



3DMACRO
FOR EXISTING BUILDINGS

**LA MODELLAZIONE DI PANNELLI MURARI RINFORZATI
NEL PIANO CON TECNOLOGIA ARMOX**

DOCUMENTO DI UTILIZZO E VALIDAZIONE

(Update number 20220527_01 - rev20241001_01)

Copyright of Gruppo Sismica s.r.l.

ITALIA



GRUPPO SISMICA
SMART STRUCTURAL SOLUTIONS

date number 20220527_01 – rev20241001_01)

3DMacro® è prodotto e distribuito da:

Gruppo Sismica s.r.l.

Viale Andrea Doria, 27

95125 Catania

Telefono: 095/504749

Email: info@grupposismica.it

Web: <http://www.grupposismica.it>

Supporto tecnico:

Servizio assistenza tecnica tramite Tickets su

<https://www.grupposismica.it/supporto/>

Assistenza telefonica: +39 095 504749

Il presente manuale e le funzionalità correlate sono state prodotte in collaborazione con:

Tri Materials s.r.l.

Via Malta 12/O

25124 Brescia (BS)

Telefono: +39 030 2942138

Fax: +39 030 2450862

Web: <https://www.trimaterials.com>

Proprietà letteraria riservata

Gruppo Sismica s.r.l. © Maggio 2021

INDICE GENERALE

<i>INDICE GENERALE</i>	<i>3</i>
1 PREMESSE	6
2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI RINFORZO ARMOX®	6
3 RIFERIMENTI NORMATIVI	7
4 STIMA DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLA MURATURA RINFORZATA	7
4.1 VALUTAZIONE DEL PESO SPECIFICO	8
4.2 STIMA DELLA RESISTENZA A TAGLIO	8
4.3 STIMA DELLA RESISTENZA A TRAZIONE	10
4.4 STIMA DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DELLA MURATURA	10
4.5 PARAMETRI DI DEFORMABILITÀ	11
4.6 INCRUDIMENTO E DUTTILITÀ ULTIMA A TAGLIO DEL PANNELLO	11
4.7 INCRUDIMENTO E DUTTILITÀ ULTIMA A FLESSIONE DEL PANNELLO	12
5 VALIDAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO	12
5.1 PROVA SPERIMENTALE	12
5.2 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI	13
5.3 MODELLO NUMERICO	13
5.4 OUTPUT DEL MODELLO E CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI	15
5.5 RICALIBRATURA DEL RINFORZO IN ACCORDO CON I DATI DEL CVT	19
6 DEFINIZIONE E APPLICAZIONE DEL RINFORZO ARMOX®	21
6.1 DEFINISCI RINFORZI ARMOX®	21
6.2 APPLICAZIONE RINFORZI ARMOX®	21
6.2.1 APPLICAZIONE MEDIANTE INPUT RAPIDO	22
6.2.2 APPLICAZIONE ALLE REGIONI MURARIE	22
6.2.3 APPLICAZIONE SULLE AREE DI RINFORZO/AMMALORAMENTO	23
6.3 REPORT	26
BIBLIOGRAFIA	28

1 PREMESSE

Il presente documento illustra le modalità di input e le procedure di calibrazione utilizzate per la simulazione in 3DMacro® del comportamento nel piano di pannelli murari rinforzati mediante il sistema di rinforzo *Armox®*, una rivoluzionaria tecnologia antisismica basata sull'utilizzo di un intonaco fibro-rinforzato SFRM. I risultati delle elaborazioni numeriche sono validati mediante il confronto con i risultati di test sperimentali svolti presso l'Università degli Studi di Brescia su provini rinforzati e non rinforzati. Per questa ragione il presente manuale si può considerare anche come documento di validazione del software, ai sensi del punto 10.2 delle NTC 2018.

Per ogni futuro aggiornamento sulle funzionalità del software, si rimanda al Manuale Utente.

2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI RINFORZO ARMOX®

Armox® è un intonaco nano-composito che, grazie alla tecnologia brevettata SISMASAFE FRM® (Fibre Reinforced Mortar), può essere impiegato per il consolidamento antisismico degli edifici. L'utilizzo di *Armox®* è particolarmente indicato sia per incrementare la resistenza al terremoto di una struttura esistente, sia per la messa in sicurezza di edifici lesionati da precedenti sismi.

È stato sperimentalmente dimostrato in collaborazione con l'Università degli Studi di Brescia, Facoltà di Ingegneria, che intonacando murature lesionate con *Armox®* è possibile sia rendere nuovamente agibili gli elementi lesionati, ma anche aumentarne la resistenza al sisma rendendo di fatto l'intervento di consolidamento come antisismico.

L'applicazione di *Armox®* avviene togliendo lo strato del vecchio intonaco e applicando il prodotto. In molti casi è sufficiente operare solo su un lato della muratura, sfruttando il comportamento scatolare dell'intervento diffuso. La nano-struttura di *Armox®* è inorganica e produce, grazie alla superficie specifica, un beneficio dovuto alla resistenza sia meccanica che chimica del materiale composito.

Armox® è utilizzato come intonaco strutturale per il consolidamento di murature in mattoni in cui sia necessario un incremento della resistenza a flessione e taglio. Le caratteristiche di resistenza meccanica beneficiano della forza di aggrappaggio che rende *Armox®* ideale per trasferire gli sforzi tra elementi siano essi mattoni o parti ricostruite di calcestruzzo. L'assenza di leganti classici quali cemento Portland, Calce e Gesso escludono chimicamente la possibilità di degrado per polverizzazione e rigonfiamento del legante (Thaumasite ed Ettringite D.E.F.).

Il suo funzionamento si basa sul trasferimento delle tecniche di consolidamento proprie degli FRC (Fibre Reinforced Concrete) su un materiale a basso spessore dalle elevate prestazioni. L'applicazione è esattamente come un intonaco classico, su cui sono previste, in funzione della geometria dell'elemento da consolidare, alcuni semplici ancoraggi non passanti che si limitano ad evitare l'instabilità del sottile strato di rinforzo sismo-resistente durante le accelerazioni orizzontali tipiche dei terremoti.

Per ulteriori dettagli sui materiali si rimanda alle schede tecniche dei prodotti Armox®. Le informazioni di dettaglio relative alle modalità di installazione e i particolari costruttivi sono disponibili sul sito: <https://www.trimaterials.com/it/la-famiglia-armox/armox>.

3 RIFERIMENTI NORMATIVI

Le attuali norme tecniche per le costruzioni NTC2018 [7] hanno introdotto il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) tra i materiali da costruzione (cfr. § 11.2.12). Armox® rientra in tale categoria.

Il Certificato di Valutazione Tecnica (CVT) del materiale, rilasciato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, fornisce le proprietà meccaniche richieste dalla norma per la valutazione preliminare della miscela di calcestruzzo fibrorinforzato. In particolare, il CVT riporta i valori di resistenza a trazione residua f_{R1k} per lo Stato Limite di Esercizio e f_{R3k} per lo Stato Limite Ultimo, determinati secondo la UNI EN 14651:2007 [8].

Inoltre, il legame a trazione monoassiale dell'intonaco fibrorinforzato, da cui deriva la resistenza a trazione dell'intonaco definita nel seguito, è stato ricavato applicando il modello lineare proposto dal Model Code 2010 [6] (cfr. § 5.6.4).

4 STIMA DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLA MURATURA RINFORZATA

Gli interventi di rinforzo sopra descritti assicurano un incremento di resistenza a trazione, compressione e a taglio della muratura, nonché un notevole beneficio in termini di duttilità. L'efficacia dell'intervento dipende dalle proprietà meccaniche del rinforzo, dallo spessore dell'intonaco, dalla presenza e numero di connettori trasversali, dalla presenza a quantità di barre di ancoraggio con la struttura di fondazione, nonché dalla tipologia, dallo spessore e dalle caratteristiche meccaniche della muratura da rinforzare. Di seguito si riportano le formule utilizzate per stimare le caratteristiche della muratura rinforzata, determinate empiricamente su base sperimentale utilizzando la campagna di prove. Per le procedure di calibrazione del macro-elemento implementato in 3DMacro®, si rimanda al manuale teorico del software [1] e a specifiche pubblicazioni scientifiche [2,3].

In particolare, le proprietà dei pannelli rinforzati (identificate con il pedice r) verranno ottenute a partire da quelle della muratura da rinforzare (pedice m) e da quelle dell'intonaco fibro-rinforzato (pedice a).

Lo spessore del rinforzo t_a viene ottenuto moltiplicando lo spessore t_p di ciascun paramento per il numero n_p di paramenti di rinforzo (1 o 2)

$$t_a = n_p \cdot t_p$$

Lo spessore t_r della muratura rinforzata è posto pari alla somma di quello della muratura non rinforzata e di quello dell'intonaco come segue:

$$t_r = t_m + t_a$$

4.1 VALUTAZIONE DEL PESO SPECIFICO

Il peso specifico del pannello viene opportunamente modificato per tener conto della presenza dell'intonaco come segue:

$$\gamma_r = \gamma_m \frac{t_m}{t_r} + \gamma_a \frac{t_a}{t_r}$$

dove:

- γ_r è il peso specifico della muratura rinforzata;
- γ_m è il peso specifico della muratura non rinforzata;
- γ_a è il peso specifico dell'intonaco fibro-rinforzato.

4.2 STIMA DELLA RESISTENZA A TAGLIO

La resistenza a taglio del pannello rinforzato è stimata considerando il valore massimo tra quello della muratura non rinforzata, e quello del solo intonaco. Quest'ultimo viene stimato considerando come resistenza effettiva quella minima tra quelle del puntone e del tirante lungo le due diagonali del pannello. Le aree di puntone e tirante effettivamente impegnate nel comportamento a taglio per fessurazione diagonale vengono ottenute come quota dell'area di base del pannello, vedi Figura 1. La resistenza a taglio del pannello rinforzato può pertanto calcolata attraverso la seguente formula:

$$\tau_{o,r} = \frac{t_a}{t_r} \cos \delta \min(\beta_c \alpha_c f_{c,a}, \alpha_t f_{t,a}) \geq \tau_{o,m} \frac{t_m}{t_r}$$

dove:

- $\tau_{o,r}$ è la resistenza a taglio della muratura rinforzata;
- $\tau_{o,m}$ è la resistenza a taglio della muratura non rinforzata;
- β_c è un coefficiente riduttivo del contributo del rinforzo nella resistenza a compressione che dipende da eventuali fenomeni di instabilità locale che possono manifestarsi nel rinforzo con forme di instabilità vincolate ai punti di connessione trasversale. Tale valore si riduce ulteriormente se il rinforzo è applicato su una sola faccia. Tale valore si ritiene compreso tra 0.4 e 0.9, con valore di default pari a 0.65;
- α_c è un coefficiente che tiene conto dell'area del puntone rispetto a quella lungo la diagonale (e pari a 0.66 di default);
- $f_{c,a}$ è la resistenza a compressione dell'intonaco;
- α_t è un coefficiente che tiene conto dell'area del tirante rispetto a quella lungo la diagonale (e pari a 0.65 di default);
- $f_{t,a}$ è la resistenza a trazione dell'intonaco.
- δ è l'angolo compreso tra la diagonale del pannello e la base.

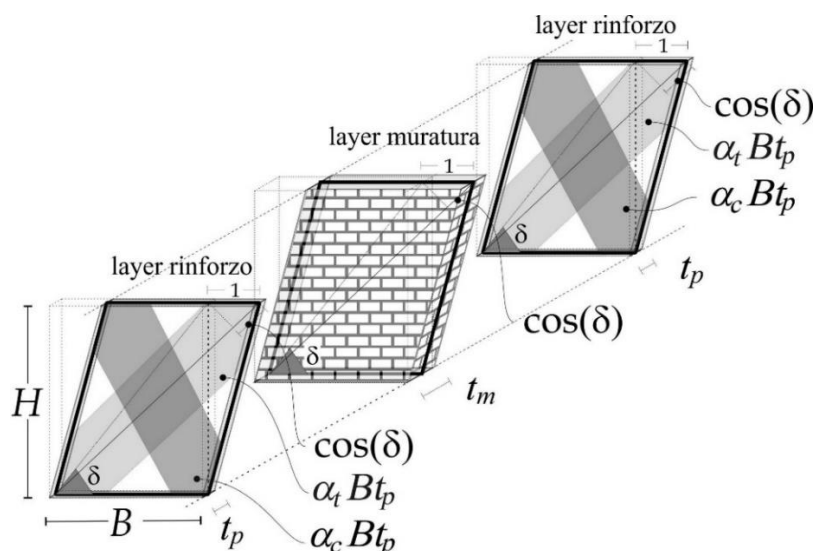


Figura 1: Schema di calcolo per la stima della resistenza a taglio della muratura rinforzata.

Oltre all'incremento di resistenza a taglio, la presenza dell'intonaco di rinforzo conferisce delle risorse di resistenza ulteriori al pannello a cui è applicato, il legame viene pertanto modificato (da un comportamento elastico perfettamente plastico con dominio di resistenza alla Mohr-Coulomb o alla Turnsek e Cacovic) non in termini di rigidezza e resistenza del pannello stesso, ma anche (nel caso in cui il rinforzo conferisca un incremento di resistenza rispetto alla configurazione non rinforzata) attraverso l'inserimento di un incrudimento, che è quantificato attraverso il rapporto tra la rigidezza post-elastica e quella iniziale. Tale parametro, indicato come $a(\gamma)$ dipende dallo spostamento γ del pannello secondo una legge lineare per valori di spostamento compresi tra il limite elastico γ_u e lo spostamento a rottura γ_r . Il valore della costante a_0 è fissato di default pari a -0.15.

$$a(u) = a_0 \frac{\gamma_r - \gamma}{\gamma_r - \gamma_y}$$

A titolo esemplificativo la Figura 2 riporta qualitativamente la modifica del legame costitutivo apportata al pannello murario.

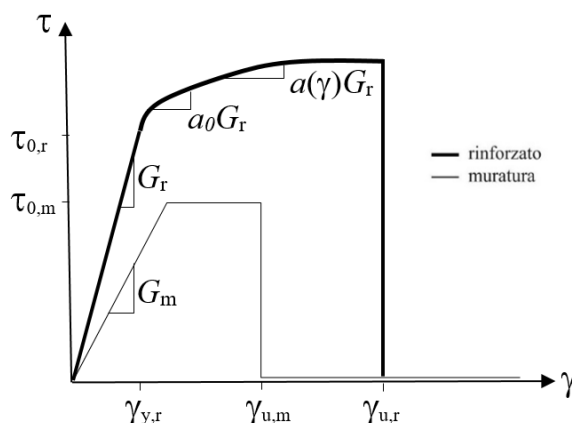


Figura 2: Confronto tra il legame costitutivo a taglio tra il pannello non rinforzato e quello rinforzato.

4.3 STIMA DELLA RESISTENZA A TRAZIONE

Per la stima della resistenza a trazione sul pannello omogenizzato viene utilizzata la seguente formula empirica, in cui, essa viene assunta pari al valore massimo tra quella della muratura esistente, e quella del rinforzo ridistribuite sull'intero spessore:

$$f_{t,r} = \max \left(f_{t,m} \frac{t_m}{t_r}, \beta_t f_{t,a} \frac{t_a}{t_r} \right)$$

dove:

$f_{t,r}$ è la resistenza a trazione della muratura rinforzata;

β_t è un coefficiente riduttivo della resistenza a trazione, da calibrare sulla base delle prove sperimentali e delle prove numeriche di dettaglio su pannelli (virtual tests). Ci si aspetta un valore $\beta_t \rightarrow 1$ per murature di piccolo spessore e con il rinforzo su entrambe le facce; tale valore risulterà invece inferiore a 1 per pannelli in cui il rinforzo è applicato su una sola faccia a causa dell'eccentricità indotta;

$f_{t,m}$ è la resistenza a trazione della muratura.

La presenza di barre di ancoraggio in fondazione deve essere tale da garantire l'intera attivazione della resistenza a trazione dell'intonaco di rinforzo. È preferibile disporre di un numero superiore di barre di piccolo diametro piuttosto che utilizzare un numero limitato di barre di grosso diametro. Per tenere in conto della presenza (o assenza) di barre di ancoraggio in fondazione la resistenza a trazione viene ulteriormente modificata per tenere conto della loro presenza come segue

$$f_{t,r} = \max \left(f_{t,m} \frac{t_m}{t_r}, \min \left(\frac{f_{y,a} A_a}{t_r}, \beta_t f_{t,a} \frac{t_a}{t_r} \right) \right)$$

dove:

$f_{y,a}$ è la resistenza a trazione delle barre di armatura;

A_a è l'area di armatura disposta per metro lineare.

Tale modifica nella resistenza a trazione, implica che nel caso di un pannello incastrato alla base, l'interfaccia di base sia calibrata sulla base di un materiale modificato rispetto alle altre tre interfacce.

4.4 STIMA DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DELLA MURATURA

La resistenza a compressione della muratura a seguito dell'applicazione dell'intervento di rinforzo ($f_{c,r}$) viene assunta omogenizzando i contributi della muratura non rinforzata ($f_{c,m}$) e dell'intonaco come segue:

$$f_{c,r} = f_{c,m} \frac{t_m}{t_r} + \beta_c f_{c,a} \frac{t_a}{t_r}$$

dove:

- $f_{c,r}$ è la resistenza a compressione della muratura rinforzata;
 $f_{c,m}$ è la resistenza a compressione della muratura non rinforzata.

4.5 PARAMETRI DI DEFORMABILITÀ

Il modulo di elasticità tangenziale G_r del pannello rinforzato è ottenuto omogenizzando i contributi del rinforzo e della muratura esistente, e può essere calcolato attraverso la seguente formula:

$$G_r = G_m \frac{t_m}{t_r} + E_a \frac{H}{B} \cos^2 \delta \frac{t_a}{t_r} (\alpha_t + \alpha_c)$$

dove:

- G_r è il modulo di elasticità tangenziale del pannello rinforzato.
 E_a è il modulo elastico dell'intonaco;
 G_m è il modulo di elasticità tangenziale della muratura non rinforzata.

Il modulo di Young della muratura rinforzata (E_r) può essere determinato mediante l'espressione:

$$E_r = E_m \frac{t_m}{t_r} + \alpha_E E_a \frac{t_a}{t_r}$$

dove:

- E_r è il modulo elastico della muratura rinforzata;
 E_a è il modulo elastico dell'intonaco;
 E_m è il modulo elastico della muratura non rinforzata (ovvero esistente);
 α_E è un coefficiente che riduce la collaborazione in termini di modulo elastico omogenizzato tra muratura esistente e intonaco. Per murature di piccolo spessore e con il rinforzo su entrambe le facce $\alpha_E \rightarrow 1$; negli altri casi α_E deve essere stimato sulla base di prove sperimentali e prove numeriche di dettaglio su pannelli di riferimento (virtual tests).

4.6 INCRUDIMENTO E DUTTILITÀ ULTIMA A TAGLIO DEL PANNELLO

Le prove sperimentali hanno evidenziato un notevole incremento della duttilità ultima a taglio dei pannelli rinforzati, oltre all'incrudimento già introdotto al §3.2. A tal proposito, si riporta una stima della duttilità ultima sulla base delle curve di capacità sperimentali relative ai pannelli rinforzati.

In fase progettuale per i pannelli rinforzati viene considerato una duttilità limite $\gamma_{u,m}$ pari a 1.1% che si può ritenere un valore sufficientemente cautelativo per tutte le tipologie di muratura e rinforzo investigate.

4.7 INCRUDIMENTO E DUTTILITÀ ULTIMA A FLESSIONE DEL PANNELLO

Le prove sperimentali hanno evidenziato un notevole incremento della duttilità ultima a trazione per flessione dei pannelli rinforzati, accompagnato da un leggero incremento dell'incrudimento a trazione. Per tener conto di tali incrementi in fase progettuale per i pannelli rinforzati viene considerato una duttilità limite a trazione pari a 40 (rapporto tra la deformazione al limite ultimo e la deformazione al limite elastico) e un valore di incrudimento a trazione h_t pari a 0.02.

5 VALIDAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO

Nella presente sezione si riporta la validazione del modulo di calcolo 3DMacro® dedicato alla simulazione del comportamento nel piano di pannelli murari rinforzati mediante i sistemi di rinforzo strutturale Armox®. A tal fine si riporta il confronto tra i risultati delle analisi numeriche e le curve di capacità sperimentali, relative a una prova di simulazione della forzante sismica condotta su un edificio in scala 1:1 sottoposto a carico ciclico laterale mediante un martinetto elettromeccanico e un apposito ripartitore verticale. Per il layout di prova si rimanda a [4].

5.1 PROVA SPERIMENTALE

La prova sperimentale di riferimento è stata condotta su un edificio a 2 elevazioni (la cui geometria è mostrata in Figura 3), sottoposto a spostamenti imposti in direzione orizzontale a mezzo di un martinetto elettromeccanico e di un ripartitore verticale volto ad applicare due forze orizzontali proporzionali alla massa di piano.

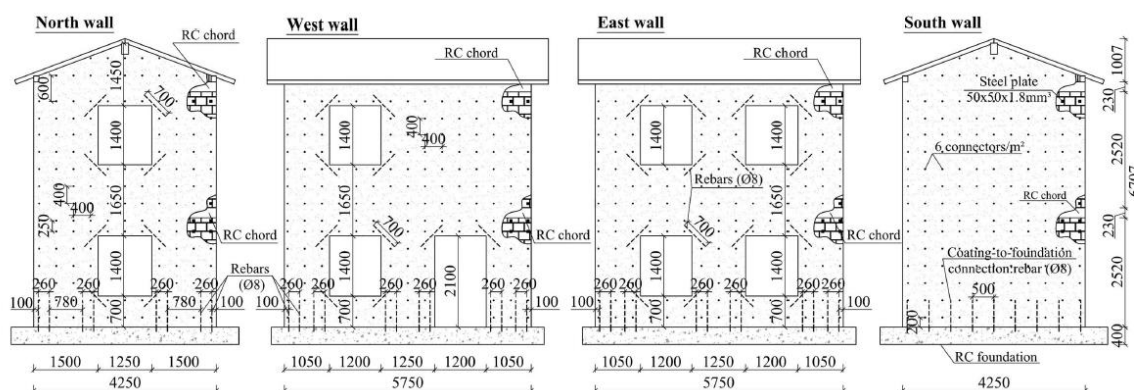


Figura 3: Geometria edificio.

5.2 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI

Sulla base delle indicazioni di laboratorio sono stati caratterizzati i materiali muratura e Armox® ai fini dell'esecuzione dell'analisi numerica con 3DMacro®. Nella Figura 4 sono riportati i valori medi dei parametri assegnati al rinforzo, in accordo con le prove di caratterizzazione dei materiali condotte parallelamente al test sull'edificio in scala reale e in Figura 5 i nuovi parametri meccanici assegnati alle murature rinforzate (in un generico pannello) in base alla formulazione proposta.

Figura 4: Parametri meccanici medi del rinforzo utilizzati per riprodurre la prova sperimentale.

Formato: Muratura + Armox_orig			
Parametro	Valore base	Valore rinforzato	Incremento (%)
Legame a flessione	non lineare	non lineare	-
Modulo elastico, E _{ver}	2100 MPa	4839.13 MPa	130.4348
Modulo elastico, E _{or}	2100 MPa	4565.22 MPa	117.3913
Resistenza a compressione, f _{m,ver}	3.015 MPa	5.67391 MPa	88.18946
Resistenza a compressione, f _{m,or}	3.015 MPa	5.67391 MPa	88.18946
Resistenza a trazione, f _{t,ver}	0.1 MPa	0.326087 MPa	226.0869
Resistenza a trazione, f _{t,or}	0.1 MPa	0.326087 MPa	226.0869
ε _c	infinito	infinito	-
ε _t	infinito	infinito	-
Legame a taglio	non lineare	non lineare	-
G	840 MPa	2187.78 MPa	160.4496
τ ₀	0.065 MPa	0.188586 MPa	190.1316
γ _u	0.004	0.011	175
Coeff. Attrito	0.3	0.3	0
Scommenti	non attivi	non attivi	-

Figura 5: Variazioni dei parametri meccanici ottenute in un generico pannello del modello numerico.

5.3 MODELLO NUMERICO

La simulazione numerica della prova in 3DMacro® è stata condotta modellando l'intero edificio in modo da riprodurre l'esatta geometria testata sperimentalmente come mostrato in Figura 6.



Figura 6: Immagini del prototipo di edificio e modello geometrico in 3DMacro®.

La simulazione della prova sperimentale è stata condotta riproducendo anche l'esatta distribuzione della forzante fornita dal martinetto elettromeccanico attraverso l'imposizione di uno spostamento incrementale con una distribuzione della forzante tra i due livelli sismici pari al 60% per il primo livello e 40% per il secondo (Figura 7). L'intensità dello spostamento è stata incrementata monotonicamente fino allo spostamento target pari a 2.0 cm.

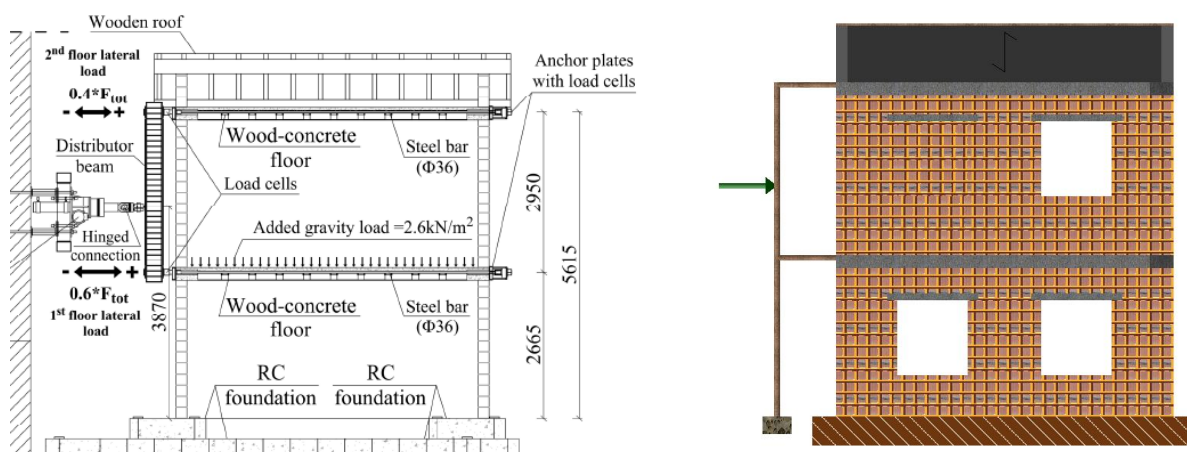


Figura 7: Layout di prova.

I parametri assegnati alla configurazione di rinforzo considerata nelle elaborazioni sono stati definiti mediante una apposita finestra che permette di assegnare i parametri del rinforzo ArmoX® (Figura 8). Per quanto riguarda l'applicazione del rinforzo ai pannelli murari, si rimanda al §5.2.

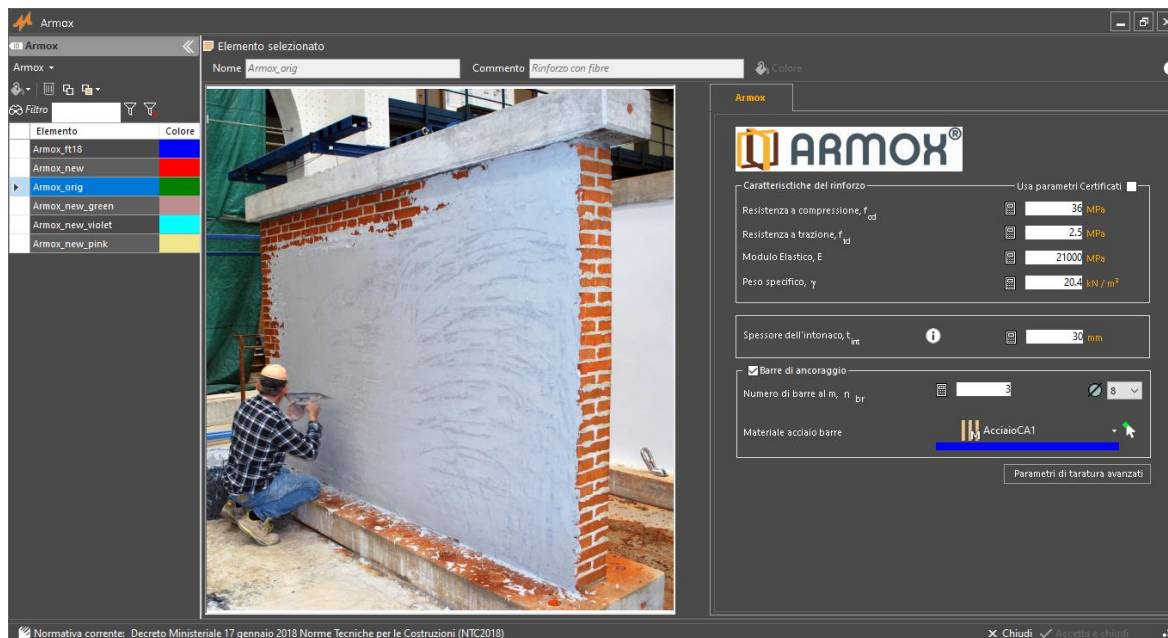


Figura 8: Ambiente di definizione dei rinforzi ArmoX® in 3DMacro®.

5.4 OUTPUT DEL MODELLO E CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI

A titolo d'esempio nella Figura 9 si riporta l'immagine dell'output relativo alla curva di capacità visualizzabile nell'ambiente "Registro degli eventi" di 3DMacro® (cfr. manuale utente [5]), utilizzata come raffronto con le curve ottenute sperimentalmente e dal modello in DIANA®.

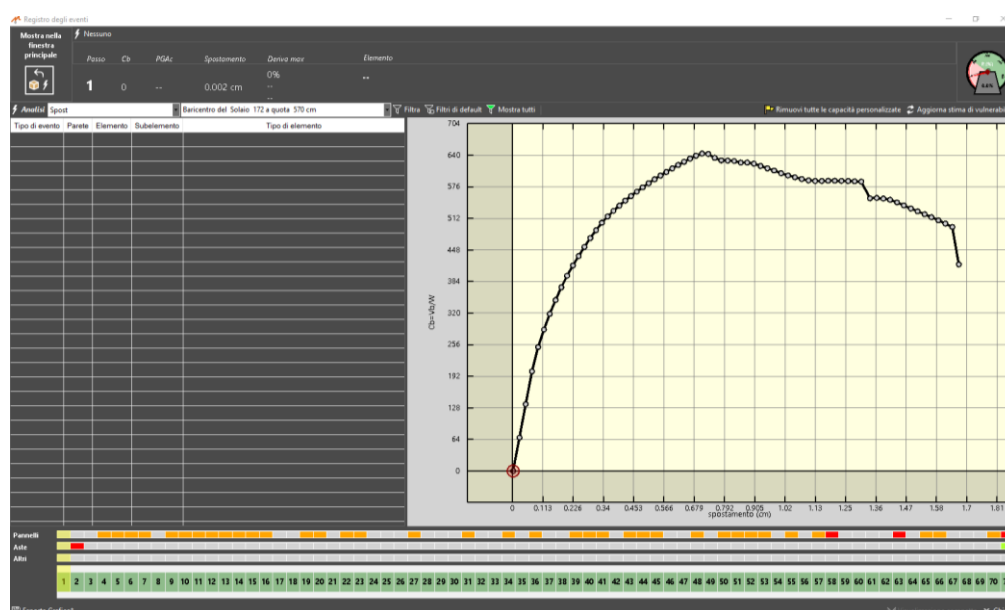


Figura 9: Visualizzazione della curva di capacità.

Le prove e le simulazioni del comportamento statico non-lineare sono state condotte sul modello non rinforzato e sul modello rinforzato con e senza barre di ancoraggio in fondazione. Nella Figura 10 sono riportate le curve di capacità ottenute dalle prove sperimentali (nelle configurazioni di edificio non rinforzato “MB, exp” ed edificio rinforzato in presenza delle barre di ancoraggio in fondazione “MB-R+SR, exp”), quelle ottenute dal modello numerico realizzato in ambiente DIANA® (considerando le tre configurazioni di edificio non rinforzato “MB, num”, edificio rinforzato senza barre di ancoraggio in fondazione “MB-R, num” e edificio rinforzato in presenza di barre di ancoraggio in fondazione “MB-R+SR, num”), e quelle ottenute mediante 3DMacro® nelle medesime tre configurazioni.

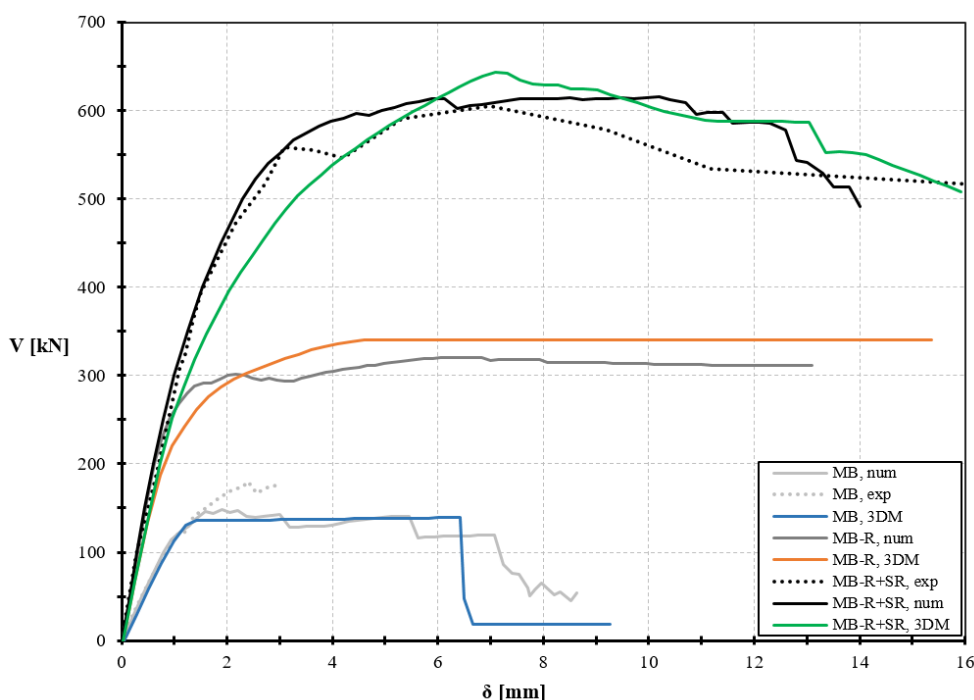


Figura 10: Confronto curve di capacità.

Come si può osservare, le curve di capacità ottenute con 3DMacro® (curve colorate) mostrano una corrispondenza sufficientemente accurata se confrontata con le curve sperimentali (curve puntinate) e con la modellazione in DIANA® (curve continue).

La Figura 11 e la Figura 12 mostrano invece il raffronto tra i meccanismi di collasso prima e dopo l'applicazione del rinforzo confrontando i quadri di danno sperimentali con quelli ottenuti mediante 3DMacro®.

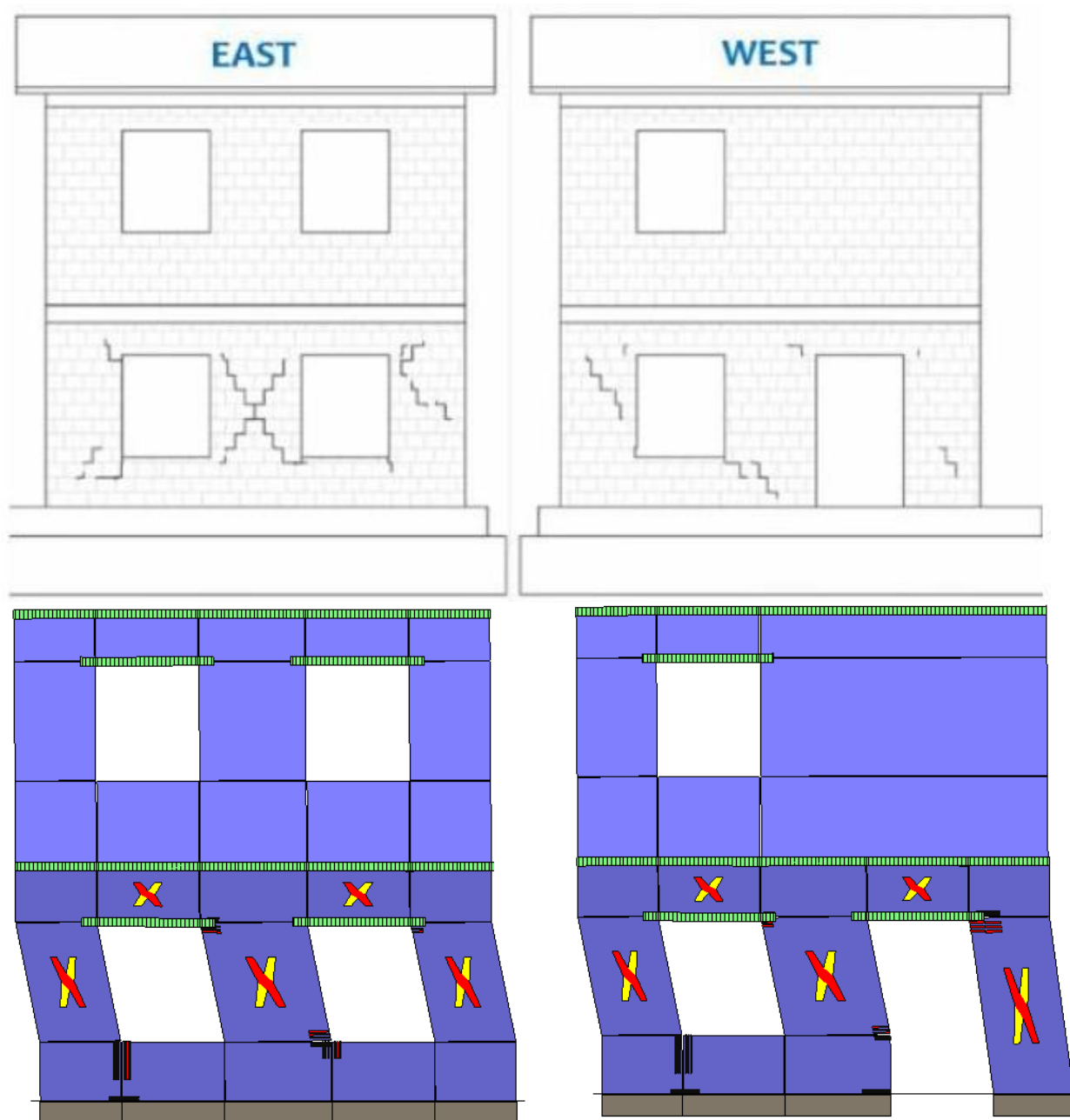


Figura 11: Confronto quadro fessurativo edificio NON rinforzato.

L'edificio non rinforzato (MB) presenta un quadro fessurativo concentrato al primo livello lungo le parate Est ed Ovest parallele alla direzione di carico con un danneggiamento prevalente a taglio per fessurazione diagonale concentrato sui maschi murari, manifestato sia dalla prova sperimentale che nella simulazione in ambiente 3DMacro®. Nel software le X giallo-rosse in corrispondenza dei macroelementi identifica un pannello fessurato a taglio, mentre le bande rosse in corrispondenza delle interfacce tra i macroelementi indica un distacco a trazione per fessurazione nel piano.

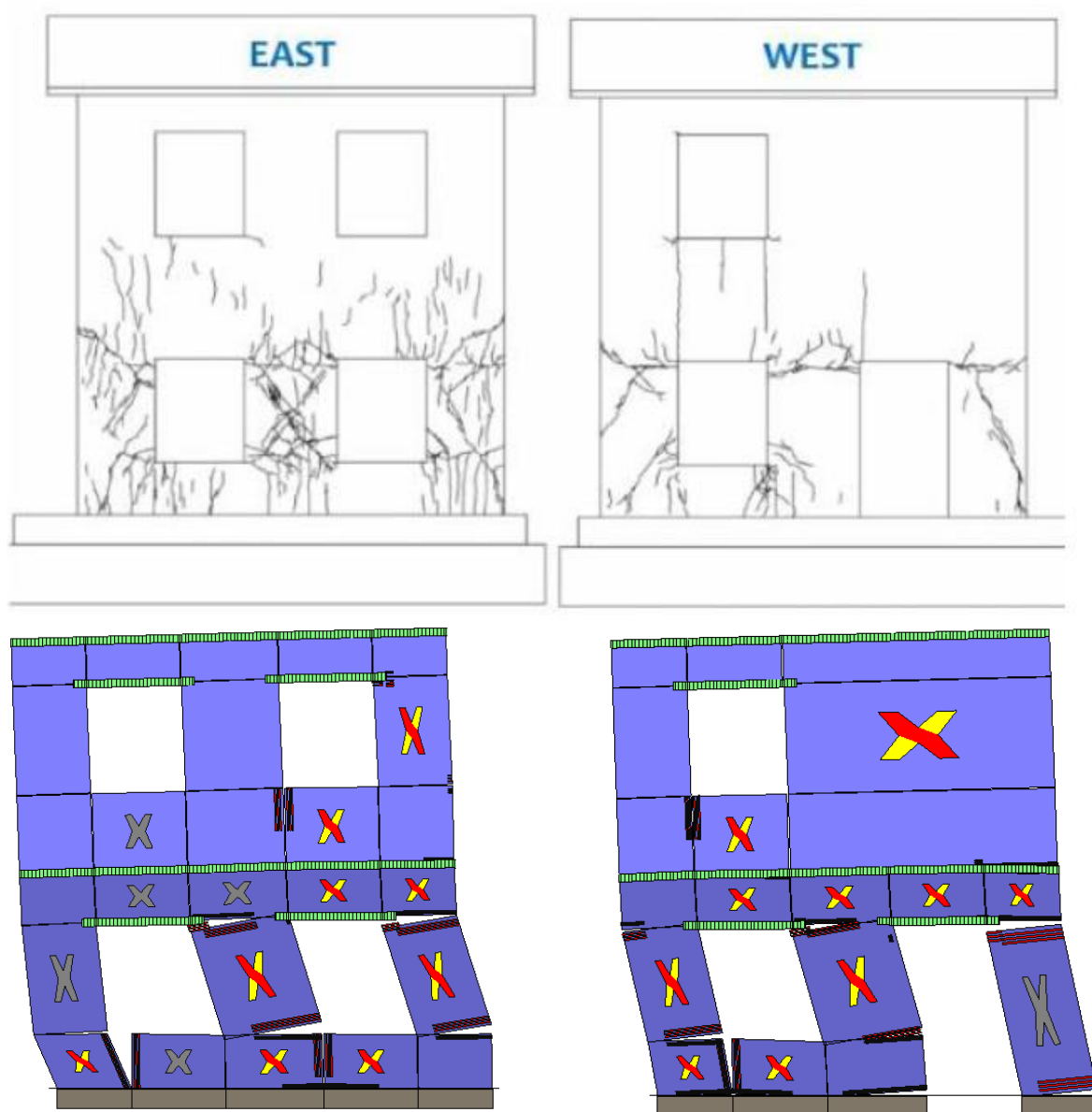


Figura 12: Confronto quadro fessurativo edificio Rinforzato.

L'edificio rinforzato con barre di ancoraggio in fondazione (MB-R+SR) presenta un quadro fessurativo maggiormente diffuso al primo livello con un coinvolgimento parziale del secondo livello lungo le pareti Est ed Ovest, osservato sia sperimentalmente che nella simulazione in ambiente 3DMacro®.

Relativamente al modello rinforzato, ma privo di barre di ancoraggio in fondazione (MB-R), in assenza di risultati sperimentali viene riportato il meccanismo di collasso con relativo quadro fessurativo osservato in 3DMacro® (Figura 13). Il meccanismo prevalente è di rocking e coinvolge tutti i pannelli di fondazione conferendo un comportamento quasi da corpo rigido impedendo di attingere all'incremento di resistenza fornito dal rinforzo e limitandone l'efficacia. Resta quindi fortemente consigliato l'uso delle barre di ancoraggio in accoppiamento col rinforzo Armox®.

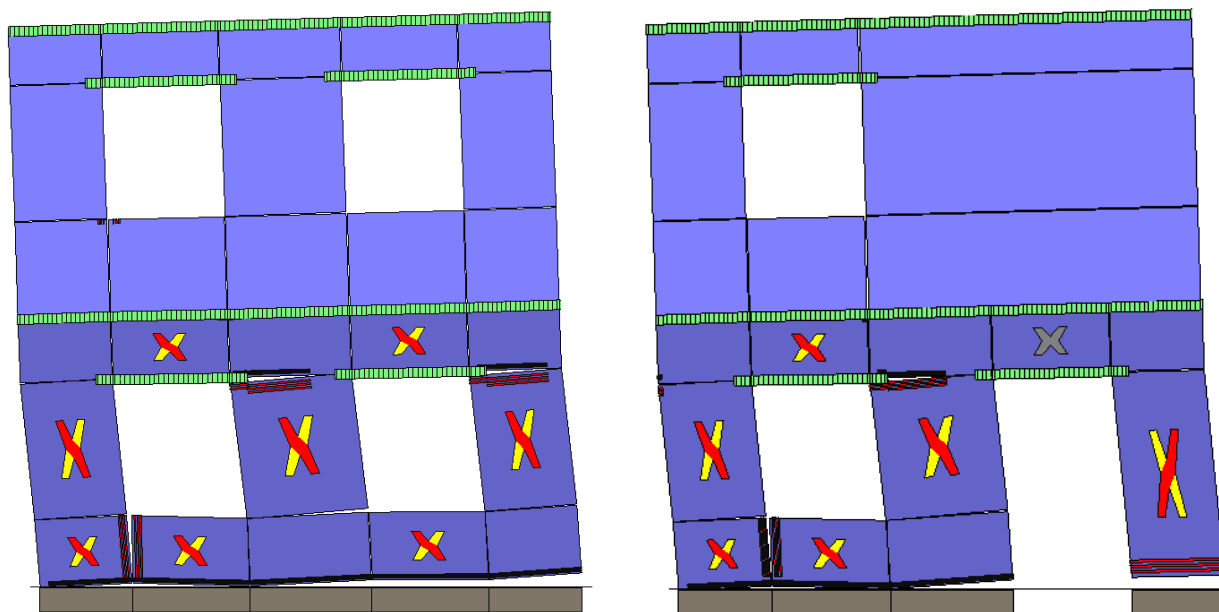


Figura 13: Quadro fessurativo edificio rinforzato senza barre di ancoraggio (MB-R).

5.5 RICALIBRATURA DEL RINFORZO IN ACCORDO CON I DATI DEL CVT

Il prodotto Armox® è stato sottoposto a numerosi test di validazione che gli hanno permesso di ricevere il Certificato di Valutazione Tecnica (CVT) dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. In vista dell'applicazione della tecnica di rinforzo Armox® a casi reali, si è deciso di adottare un approccio di tipo progettuale. A tal fine, a differenza di quanto fatto nei paragrafi precedenti, in cui l'obiettivo era quello di riprodurre la prova sperimentale, i parametri di resistenza del materiale di rinforzo sono stati opportunamente ridotti per attenersi ai valori caratteristici dichiarati nel CVT. Inoltre, il legame a trazione monoassiale dell'intonaco fibrorinforzato, da cui deriva la resistenza a trazione f_{td} , è stato ricavato dai medesimi parametri caratteristici applicando il modello lineare proposto dal Model Code 2010 [6]. Per questo motivo, è stata condotta una nuova analisi sull'edificio oggetto di campagna sperimentale in ambiente Diana®, utilizzando questi nuovi parametri, al fine di ottenere la curva di riferimento per la ricalibrazione dei parametri di taratura in ambiente 3DMacro®. In Figura 14 vengono portati i nuovi valori dei parametri meccanici e dei parametri di taratura adottati.

Figura 14: Parametri meccanici e di taratura in accordo con il CVT.

In Figura 15 sono riportate le curve ottenute utilizzando i nuovi parametri in Diana® (curva grigia) e in 3DMacro® (curva blu). A titolo di confronto, nel grafico sono state riportate anche le curve sperimentali del modello rinforzato (linea puntinata) e le relative curve dei modelli in Diana® (curva nera continua) e in 3DMacro® (curva verde). Come si può osservare le nuove curve (curva grigia e curva blu) ottenute con i due software sono sufficientemente in accordo tra di loro e mostrano una resistenza di picco dell'edificio minore di circa il 15% rispetto a quella osservata sperimentalmente. Tale risultato è in accordo con l'approccio progettuale seguito.

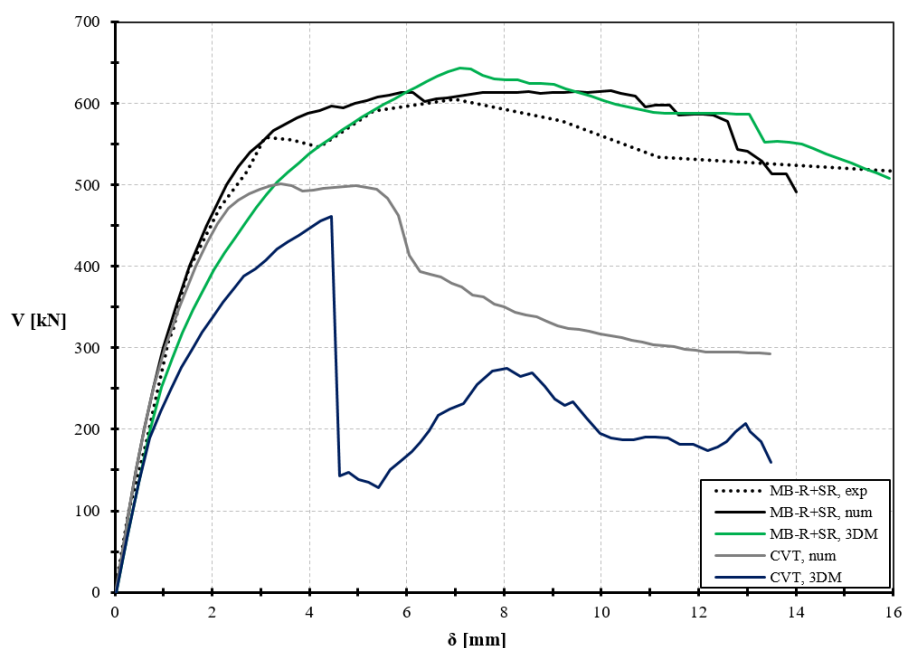


Figura 15: Curve di capacità in accordo con i parametri del CVT a confronto con quelle in accordo con i parametri sperimentali.

6 DEFINIZIONE E APPLICAZIONE DEL RINFORZO ARMOX®

La definizione e l'applicazione dei rinforzi di tipo ArmoX® sui pannelli murari viene eseguita secondo la procedura di seguito descritta. Questo tipo di rinforzo è indicato e pensato per i pannelli in muratura e non sarà possibile applicarlo su setti in c.a.

6.1 DEFINISCI RINFORZI ARMOX®

COMANDO: MENU DEFINISCI> RINFORZI> ARMOX...

In questo ambiente è possibile definire le caratteristiche del rinforzo ArmoX (cfr. Figura 16).

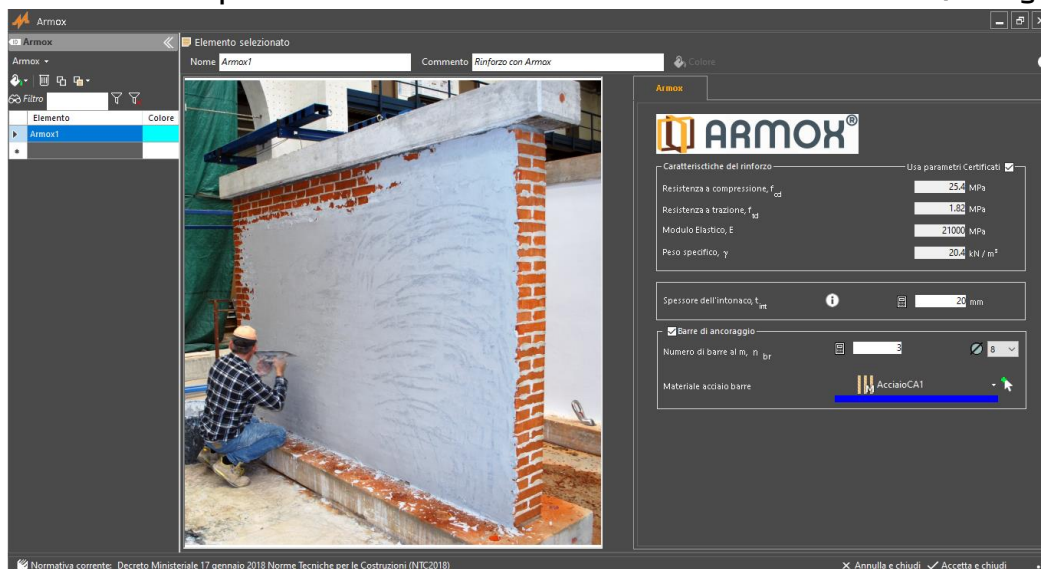


Figura 16: Finestra per la definizione del rinforzo ArmoX®.

L'opzione di default (Figura 16) prevede la possibilità di settare lo spessore dell'intonaco, la presenza delle barre di ancoraggio e il loro numero, diametro e materiale. Togliendo la spunta all'opzione "Usa parametri suggeriti", l'utente avrà la possibilità di modificare anche i parametri che governano il comportamento meccanico del rinforzo, con la sola possibilità di ridurre il valore. Tuttavia, si suggerisce di modificare i parametri di default solo in accordo con un esperto Gruppo Sismica o Tri Materials.

6.2 APPLICAZIONE RINFORZI ARMOX®

Una volta definito il rinforzo, per l'applicazione è possibile seguire tre diverse procedure che si differenziano per il livello di dettaglio da adottare sulla porzione di edificio sul quale applicare il rinforzo. Infatti, è possibile utilizzare una procedura rapida per inserire il rinforzo all'intero edificio o ad intere porzioni di esso; oppure assegnare il rinforzo alle singole regioni murarie; oppure definire una porzione limitata di muratura all'interno della quale applicare il rinforzo.

6.2.1 APPLICAZIONE MEDIANTE INPUT RAPIDO

COMANDO: MENU COSTRUISCI> INPUT RAPIDO DEI RINFORZI...

La finestra per l'applicazione rapida dei Rinforzi consente di applicare i rinforzi ad intere aree della struttura (Figura 17). In particolare, i rinforzi Armox® si attivano scegliendo i "Rinforzi sulle Pareti" ed è possibile scegliere se applicare il rinforzo a tutte le Pareti, solo sui Maschi e/o sulle Fasce e decidere se applicarlo a tutti i livelli o solo ad un livello specifico.

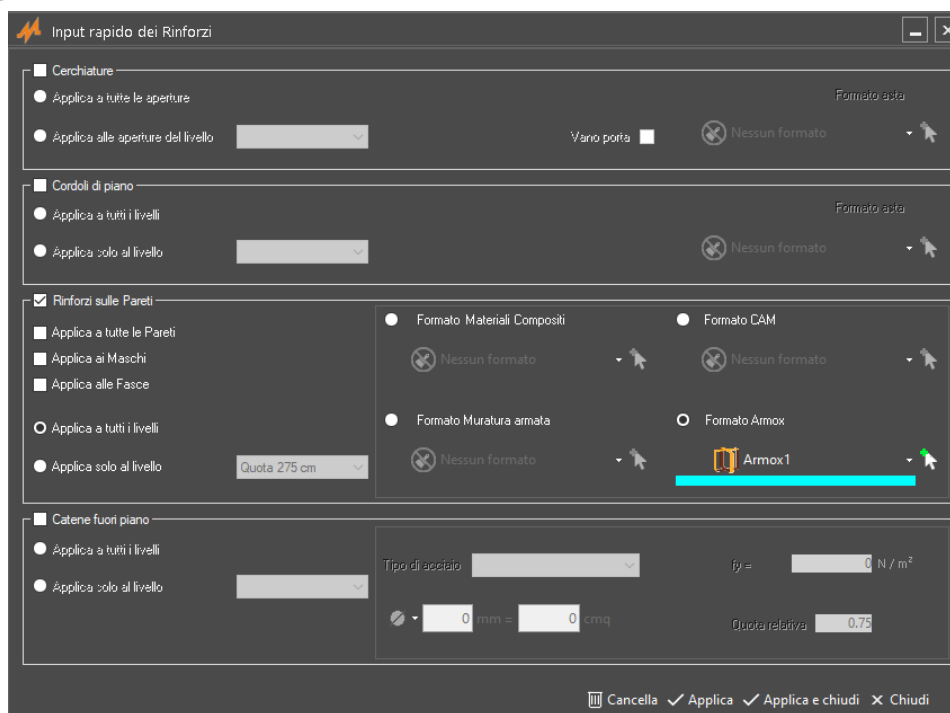


Figura 17: Ambiente di applicazione rapida dei rinforzi.

6.2.2 APPLICAZIONE ALLE REGIONI MURARIE

COMANDO: MENU COSTRUISCI> INPUT PARETI... > MODALITÀ SELEZIONA > REGIONI PIENE > RINFORZO ARMOX

Nell'ambiente di modellazione Editor di Parete, scegliere la modalità Seleziona, cliccando sul comando disponibile sulla barra degli strumenti (cfr. Manuale Utente 3DMacro [5]).



Selezionare una Regione piena e, cliccando con il tasto destro del mouse, accedere al menu contestuale Regioni Piene > Rinforzo Armox e selezionare il rinforzo precedentemente definito (Figura 18).

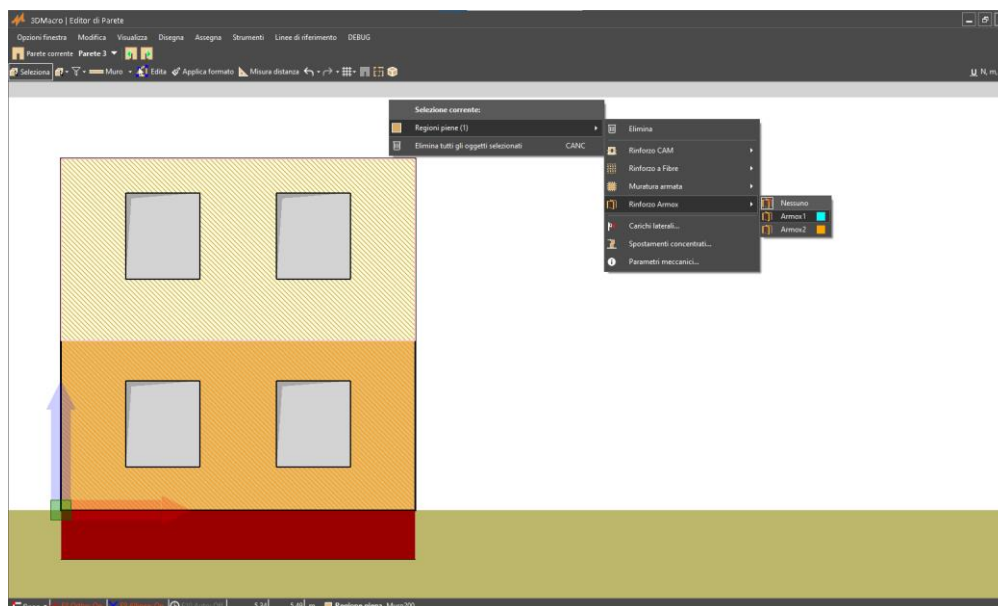


Figura 18: Applicazione Rinforzo Armox® su regione.

Questo comando consente di applicare il rinforzo (e le sue caratteristiche) all'intera regione selezionata (Figura 19), rendendo di fatto il rinforzo come una proprietà della regione e con un notevole alleggerimento della routine di discretizzazione della regione stessa.

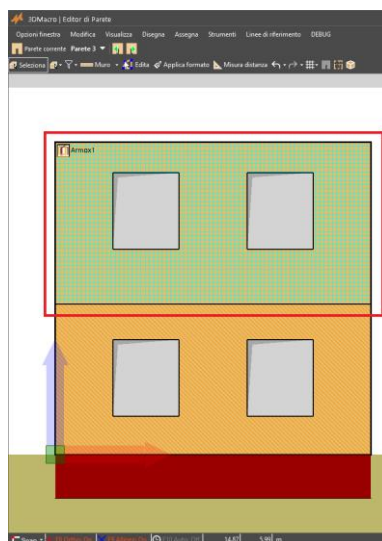


Figura 19: Rinforzo Armox® applicato alla regione.

6.2.3 APPLICAZIONE SULLE AREE DI RINFORZO/AMMALORAMENTO

COMANDO: MENU COSTRUISCI> INPUT PARETI...> MENU DISEGNA>RINFORZO O AMMALORAMENTO

Nell'ambiente di modellazione Editor di Parete, scegliere dal menu Disegna > Rinforzo o Ammaloramento (cfr. Manuale Utente 3DMacro [5]). Nel pannello di Controllo posto sulla destra della finestra (Figura 20), all'interno del riquadro "Rinforzi CAM, Compositi, Muratura Armata, Armox", scegliere il formato Armox®, tra quelli precedentemente definiti. Quindi tracciare il rettangolo corrispondente alla porzione di parete su cui applicare il rinforzo (Figura 21).

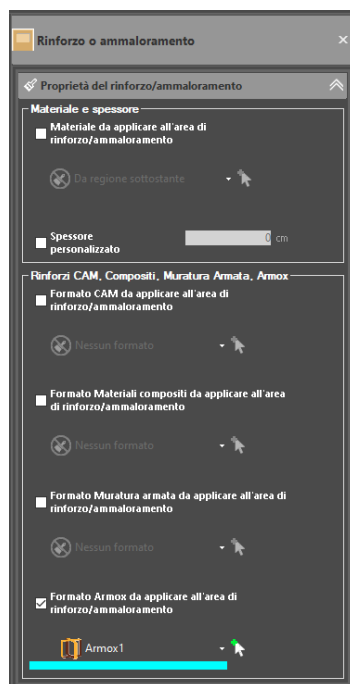


Figura 20: Scelta del formato del rinforzo.

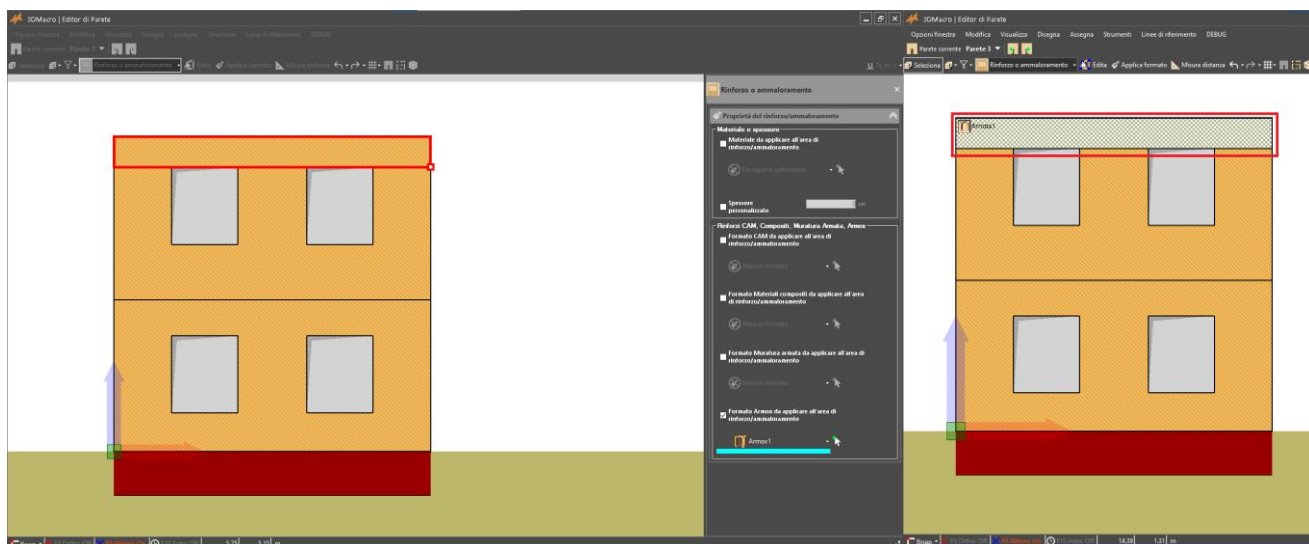


Figura 21: Rinforzo Armox® applicato su una porzione muraria.

Dopo aver applicato il rinforzo è possibile verificare l'effettivo incremento dei parametri meccanici della muratura rinforzata accedendo alla finestra delle Proprietà della regione mostrata nella Figura 22. Questa finestra mostra una tabella dove sono visibili in due colonne i parametri meccanici della regione rinforzata prima e dopo l'applicazione del rinforzo, e una colonna con la percentuale di incremento subita dal parametro a seguito dell'applicazione del rinforzo.

Proprietà regione

Formato: Muratura + Armox1

Parametro	Valore base	Valore rinforzato	Incremento (%)
Legame a flessione	non lineare	non lineare	-
Modulo elastico, Ever	2100000000 N / m²	4839130000 N / m²	130.4348
Modulo elastico, Eor	2100000000 N / m²	4565220000 N / m²	117.3913
Resistenza a compressione, fm,ver	3015000 N / m²	5673910 N / m²	88.18946
Resistenza a compressione, fm,or	3015000 N / m²	5673910 N / m²	88.18946
Resistenza a trazione, ft,ver	100000 N / m²	365217 N / m²	265.2173
Resistenza a trazione, ft,or	100000 N / m²	365217 N / m²	265.2173
epsilon_c	infinito	infinito	-
epsilon_t	infinito	infinito	-
Legame a taglio	non lineare	non lineare	-
G	840000000 N / m²	886212000 N / m²	5.501401
Tau0	65000 N / m²	218135 N / m²	235.592
gamma_u	0.004	8.999999E-05	-97.74999
Coeff. Attrito	0.3	0.3	0
Scorimenti	non attivi	non attivi	-

Figura 22: Proprietà della regione rinforzata.

Per accedere alla finestra delle proprietà di un pannello murario è sufficiente selezionare il pannello desiderato dall’ambiente principale di 3DMacro® e, una volta cliccato col pulsante destro del mouse, selezionare la voce “Parametri meccanici...” come mostrato in Figura 23.

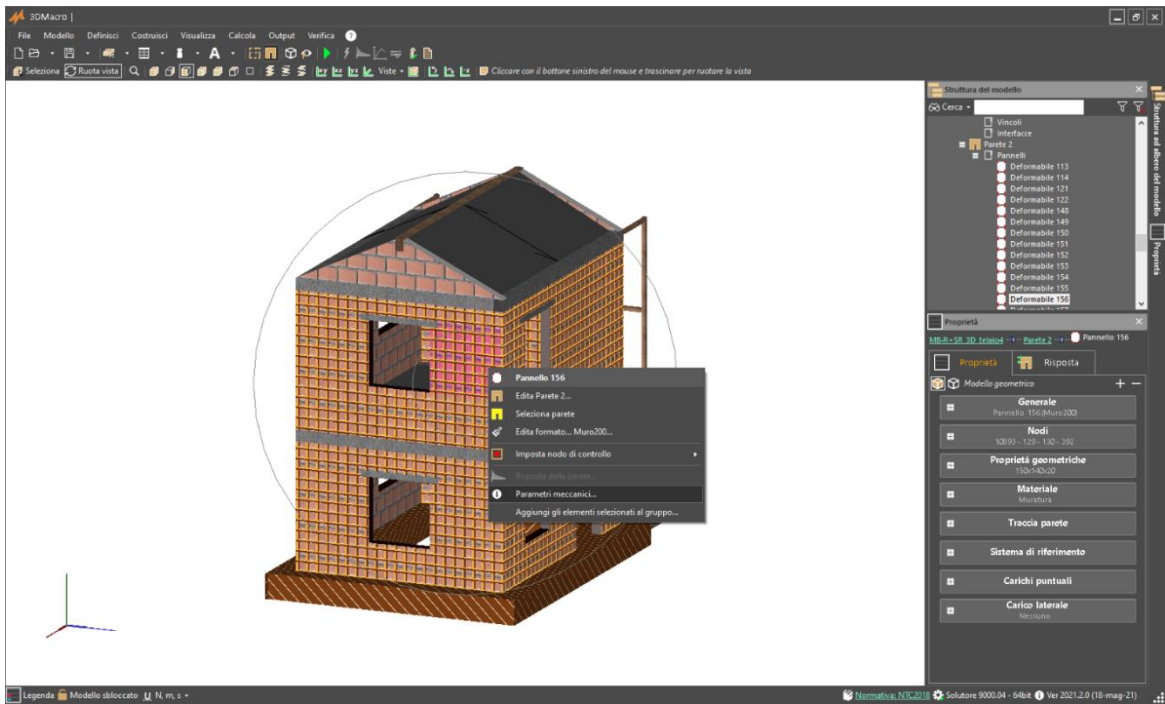


Figura 23: 3DMacro ambiente principale – parametri meccanici della muratura rinforzata.

6.3 REPORT

COMANDO: OUTPUT > REPORT

Dal menu Output, selezionare la voce Report ed accedere alla finestra di compilazione della Relazione di Calcolo e dei Tabulati (Figura 24, cfr. § 4.7.5 del Manuale Utente 3DMacro® [5]).

La reportistica sui rinforzi di tipo Armox® viene restituita in termini di:

- Formato pannelli murari
- Tipologie elementi di rinforzo
- Caratteristiche dei pannelli rinforzati

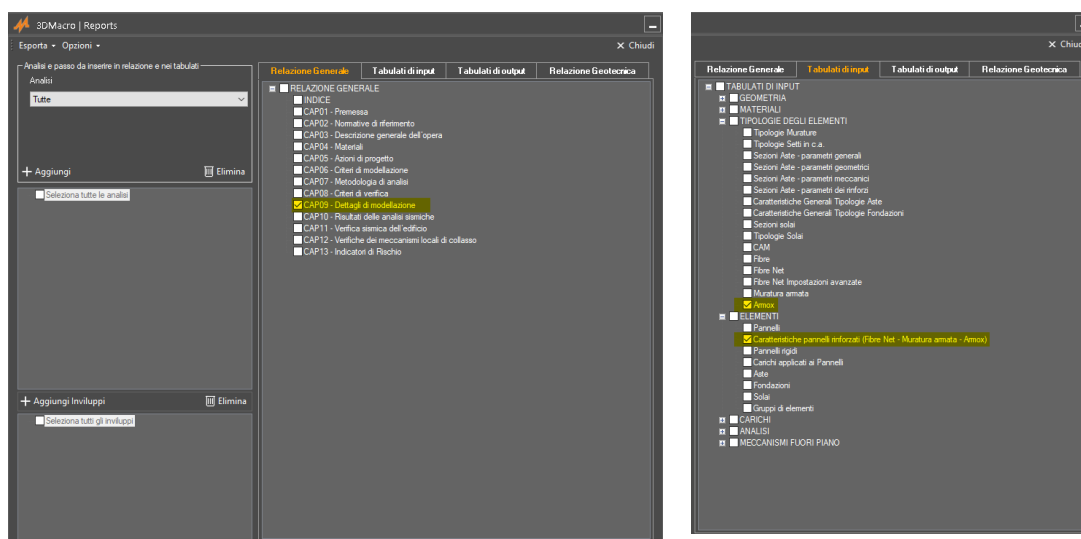


Figura 24: Ambiente di definizione della Reportistica.

Il formato dei pannelli, con la rappresentazione *renderizzata* del rinforzo applicato viene riportato al Capitolo 9 della Relazione di Calcolo “Dettagli di modellazione” come mostrato in Figura 25.

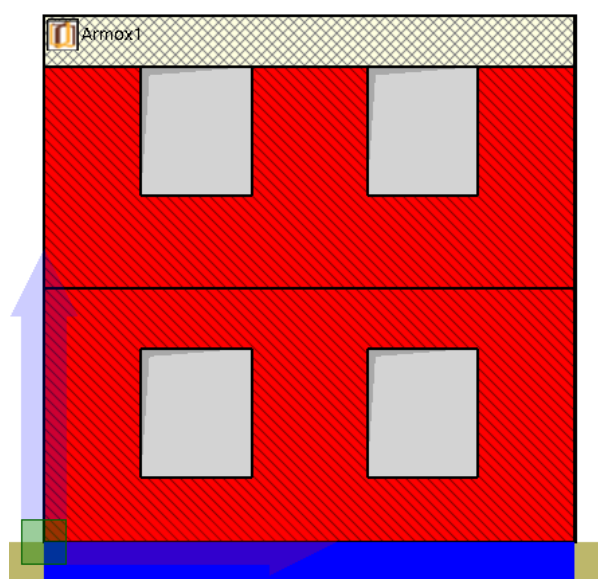


Figura 25: Report – dettagli di modellazione – formati.

La caratterizzazione degli elementi di rinforzo ArmoX® e l'effetto del rinforzo sulla muratura viene riportata nei Tabulati di Input dei Reports in corrispondenza di due specifiche tabelle come mostrato in Figura 26.

Tipologie rinforzi ArmoX®

Nome	:	identificativo della tipologia ArmoX® ;
Tipo	:	tipo di miscela adottata (suggerita - personalizzata);
Caratteristiche meccaniche		
f_{cd}	:	resistenza a compressione;
f_{td}	:	resistenza a trazione;
E	:	modulo elastico;
t_{tot}	:	spessore dell'intonaco;
γ	:	peso specifico;
Barre di ancoraggio		
n_{bx}	:	numero di barre di ancoraggio per metro di muro;
ϕ_{bx}	:	diametro delle barre di ancoraggio.
Materiale barre	:	materiale acciaio delle barre di ancoraggio.

Nome	Tipo	Caratteristiche meccaniche						Barre di ancoraggio	
		f_{cd} MPa	f_{td} MPa	E MPa	t_{tot} mm	γ kN/m³	n_{bx}	ϕ_{bx} mm	Materiale barre
ArmoX1	Personalizzato	35	2.8	21000	30	20.4	3	8	AcciaioCA1
ArmoX2	Personalizzato	35	2.5	21000	30	20.4	3	8	AcciaioCA1

ELEMENTI

Caratteristiche Meccaniche Pannelli murari rinforzati (*)

Id	:	identificativo numerico elemento;
Materiale base	:	materiale del pannello non rinforzato;
Rinforzo	:	nome rinforzo assegnato al pannello;
Parametri che governano il meccanismo di rottura flessionale		
E	:	modulo di elasticità normale;
f_{cm}	:	resistenza a compressione;
f_{tmd}	:	resistenza a trazione;
ϵ_c	:	deformazione ultima a compressione;
ϵ_t	:	deformazione ultima a trazione;
W	:	peso specifico;
Fessurazione diagonale		
G	:	modulo di elasticità tangenziale;
τ_d	:	resistenza a taglio in assenza di sforzo normale;
μ	:	coefficiente d'attrito;
ν_u	:	scorrimento ultimo;

(*) Tabella valida solo per rinforzi tipo Fibre Net, Muratura armata e **ArmoX**.

Id	materiale base	Rinforzo	Parametri che governano il meccanismo di rottura flessionale						Fessurazione diagonale			
			E MPa	f_{cm} MPa	f_{tmd} MPa	ϵ_c ‰	ϵ_t ‰	W kN/m³	G MPa	τ_d MPa	μ	ν_u ‰
102	Muratura	ArmoX2	4585.22	5.67	0.33	-	-	9.14	1431.07	0.17	0.3	0.01

Figura 26: Report – tabulati di input.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AA. VV, "Manuale Teorico 3DMacro® ver. 1.11103101", 2020 – Gruppo Sismica srl, Catania
- [2] Calì, Marletta, Pantò, "A new discrete element model for the evaluation of the seismic behavior of unreinforced masonry buildings", 2012 – Engineering Structures 40 (2012) 327–338, Italy
- [3] Calì, Pantò, "A macro-element modelling approach of Infilled Frame Structures", 2014 – Computers and Structures 143 (2014) 91–107, Italy
- [4] Lucchini et al., "Cyclic Test on a Full-Scale Unreinforced Masonry Building Repaired with Steel Fiber-Reinforced Mortar Coating", 2021 – Journal of Structural Engineering 147 (2021) 6, Italy
- [5] AA. VV, "Manuale Utente 3DMacro® ver. 20210312_01", 2021 – Gruppo Sismica srl, Catania
- [6] fib Bulletin 65, "Model Code 2010, Final Draft", Federazione Internazionale del Calcestruzzo Strutturale (fib), 2012.
- [7] D.M. 17 gennaio 2018. "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»", Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018.
- [8] UNI EN 14651:2007. "Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche – Misurazione della resistenza a trazione per flessione [limite di proporzionalità (LOP), resistenza residua]", Comitato Europeo di Normazione, 2007.