza di cordoli in sommità, insieme alla presenza di elementi che comportano un'azione spingente etc. Rimane così individuata una porzione della struttura che potrebbe crollare per perdita di equilibrio sotto l'azione del sisma. L'analisi cinematica lineare non è altro che una semplice equazione di equilibrio limite di un corpo rigido, per la quale quando il sisma genera un certo moltiplicatore  $\alpha$  delle inerzie del solido, sono equilibrati il momento delle forze stabilizzanti, quello delle forze ribaltanti, e quello delle forze inerziali.

$$M_S - M_R - \alpha M (I) = 0$$

Il moltiplicatore  $\alpha$  rappresenta quindi una capacità del solido, che va calcolata per essere confrontata con il moltiplicatore delle inerzie generato dall'accelerazione dovuta al sisma.

Immaginiamo ad esempio di dover studiare il possibile ribaltamento di una parete all'ultimo piano: in DOLMEN agiamo selezionando nell'ambiente tridimensionale dell'analisi sollecitazioni l'intera parete ed importandola nell'ambiente di analisi cinematicismi, dove "ritagliamo" poi il solido suscettibile di ribaltamento. Geometrie, pesi dei materiali, carichi verticali etc. sono già stati assegnati in fase di verifica della scatola muraria e quindi non necessitano di ulteriore input: le azioni spingenti orizzontali, quali le spinte di eventuali volte, possono essere calcolate a parte e poi importate nell'ambiente di verifica del cinematicismo, dove vengono "incollate" sul solido oggetto di verifica oppure possono essere inserite direttamente nell'ambiente di verifica come forze concentrate o carichi distribuiti.

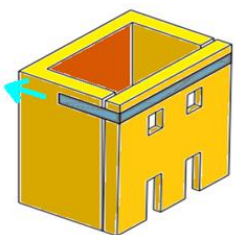


Il programma predispose quindi per ogni verifica di cinematicismo una tabella di azioni, che possono essere interrogate, attivate o disattivate su scelta dell'utente, o integrate con azioni definite direttamente nell'ambiente stesso. Mentre le verifiche della scatola muraria erano in termini di sollecitazioni e deformazioni, le verifiche dei cinematicismi sono ora in termini di forze e dei loro momenti rispetto all'asse di rotazione del cinematicismo.

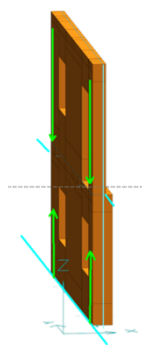
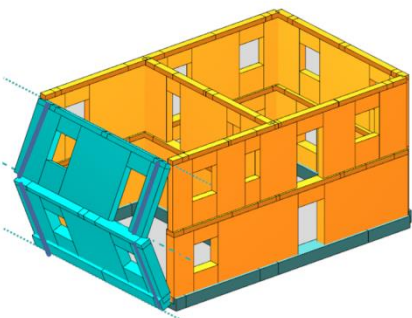
**Anche i rinforzi si traducono ora in termini di forze**, per cui possono essere direttamente e semplicemente schematizzati come tali o definiti con l'aiuto dell'ambiente di verifica.

Ad esempio potremmo agire nei confronti del ribaltamento della parte di parete all'ultimo piano con un intervento non invasivo, ma molto performante, ovvero inserendo un cordolo in FRP, a chiusura della scatola muraria.





Dal momento che stiamo effettuando una valutazione di capacità, la forza rappresentativa dell'azione del rinforzo, applicata a livello del baricentro del nastro, dipenderà dalla tensione di progetto del nastro, che possiamo identificare con la tensione di distacco (in genere fortemente inferiore alla tensione di rottura) o, in presenza di cerchiatura completa con un'adeguata sovrapposizione, con la tensione di rottura del nastro stesso. A seconda di come verrà realizzato l'intervento, si potrà quindi utilizzare in DOLMEN la procedura di calcolo della tensione di distacco o inserire direttamente la tensione di progetto.



Analoghe considerazioni valgono per le altre tipologie di cinematismo implementate in DOLMEN, quali il **ribaltamento composto**, il **ribaltamento del cantonale**, il cinematismo per **flessione verticale**, lo sfondamento della parete del **timpano** e altro. Ad es. i rinforzi intesi a scongiurare cinatismi di flessione verticale si traducono in forze verticali stabilizzanti, facilmente calcolabili ed immediatamente imputabili.

L'ambiente di verifica è stato appositamente studiato per fornire in modo visivo, immediato e totalmente editabile, una sorta di abaco di gestione delle azioni che definiscono il cinematismo.

## Bibliografia

- *DECRETO 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».*
- *CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.: “Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.*
- *CNR-DT 200 R1/2013 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*
- *CNR-DT 215/2018 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica*
- *RINFORZO STRUTTURALE DEGLI EDIFICI IN MURATURA, L'EFFICACIA DELLA TECNICA DELL'INTONACO ARMATO - Ing. Enrico Zanella, Ing. Luca Bombonati, Ing. Matteo Moreale, Ing. Davide Menegon*
- *EDIL CAM Sistemi srl - LINEE GUIDA CUCITURE ATTIVE A MARCHIO CAM® - Applicazione e calcolo sulle strutture in Muratura - Ing. Alessandro Vari, Ing. Marianna Leonori*
- *Regione Molise – Analisi dei Meccanismi Locali di Collasso in Edifici Esistenti in Muratura – Estratto da “Repertorio di Meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura”*
- *Reluis - Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi - Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni*