

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Facoltà di Ingegneria

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

**ANALISI NUMERICA DI PANNELLI IN
MURATURA RINFORZATI CON FRP**

Elaborato finale in Tecnica delle Costruzioni L-M

Laureando:

FRANCESCO SAVERIO MURGO

Relatore:

Prof.Ing. CLAUDIO MAZZOTTI

Correlatore:

Prof.Ing. MARCO SAVOIA

Anno Accademico 2010 – 2011 – Terza sessione

*Ai miei genitori,
mio fratello, mia sorella,
Simona,
zia Lella, zia Carmela, zia Maria
e i miei cari.*

INDICE

Introduzione	5
1 Muratura rinforzata con FRP	7
- 1.1 Modalità di crisi di elementi rinforzati con FRP.....	18
2 Modello A : mattone – FRP	21
- 2.1 Proprietà dei materiali.....	22
- 2.2 Modellazione geometrica.....	27
- 2.3 Modellazione delle proprietà meccaniche.....	34
- 2.4 Discretizzazione del modello geometrico.....	41
- 2.5 Interfaccia mattone-FRP.....	49
- 2.6 Vincolamento e condizioni di carico.....	55
• 2.6.1 Vincolamento.....	55
• 2.6.2 Load set.....	61
- 2.7 Analisi non lineare.....	65
- 2.8 Elaborazione dei risultati numerici.....	74
3 Modello B : muretto – FRP	99
- 3.1 Proprietà dei materiali.....	100
- 3.2 Modellazione geometrica.....	109
- 3.3 Modellazione delle proprietà meccaniche.....	112
- 3.4 Discretizzazione del modello geometrico.....	117
- 3.5 Interfaccia mattone/malta-FRP.....	128
- 3.6 Vincolamento e condizioni di carico.....	137
• 3.6.1 Vincolamento.....	137
• 3.6.2 Load set.....	141
- 3.7 Analisi non lineare.....	143
- 3.8 Elaborazione dei risultati numerici.....	147

4 Modello C : parete	166
- 4.1 Proprietà dei materiali.....	170
- 4.2 Modellazione geometrica.....	172
- 4.3 Modellazione delle proprietà meccaniche.....	177
- 4.4 Discretizzazione del modello geometrico.....	180
- 4.5 Interfaccia mattone-mattone.....	183
- 4.6 Vincolamento e condizioni di carico.....	189
• 4.6.1 Vincolamento.....	189
• 4.6.2 Load set.....	191
- 4.7 Analisi non lineare.....	194
- 4.8 Elaborazione dei risultati numerici.....	200
5 Modello D : parete con rinforzo FRP	214
- 5.1 Modellazione geometrica e discretizzazione.....	215
- 5.2 Interfaccia mattone-FRP.....	220
- 5.3 Vincolamento e condizioni di carico.....	221
- 5.4 Analisi non lineare.....	223
- 5.5 Elaborazione dei risultati numerici.....	224
Bibliografia	240

INTRODUZIONE

La seguente tesi è stata realizzata al fine di creare un modello di calcolo valido per la schematizzazione di pannelli in muratura rinforzati con FRP, materiali fibrorinforzati a matrice polimerica, in grado per l'appunto di apportare ulteriore resistenza alla struttura.

L'analisi non lineare del modello è stata effettuata con il codice di calcolo Midas Fea, un software specializzato per analisi lineari e non lineari avanzate e dettagli costruttivi nel campo dell'ingegneria civile ed infrastrutturale.

Il lavoro è stato svolto percorrendo diversi step di difficoltà, partendo dal modello semplice fino ad arrivare al modello generale più complesso, ovvero quello caratterizzato dal pannello in muratura.

Il primo passo è stato quello di semplificare il problema in questione andando quindi ad effettuare un primo modello semplificato, caratterizzato da un singolo mattone sulla cui faccia superiore è posizionata la lamina fibrorinforzata.

Sono state inserite le proprietà dei diversi materiali caratterizzanti il modello, è stata creata un'opportuna legge di interfaccia, tale da descrivere il modo in cui i due elementi sono in grado di scambiarsi gli sforzi ed è stata effettuata l'analisi non lineare, ricavando i risultati necessari per poter sviluppare la successiva analisi. Un punto importante dell'analisi effettuata su questo primo modello è stato caratterizzato dalla calibrazione della legge di interfaccia mattone – FRP, in quanto inizialmente è stata inserita una interfaccia semplificata, e solo successivamente l'attenzione si è soffermata sull'aggiustamento della legge stessa.

È stato quindi possibile, una volta a disposizione il modello con la legge di interfaccia calibrata, andare a confrontare i risultati ottenuti dal punto di vista numerico, con quelli ottenuti dalla campagna di prove sperimentali effettuate da Alessandro Bellini, svolta presso il Laboratorio dei materiali.

Passo successivo è stato quello, di modellare un muretto caratterizzato da elementi mattone e elementi malta, il tutto rinforzato con FRP, l'obiettivo in questa seconda fase è stato sempre lo stesso, quindi andare a vedere nel suo complesso il comportamento dell'oggetto, facendo particolare attenzione alla legge di interfaccia, e confrontare i risultati numerici con i risultati sperimentali.

L'ultimo step è stato quello, che dal punto di vista numerico rappresenta il punto di arrivo della tesi, quindi la valutazione del comportamento del pannello in muratura in un primo momento senza rinforzo e successivamente con l'inserimento dei rinforzi, secondo delle direzioni ben precise.

Sono state applicate le strisce di FRP, in maniera opposta nelle due facce, quella anteriore e quella posteriore, poiché è stato effettuato un caricamento ciclico, applicando degli spostamenti nella testa della parete, caratterizzata da un materiale differente rispetto alla muratura, ovvero calcestruzzo, dotato inoltre di elevate proprietà meccaniche in maniera tale da non essere il punto debole del modello.

È stato quindi possibile alla fine di questo lavoro valutare il reale contributo da parte delle lamine di FRP, sia alla rigidità della parete, sia il contributo dal punto di vista della duttilità, ed è stato possibile fare numerose considerazioni dal punto di vista del comportamento tensionale e deformativo della parete, ed anche riguardo l'interfaccia mattone-FRP.

Vengono di seguito riportati dei riassunti riguardanti i diversi capitoli:

Capitolo 1: viene discusso il ruolo della muratura dal punto di vista strutturale e paesaggistico, vengono discussi i diversi meccanismi di crisi, ed il contributo di eventuali rinforzi.

Capitolo 2: in questo capitolo è trattato il primo modello, caratterizzato dal singolo mattone con il rinforzo posto sulla faccia superiore, vengono valutati in particolare i diversi risultati ottenuti con la modellazione.

Capitolo 3: viene trattato il secondo modello, quello costituito dal muretto, quindi diverse file di mattoni alternati con la malta, anche in questo caso sono discussi i vari risultati ottenuti dalla modellazione numerica, si fa particolare attenzione al legame di interfaccia mattone/malta-FRP, oltre all'andamento delle tensioni lungo i singoli elementi.

Capitolo 4: viene esposto il modello caratterizzato dalla parete, costituita con elementi mattoni ed elementi interfaccia che schematizzano il comportamento della malta, viene valutato l'andamento delle tensioni e dei meccanismi di crisi.

Capitolo 5: è discusso il modello costituito dalla parete rinforzata con FRP, vengono valutate le diverse sollecitazioni, ed effettuati numerosi confronti per valutare l'apporto da parte dell'FRP, dal punto di vista di rigidità e duttilità.

1 MURATURA RINFORZATA CON FRP

Il patrimonio storico nazionale, appartenente sia all'edilizia storica monumentale sia a quella locale abitativa dei piccoli e medi centri urbani presenti in molte regioni a rischio sismico, è largamente costituito da costruzioni in muratura di pietra o mattoni.

Nell'ambito delle murature presenti sul territorio nazionale, le murature di pietra sono caratterizzate da un'estrema varietà tipologica e da forte irregolarità (sia in sezione sia in facciata) e disomogeneità. Inoltre, spesso, la loro conformazione è assimilabile ad un muro multistrato (con paramenti esterni di conci di pietra e nucleo pressoché incoerente, il quale può costituire anche la maggior parte dello spessore), il cui collegamento trasversale, realizzato essenzialmente dalla malta tra i conci, è carente o addirittura mancante. Lo strato di riempimento è generalmente caratterizzato dalla presenza di vuoti, distribuiti disordinatamente insieme con inerti e malta. Gli inerti possono essere di varia natura (pietra di cava, ghiaia di fiume, laterizio) e di diverse forme e dimensioni (elementi ricavati da operazioni di taglio, ciottoli, zeppe), e può esservi presenza di terra, argilla, sostanze organiche; le malte sono generalmente di scarsa qualità e spesso non circondano completamente gli elementi resistenti.

Contrariamente alle murature in pietra, le murature di mattoni presentano caratteristiche di regolarità ben riconoscibili sia riguardo alla tessitura sia ai materiali (impiego di malta e mattoni, di caratteristiche determinabili con semplici prove di laboratorio). Il degrado di tali strutture è caratterizzato essenzialmente da distacchi (mattoni e/o malta) e da fessurazioni più o meno diffuse.

I problemi strutturali delle murature in pietra sono da annoverare principalmente nella scarsa portanza (malta inconsistente o mancante, eccessiva presenza di vuoti ecc.), e nella debole connessione trasversale dei paramenti, i quali tendono a sviluppare meccanismi di collasso "anticipati" rispetto alla rottura per compressione del materiale per fenomeni di uscita dal piano sia sotto carichi verticali (per instabilità dei singoli paramenti) sia sotto carichi orizzontali (per espulsione localizzata di uno strato in presenza di carichi verticali deboli o per l'accentuarsi dei fenomeni di instabilità in presenza di carichi verticali elevati). In tal senso, le tecniche d'intervento sono quindi rivolte al consolidamento del nucleo

interno (iniezioni) ed al rafforzamento della connessione tra i paramenti esterni (collegamento trasversale, in presenza o meno di intonaci armati, iniezioni).

Per le murature di mattoni, l'impiego delle iniezioni è invece generalmente finalizzato al risarcimento delle lesioni, oppure, in situazioni particolari di degrado superficiale, alla realizzazione di una barriera sigillante all'ulteriore degrado. Inoltre, per entrambe le tipologie, quale integrazione al degrado delle malte, può essere impiegata efficacemente la ristilatura dei giunti di malta. Indagini diagnostiche sugli edifici esistenti rivelano frequenti situazioni di degrado fisico-meccanico dei materiali costituenti e strutturale dei manufatti, dovuto ad eventi sismici (ad es. terremoto Umbria-Marche 1997) ed aggressione ambientale. In particolare, i diversi fenomeni di degrado delle murature esistenti sono essenzialmente dovuti alla presenza di acqua, sia essa di risalita o ricevuta direttamente dall'aria o dalle piogge. Da un punto di vista fisico, l'acqua, per fenomeni di soluzione e/o evaporazione può essere causa di un impoverimento delle componenti delle malte esistenti (dilavamento dei leganti aerei) e/o essere responsabile di possibili coazioni interne (variazioni volumetriche, effetto gelo disgelo, cristallizzazione dei sali idrosolubili ed eventuale formazione di efflorescenze superficiali). Invece, da un punto di vista chimico, la simultanea presenza di costituenti reattivi (solfati, alcali) può attivare fenomeni espansivi e fessurativi legati alla formazione di ettringite e thaumasite o connessi alla nota reazione alcali-aggregato. Tali fenomeni possono avvenire nella muratura esistente in virtù della tipologia dei materiali presenti, ossia del tipo di malta (legante ed inerte) e del tipo di elemento resistente (mattono o pietra), oppure, in situazioni non potenzialmente pericolose, a causa dell'apporto di materiali incompatibili in fase d'intervento. Altre cause di degrado sono: vetustà, interventi antropici, cedimento delle fondazioni, cedimenti differenziali e spinte non equilibrate. Esse inducono stati fessurativi nelle strutture in muratura non sopportabili a causa della limitata resistenza a trazione del materiale muratura, i quali richiamano la forte necessità d'interventi di tutela mirata.

L'argomento è caratterizzato da forti carenze, in particolar modo per le murature, contraddistinte da varietà tipologiche e costitutive estremamente diverse, sia storicamente (epoche costruttive) che geograficamente sul territorio. La scelta dell'intervento più appropriato, ossia l'individuazione della giusta combinazione tecnica-materiali per il consolidamento è quindi strettamente legata alla muratura oggetto del consolidamento. Ciò implica una attenta conoscenza del supporto (morfologia, tipologia, materiali) e del suo

comportamento meccanico (problema strutturale specifico) e di adeguati studi sui materiali di apporto. Infatti, in mancanza di tali elementi in fase di progetto, e nella possibile concomitanza di difetti di esecuzione, un intervento può risultare inefficace, o addirittura deleterio, per le costruzioni esistenti.

Il moderno approccio, riconosciuto anche dall'ultima normativa sismica (mediante l'introduzione del concetto di "miglioramento", accanto a quello di "adeguamento") e confortato anche da recenti osservazioni sul campo (ad es. sisma Umbria-Marche 1997), pone particolare riguardo al mantenimento dell'identità del manufatto, al fine di alterare il meno possibile il suo comportamento originario. Quindi, nella scelta degli interventi deve essere posta particolare attenzione ai principi della conservazione. Pertanto, l'intervento non deve essere finalizzato solo al raggiungimento di un appropriato livello di sicurezza della costruzione, ma deve garantire anche: compatibilità e durabilità, integrazione e non trasformazione della struttura, rispetto di concezione e tecniche originarie della struttura, bassa invasività, reversibilità o rimovibilità, se possibile, e minimizzazione dell'intervento. Nel 1996, in Italia, ha avuto inizio l'applicazione di materiali compositi fibrorinforzati (FRP) per interventi di ripristino e di rinforzo di costruzioni in c.a. ed in muratura, poiché poco invasivi, estremamente leggeri e con elevate proprietà meccaniche.

Il connubio muratura/compositi FRP permette di conferire alle strutture storiche caratteristiche meccaniche idonee a diminuirne la vulnerabilità mantenendone inalterato il funzionamento strutturale.

L'intervento di rinforzo ha lo scopo di conseguire, prioritariamente, per i singoli elementi strutturali e per l'intera costruzione un incremento di resistenza nei confronti delle azioni sollecitanti ed, in subordine, un aumento dei valori degli spostamenti esibiti all'atto del collasso.

L'esperienza del terremoto che ha colpito l'Umbria e le Marche nel 1997, ha mostrato che le modalità di collasso per le strutture in muratura esistenti consistono nella formazione di cinematismi con perdita di equilibrio per pareti od interi assemblaggi di pareti, con prevalenza dei meccanismi fuori piano sia a livello globale sia locale, come si vede nelle seguenti figure sottostanti:



Figura 1.1 - Modalità di collasso fuori piano: crollo dell'angolata.



Figura 1.2 - Modalità di collasso legata alla scarsa qualità della muratura: crolli locali ed espulsione di materiale.



Figura 1.3 - Modalità di collasso nel piano: lesioni incrociate o diffuse nelle zone al di sopra degli architravi delle coperture.

L'impiego di FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) viene sempre più considerato per il rinforzo e la riparazione di elementi murari portanti (muri, volte, pilastri) in edifici esistenti.

Numerosi casi applicativi sono presenti in letteratura, così come ormai numerosi sono gli studi sperimentali volti a caratterizzare, dal punto di vista strutturale, le prestazioni della muratura nelle nuove condizioni di esercizio. L'intervento si basa sull'incollaggio di tessuti costituiti da materiali fibrosi ad elevata resistenza meccanica, applicati sul supporto murario mediante resine di varia natura. La facilità esecutiva della tecnica e l'efficacia del tipo di rinforzo nel sopperire alla carente resistenza a trazione della muratura consentono di realizzare sistemi caratterizzati da limiti di resistenza molto più elevati della muratura tradizionale e da un comportamento a rottura meno fragile. La presenza del rinforzo permette, infatti, di mantenere legati gli elementi resistenti, finanche nella situazione di

collasso. In tal senso, la fragilità intrinseca al materiale di rinforzo, dovuta all'elevato modulo elastico, diviene un fattore secondario, compensato da valori di resistenza a trazione praticamente non raggiungibili in esercizio dalla muratura. Dal punto di vista strutturale, la tecnica si presta quindi molto bene al miglioramento del comportamento a flessione o a taglio, anche in ambito sismico. Altri vantaggi tipici dei materiali fibrorinforzati sono le ottime proprietà chimico-fisiche, quali la bassa densità, l'elevata resistenza alla corrosione, la bassa conduttività, ecc., peraltro non sempre comuni alle numerose tipologie riscontrabili sul mercato (barre e laminati realizzati con fibre di carbonio, vetro, polivinilalcol, aramide, ecc.).

Dal punto di vista del calcolo non esistono delle formulazioni univoche. A livello internazionale si fa tuttora riferimento ai modelli teorici adottati per le strutture di cemento armato, calibrati in base ai risultati di prove sperimentali effettuate sulla muratura. Le ricerche sono tese ad individuare i meccanismi di collasso "modificati" dalla presenza del rinforzo ed a fornire schemi per la definizione dei relativi contributi resistenti. Ne deriva che, nel contesto applicativo, il progetto degli interventi è realizzato in assenza di metodi più o meno rigorosi, non essendo ancora disponibile una normativa specifica; ciò concerne la scelta del tipo di materiali (sistemi fibra-resina), il dimensionamento del rinforzo in termini di larghezza e spessore (numero di strati di fibra eventualmente sovrapposti) e la distribuzione dello stesso sulla superficie muraria, a seconda delle prestazioni strutturali richieste.

Il sistema proposto consiste nell'applicazione di strisce di FRP di determinata larghezza mediante apposite resine (nella fattispecie di tipo epossidico), con diverse finalità (regolarizzazione della superficie del supporto, adesione e protezione del fibrorinforzato). I materiali componenti il rinforzo vengono disposti per strati successivi, previa livellatura e pulitura superficiale della muratura nell'area di applicazione; l'efficacia dell'intervento è, infatti, strettamente legata all'adesione del sistema muratura-fibra, al fine di consentire l'attivazione del contributo del rinforzo solidalmente alla muratura. In situ, è pertanto spesso necessario rimuovere gli strati ricoprenti non portanti (malte e intonaci) ed eliminare le irregolarità superficiali fino a scarti preferibilmente non superiori al millimetro. Tali operazioni possono essere effettuate sia con mezzi meccanici (sabbatura per la pulitura delle superfici e utilizzo di flessibile per la livellatura) che manuali (impiego di spazzole abrasive e di scalfittura, rispettivamente per le due operazioni citate). Sulle superfici così

preparate viene disposto inizialmente uno strato di prodotto impregnante (anche in più strati, a seconda della porosità della muratura), applicato mediante pennello o rullo, con lo scopo di favorire l'aggrappo degli strati successivi al supporto; ad avvenuta asciugatura del prodotto (che può richiedere oltre le 12 ore), viene disposto un successivo strato di stucco epossidico, applicato a mano mediante frattazzo, che consente di uniformare la superficie di applicazione delle fibre, avendo cura di stendere il materiale con sufficiente regolarità e limitatezza di spessore. Su tale superficie, dopo circa 30 minuti dall'applicazione, è possibile procedere alla stesura del primo strato di adesivo, sul quale vengono disposte le strisce di fibra. Queste vengono fatte aderire alla resina mediante pressione manuale e successivo passaggio con rullo dentato, il quale permette di eliminare le bolle d'aria eventualmente inglobate tra le fibre e lo strato di resina, impregnando le fibre stesse con l'adesivo.

Con modalità analoghe alla stesura della prima mano di adesivo, viene disposto un successivo strato dello stesso al di sopra delle fibre, al fine di permearle completamente di resina. Nel caso si necessiti di ulteriori strati di rinforzo, questi vengono applicati in successione al di sopra degli strati precedenti, avendo cura di non dislocare le fibre sottostanti e rispettando i tempi necessari a rendere pronta la superficie di adesione. Infine, ove necessario, il sistema può essere completato da uno strato protettivo superficiale alle radiazioni ultraviolette (fibre aramidiche o poliestere).

L'applicazione dei materiali compositi nell'ambito del rinforzo strutturale consente diverse tipologie di interventi.

In generale si possono progettare interventi di:

- Rinforzo a flessione : di travi che sono state soggette a degrado o che non risultano più idonee alla nuova destinazione d'uso della struttura e che ad ogni modo presentano una resistenza inferiore a quella richiesta. Il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare lamine preformate o strati di tessuto impregnati in situ (*figura 1.3*)

- Rinforzo a taglio: mediante applicazione in aderenza sulla superficie esterna dell'elemento da rinforzare di compositi fibrorinforzati (tipicamente strisce di tessuto), che vanno a costituire uno o più strati.

Le strisce possono essere applicate in maniera continua oppure discontinua. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla superficie può avvenire secondo modalità diverse: tipicamente si può avere una disposizione laterale, ad U o in avvolgimento (*figura 1.4*)

• Confinamento di elementi soggetti a pressoflessione (pilastri in c.a e colonne in muratura): non dotati di adeguata resistenza, mediante fasciatura esterna continua (ricoprimento) o discontinua (cerchiatura), realizzata mediante tessuti o lamine di FRP. Spesso vengono utilizzate anche barre (tiranti) di FRP nel confinamento di colonne in muratura. Il confinamento risulta molto efficace perché permette di incrementare la resistenza dell'elemento e la sua duttilità. Esempi di confinamento realizzati mediante fasciatura continua e discontinua sono riportati in *figura 1.5*.

• Recupero di condotte, tubi, serbatoi, vasche, pali e altri manufatti in c.a

• Rinforzo di pannelli murari

• Rinforzo di elementi a semplice e doppia curvatura (archi, volte, cupole)

• Riduzione della spinta di strutture spingenti

• Trasformazione di elementi non strutturali in elementi strutturali, mediante conferimento di rigidità e capacità resistente

• Fasciatura o incatenatura dell'edificio in modo da garantirne la monoliticità e il comportamento scatolare ottimale

• Rinforzo (recupero) di solai in legno allo scopo di aumentarne la rigidità e la capacità portante



Figura 1.4 - Rinforzo a flessione e a taglio di una trave in c.a.

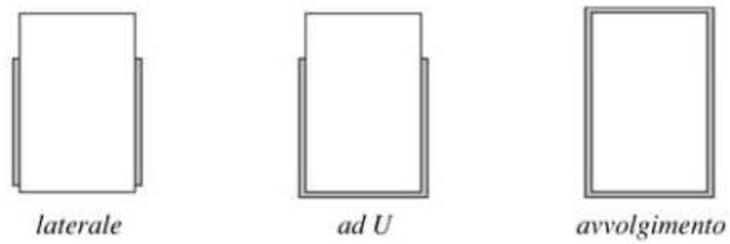


Figura 1.5 - Modalità di disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione.



Figura 1.6 - Esempio di confinamento realizzato mediante fasciatura esterna continua (a sinistra) e discontinua (sulla destra).



Figura 1.7 - Esempio di rinforzo di una volta.

Le tecniche di intervento utilizzate nell'ambito del recupero strutturale sono diverse, ma nell'applicazione dei materiali compositi si possono distinguere essenzialmente due categorie principali: quella degli interventi di placcaggio e quella delle opere di confinamento.

Il *placcaggio* consiste nell'applicazione del rinforzo in aderenza al lembo teso di elementi inflessi e permette di aumentare la capacità portante oltre a ridurre gli stati fessurativi.

Il *confinamento* (o wrapping) consiste invece, come già descritto in precedenza, nella fasciatura di elementi compressi o pressoinflessi, come pilastri, colonne e pile di ponti, con la finalità di conferire a questi elementi una maggiore resistenza e duttilità, requisiti essenziali in zona sismica.

L'utilizzo dei compositi fibrorinforzati ha permesso di risolvere brillantemente le problematiche inerenti agli interventi di risanamento di strutture danneggiate o degradate, adeguamento strutturale e rapida messa in sicurezza di costruzioni in condizioni di emergenza.

L'inserimento dei rinforzi permette di trasferire sforzi di trazione all'interno dei singoli elementi strutturali, di collegare elementi che collaborano per resistere ad un'azione esterna (es. catene o connessioni tra pareti ortogonali), di limitare l'apertura delle fessure, di eseguire opere di confinamento, di incrementare la resistenza di pannelli murari, archi e volte.

L'impiego degli FRP, nonostante il costo del materiale risulti ancora piuttosto elevato, viene comunque favorito dalla minor richiesta di manodopera e attrezzature e dalla realizzazione generalmente più rapida dell'intervento rispetto alle tecniche tradizionali.

1.1 Modalità di crisi di elementi rinforzati con FRP

In questa sezione si presenta una breve descrizione delle modalità di crisi di elementi rinforzati in c.a. e muratura, analizzando i modi di rottura per distacco dal supporto che possono verificarsi.

Vista la sostanziale diversità delle caratteristiche del supporto tra queste due tipologie, le modalità di crisi verranno descritte separatamente per elementi in c.a. e strutture murarie.

Nel caso del rinforzo di elementi strutturali in c.a. la crisi può avvenire secondo le seguenti modalità:

- *Si arriva a rottura per schiacciamento del calcestruzzo in zona compressa o per rottura a trazione del rinforzo in FRP con il composito che risulta ancora applicato.*
- *Non si raggiunge la resistenza ultima dei materiali perché si verifica un prematuro distacco dal supporto della lamina o del tessuto utilizzati.*

Tra le due modalità di crisi indicate, la seconda sicuramente non è quella preferibile, perché si manifesta in maniera estremamente fragile, ma purtroppo va detto che si tratta di una crisi tipica della tecnica del rinforzo strutturale.

Il meccanismo che consente il trasferimento della forza tra calcestruzzo e rinforzo è quello dell'aderenza.

Quando viene meno l'adesione tra i materiali si ha una crisi fragile, che a seconda dell'interfaccia nella quale si manifesta può dare luogo a:

- *Distacco del calcestruzzo vicino alla superficie oppure lungo uno strato indebolito, come ad esempio lungo l'interfaccia con le armature.*

In questa modalità di rottura si assiste ad un distacco del composito dal supporto insieme ad una porzione di calcestruzzo di una certa entità: si tratta di una tipica frattura coesiva, preferibile rispetto ad una frattura adesiva oppure mista.

- *Crisi adesiva all'interfaccia tra adesivo e calcestruzzo oppure tra adesivo ed FRP: la crisi che si manifesta è tipicamente quella all'interfaccia calcestruzzo-adesivo ed è indice di una non perfetta preparazione della superficie o di una non corretta applicazione della lamina.*

- *Crisi (frattura) mista*: che si manifesta con superfici di rottura piuttosto irregolari con coesistenza di parti in cui si è raggiunta la resistenza del substrato (di cui una parte è rimasta quindi incollata al rinforzo) e parti in cui è avvenuta una crisi adesiva all'interfaccia tra calcestruzzo e rinforzo (*figura 1.1.1*). Si tratta di una crisi intermedia tra una frattura adesiva e una coesiva e di solito si manifesta quando il substrato non è ben consolidato e/o quando l'adesivo non è stato applicato in maniera ottimale.

- *Delaminazione all'interno della lamina in FRP*: è una rottura che si manifesta piuttosto raramente ed è originata dalla crisi del legame di aderenza tra fibre e matrice all'interno dell'FRP.

Visto che la resina manifesta una resistenza a taglio decisamente superiore rispetto a quella offerta dal calcestruzzo, questa modalità di crisi risulta secondaria e può manifestarsi soprattutto in concomitanza all'applicazione su calcestruzzi ad alta resistenza.

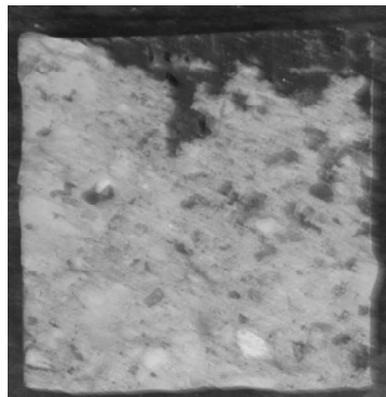


Figura 1.1.1 - Esempio di frattura mista. Lo sfruttamento della resistenza del substrato non è ottimale, a causa della parte in alto (più scura) in cui si è manifestata una pura crisi adesiva.

Volendo classificare i diversi modi di rottura per distacco dal supporto in un elemento in c.a. rinforzato a flessione con tessuti o lamine, possiamo distinguere quattro modalità principali:

- *Distacco di estremità*: avviene nelle zone terminali del rinforzo, dove ci sono elevate tensioni tangenziali di interfaccia.

In caso di utilizzo di lamine nel rinforzo di un elemento inflesso si possono instaurare anche significative tensioni di trazione in direzione normale all'interfaccia (tensioni di peeling) a causa della rigidezza flessionale del rinforzo. La concomitante presenza di tensioni tangenziali di interfaccia e tensioni normali favorisce un prematuro distacco di estremità del rinforzo.

- *Distacco indotto da fessure per flessione nell'elemento inflesso*: si manifesta perché le fessure che si originano nel calcestruzzo teso generano concentrazioni tensionali all'interfaccia con l'FRP, che possono portare a un distacco totale o parziale del rinforzo. Le fessure che si originano in una trave possono essere ortogonali rispetto all'asse dell'elemento (prevalenza di momento flettente) oppure inclinate (se agiscono contemporaneamente momento flettente e taglio).

- *Distacco causato da fessure da taglio nel calcestruzzo*: si tratta di un tipo di rottura che avviene su elementi scarsamente armati a taglio, a causa dell'apertura di fessure diagonali che originano un distacco del supporto per effetto delle tensioni di peeling (*figura 1.1.2*).

- *Distacco causato da irregolarità e rugosità della superficie del calcestruzzo*: le irregolarità superficiali possono provocare perdite di aderenza localizzate che possono propagarsi fino a provocare il distacco completo del rinforzo dal calcestruzzo.

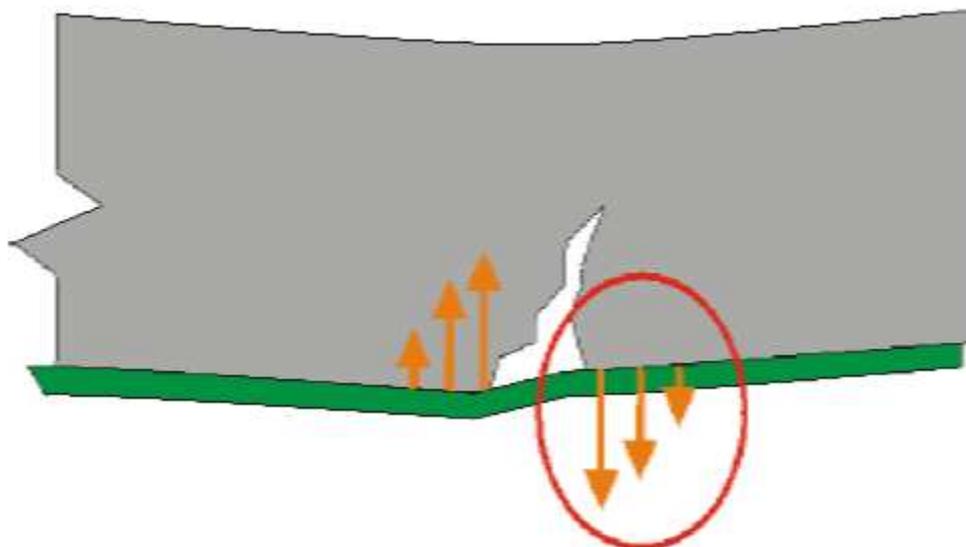


Figura 1.1.2 - Distacco originato da fessure diagonali da taglio

2 MODELLO A : MATTONE - FRP

In questo capitolo verrà illustrato tutto ciò che ha riguardato la prima parte della modellazione effettuata, ovvero l'analisi del semplice modello caratterizzato dal singolo mattone con incollato superiormente un FRP.

In una prima parte si è soffermati sulla creazione della geometria del modello, successivamente si è passati alla discretizzazione e quindi applicazione del vincolamento e dei carichi applicati ed infine si è effettuata l'analisi non lineare del modello ponendo particolare attenzione a risultati quali forza ricavate a seguito dello spostamento impresso, deformazioni della fibra e tensioni tangenziali lungo l'interfaccia mattone FRP.

L'ultimo aspetto affrontato per questo modello è stata la calibrazione della legge di interfaccia, quindi si è andati a settare i diversi parametri caratterizzanti la legge in modo tale da ottenere risultati aderenti con le prove sperimentali preventivamente effettuate.

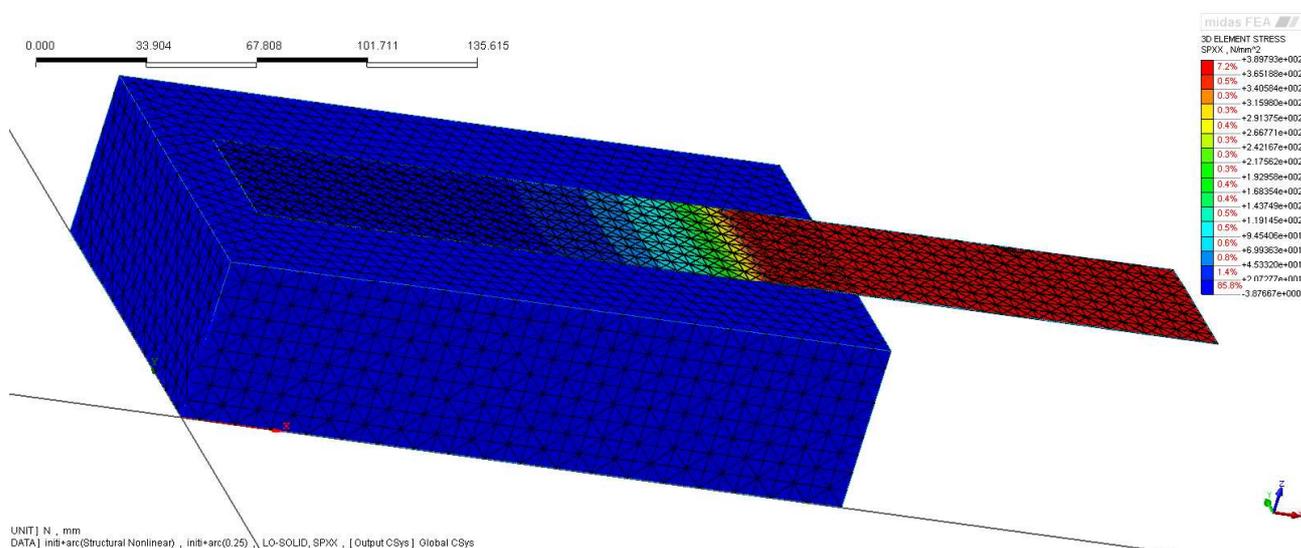


Figura 2.1 – Modello A : mattone - FRP.

2.1 *Proprietà dei materiali*

Il punto di partenza del nostro modello è stato quello di riprendere in riferimento le geometrie, le caratteristiche dei materiali ed i risultati delle prove effettuate presso il laboratorio Larm in via Terracini da Alessandro Bellini, per poterle effettuare un confronto tra il modello sperimentale e quello numerico.

Verrà mostrato di seguito un riassunto della prova e dei risultati ottenuti, in modo tale da rendere più chiaro il confronto che successivamente verrà svolto.

La prova a cui si fa riferimento in questa parte della tesi è la prova denominata B3A2a, condotta il 26/05/2011, in cui è stata utilizzata una strumentazione composta da 9 estensimetri (7 lungo il tratto incollato e 2 sul tratto libero per la misura del modulo elastico) e 3 LVDT, oltre ovviamente alla cella di carico.

Per quanto riguarda la nomenclatura dei provino è mostrato di seguito il significato :

- *prima lettera (maiuscola)*: serve a distinguere i mattoni dai muretti. Con la lettera B si indicano i mattoni (B = brick (mattoni)), mentre con la lettera M si indica il campione di muratura (M = masonry (muretto)).

- *primo numero*: il numero che segue immediatamente la prima lettera indica la tipologia di mattone utilizzata:
 - 1 = mattone RDB classico 010 con finitura a sabbia (formato UNI, pieno)
 - 2 = mattone UNI pieno IBL
 - 3 = mattone pieno liscio tipo bolognese
 - 4 = mattone pieno di recupero

- *seconda lettera (maiuscola)*: la seconda lettera del nome del campione indica il tipo di trattamento superficiale:
 - A = campione senza rasatura superficiale
 - B = provino sul quale è stata effettuata una rasatura con malta Tassullo T30V
 - C = rasatura effettuata con malta Mapei Mapefinish.

- *secondo numero*: indica il numero del provino
- *ultima lettera (minuscola)*: indica la faccia del provino sulla quale viene svolta la prova di aderenza. Per i mattoni si utilizzano le lettere a,b; per i muretti invece a,b,c,d.



Figura 2.1.1 – Setup di prova.

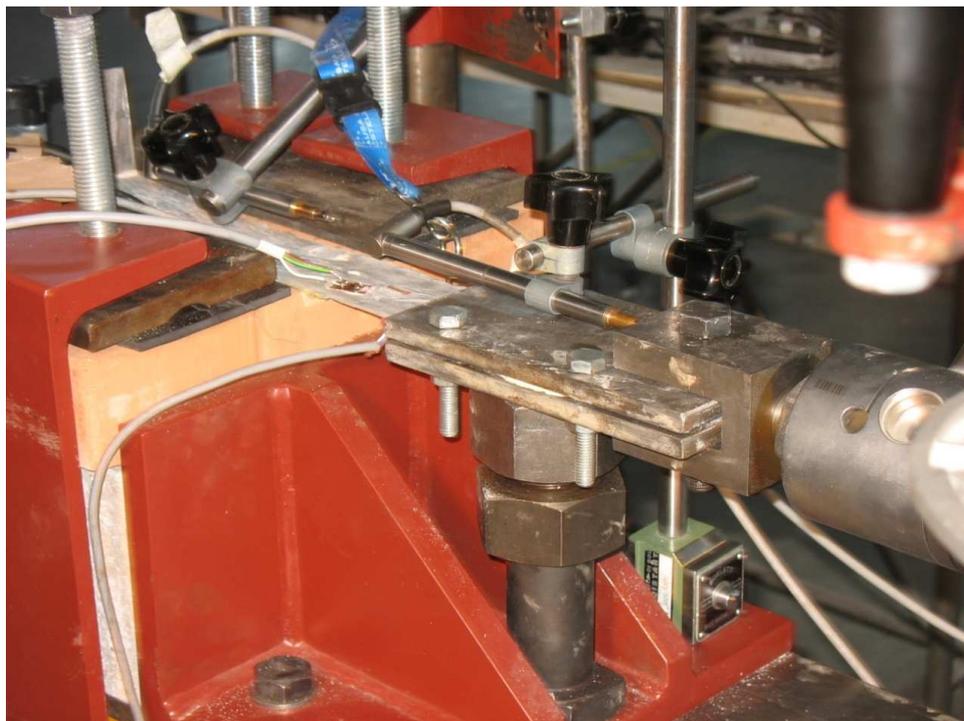


Figura 2.1.2 – Particolare piastra di afferraggio.

Le caratteristiche meccaniche del mattone sono state valutate facendo riferimento a prove effettuate sempre presso il Larm dallo stesso Alessandro Bellini, sono quindi riportati di seguito le tipologie di materiali utilizzati ed i risultati delle prove per valutare le loro proprietà :

- mattone pieno liscio tipo bolognese, riportato in *figura 2.1.3*, la cui denominazione sarà mattone tipo 3;
- il rinforzo è stato realizzato utilizzando un tessuto SikaWrap 430 G impregnato in situ grazie all'utilizzo di resina epossidica Sikadur 330.



Figura 2.1.3 - Mattone pieno liscio tipo bolognese (mattone tipo 3).

SikaWrap® 430 G/25 è un tessuto in fibra di vetro con andamento unidirezionale delle fibre. Il tessuto viene impregnato in opera utilizzando la resina epossidica Sikadur® 330, per formare un sistema di rinforzo strutturale in fibra di vetro (GFRP) particolarmente adatto per opere in calcestruzzo, muratura o legno, le cui caratteristiche sono:

- *resistenza a trazione delle fibre: 2300 N/mm² (misurato sul tessuto);*
- *modulo elastico a trazione: 76000 N/mm²;*
- *allungamento a rottura: 2.8 % (misurato sul tessuto);*
- *densità: 2.56 g/cc;*
- *peso: 445 g/mq ± 22 g/mq;*
- *direzione primaria della fibra: 0° (unidirezionale);*
- *spessore: 0.172 mm (basato sull'area totale delle fibre).*

La resina Sikadur 330 che è stata utilizzata è una resina epossidica bicomponente le cui caratteristiche (fornite dal produttore) sono indicate in seguito:

- *aspetto*: - componente A (bianco) - componente B (grigio);
- *peso specifico*: 1.31 kg/l;
- *rapporto stechiometrico*: 4:1 in peso;
- *pot life*: 30 minuti (a +23°C);
- *temperature di applicazione*: da +5 a +30 °C;
- *adesione su calcestruzzo*: 3 N/mm² (rottura calcestruzzo);
- *resistenza a trazione diretta*: 30 N/mm².

Sul singolo mattone sono state eseguite prove di caratterizzazione del materiale a flessione e compressione, allo scopo di determinare le resistenze a compressione e a trazione dei materiali utilizzati.

<i>Campione</i>	<i>Carico massimo (t)</i>	<i>Resistenza a compressione (MPa)</i>	<i>Fattore di forma (UNI EN 772-1)</i>	<i>Resistenza a compr. normalizzata (MPa)</i>	<i>Media (MPa)</i>
B3PC1	57.850	42.993	0.76	32.675	32.901
B3PC2	58.650	43.588	0.76	33.127	

Tabella 2.1.1 – Prove di resistenza a compressione.

Oltre alle prove di compressione appena descritte, su tutte le tipologie di mattone sono state condotte anche prove di flessione a 3 punti per determinare la resistenza a trazione del materiale.

<i>Campione</i>	<i>Carico max (kg)</i>	<i>Resistenza a trazione (MPa)</i>	<i>Media (MPa)</i>
F3a	-	-	7.144
F3b	338	7.144	

Tabella 2.1.2 – Prove di resistenza a trazione.

Durante lo svolgimento delle prove di aderenza condotte sui singoli mattoni o sui campioni di muratura rinforzati con GFRP, è stato necessario misurare la forza applicata al rinforzo, le deformazioni e gli spostamenti.

Per la misura della forza applicata mediante il sistema di tiro si è fatto uso di una cella di carico, mentre la misura di deformazioni e spostamenti ha richiesto rispettivamente l'utilizzo di estensimetri applicati al rinforzo e di trasduttori di spostamento (LVDT).

Le letture della cella di carico, degli LVDT e degli estensimetri sono state registrate facendo uso di un particolare sistema di acquisizione.

2.2 Modellazione della geometria

La creazione di un appropriato modello geometrico risulta essere il primo ed il principale step per la realizzazione di un modello di calcolo agli elementi finiti in Midas Fea, in quanto quando successivamente si andrà a realizzare la mesh per i singoli elementi geometrici, questa si appoggia proprio sulla geometria degli stessi, quindi un errore dal punto di vista geometrico si ripercuoterebbe sulla mesh e quindi successivamente sui risultati del nostro modello.

Un modello geometrico è fondamentalmente costituito dal collegamento delle varie entità geometriche. Le entità geometriche in Midas Fea sono riportate nella seguente tabella:

Entity		Definition	
Compound		Group of independent entities	
Shape		General term to call an independent entity (An entity that is not forming any other entity)	
Higher Level Entity	Solid	Part of 3-D space bound by a shell	
		Property	Volume
Surface	Shell	A collection of Faces connected by some of the Edges of their Wire boundaries	
	Face	Part of a plane (in 2-D geometry) or a surface (in 3-D geometry) bounded by a closed Wire e.g. Plane surface, cylinder, sphere, etc.	
		Property	Area
Curve	Wire	A sequence of Edges connected by their Vertices	
	Edge	A shape corresponding to a curve bound by a Vertex at each extremity e.g. Straight line, circle, ellipse, arc, etc.	
		Property	Length
Lower Level Entity	Vertex	A zero-dimensional shape corresponding to a point in geometry	
		Property	Coordinate

Tabella 2.2.1 – Entità geometriche Midas Fea.

Poiché il modello numerico che si è creato era un modello tridimensionale si sono ovviamente utilizzati degli elementi *Solid*.

Il primo passo è stato quello di riprendere le geometrie del modello sperimentale e implementarle nel modello numerico.

Vengono quindi riportate di sotto delle semplici figure che rappresentano a pieno, dal punto di vista geometrico, il modello che sarà sviluppato in questo capitolo.

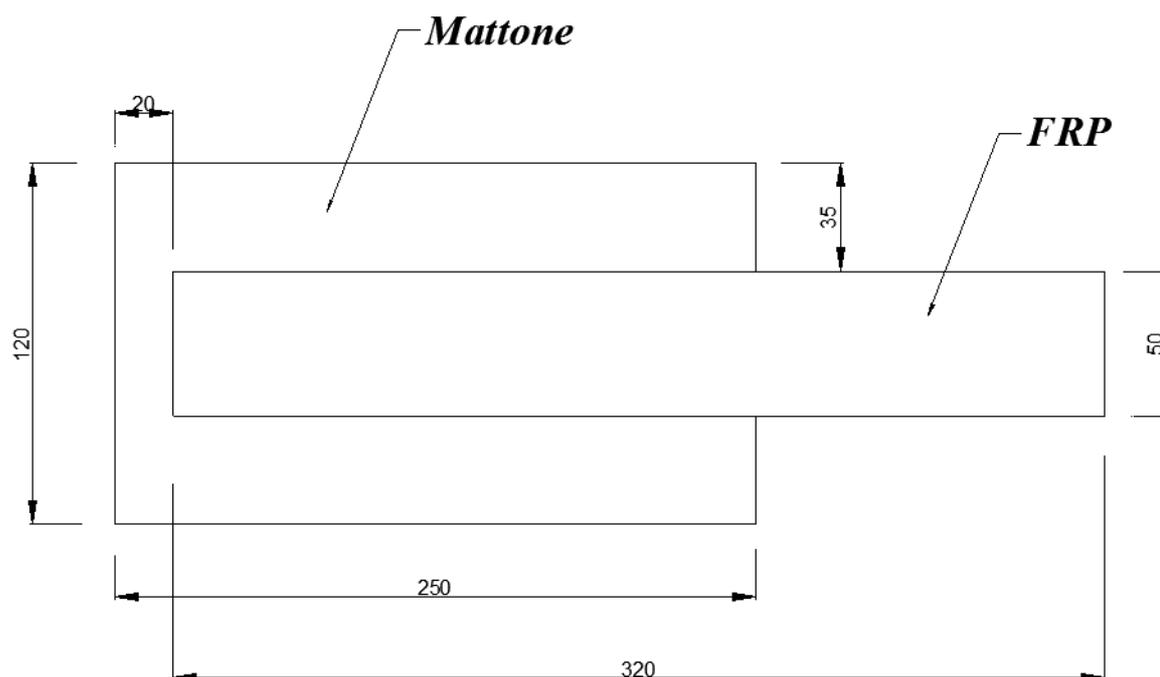


Figura 2.2.1 – Modello A : pianta della geometria.

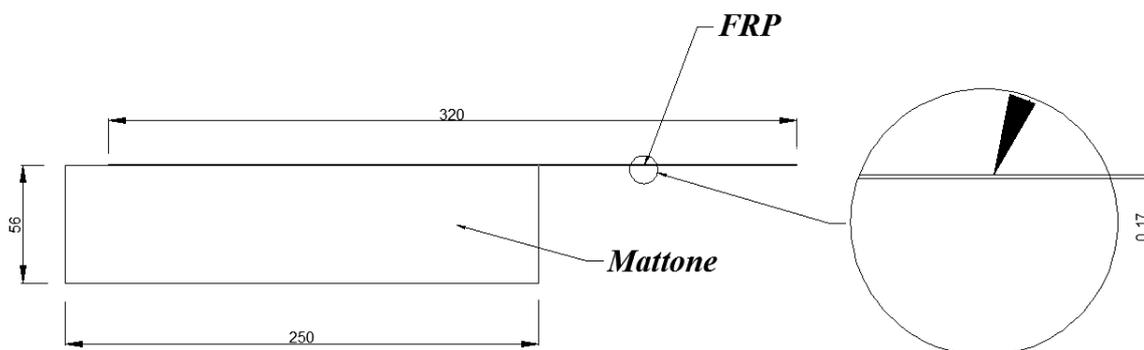


Figura 2.2.2 – Modello A : sezione con particolare dello spessore della lamina.

Si vuol porre particolare attenzione al fatto che rispetto al modello sperimentale si sono apportate leggere modifiche di cui solo una degna di essere spiegata con più chiarezza

ovvero la lunghezza della lamina, in quanto come mostrato in *figura 2.2.1* e *2.2.2*, la lamina risulta avere lunghezza totale di *320mm* invece di *450mm* come è nel modello sperimentale, in quanto come mostra la *figura 2.2.4*, nel passaggio dal modello sperimentale a quello numerico bisogna detrarre una certa lunghezza di rinforzo (zona B *figura 2.2.3*), caratterizzata dalla piastra di afferraggio, in quanto nel programma di calcolo le forze sono applicate puntualmente e quindi non c'è bisogno di considerare tutta quella lunghezza, di conseguenza la lunghezza utilizzata nel modello risulta essere soltanto quella caratterizzata dal tratto A (*figura 2.2.4*).

	<i>N. strisce</i>	<i>L₁</i> <i>(mm)</i>	<i>L₂</i> <i>(mm)</i>	<i>L₃</i> <i>(mm)</i>	<i>L totale</i> <i>(mm)</i>	<i>Larghezza</i> <i>(mm)</i>
<i>Striscia per mattone</i>	12	200	30	220	450	50
<i>Striscia per muretti</i>	16	200	100	150	450	50
Totale	28					

Tabella 2.2.2 – Lunghezze relative dell'incollaggio.

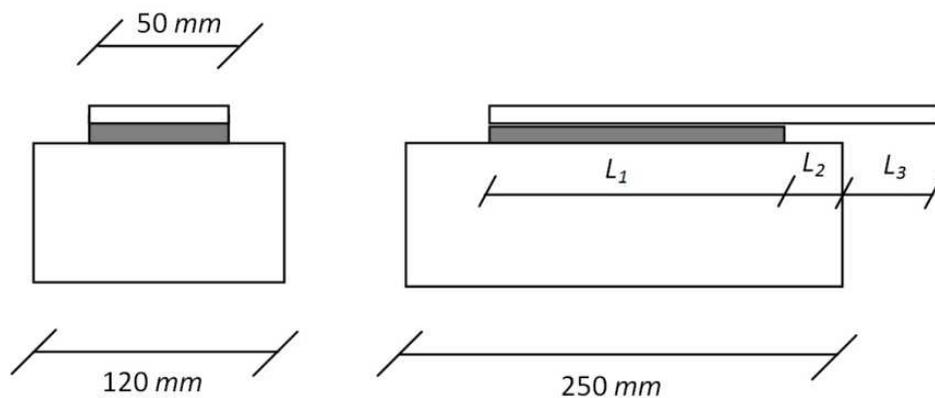


Figura 2.2.3 – Lunghezze relative della lamina.

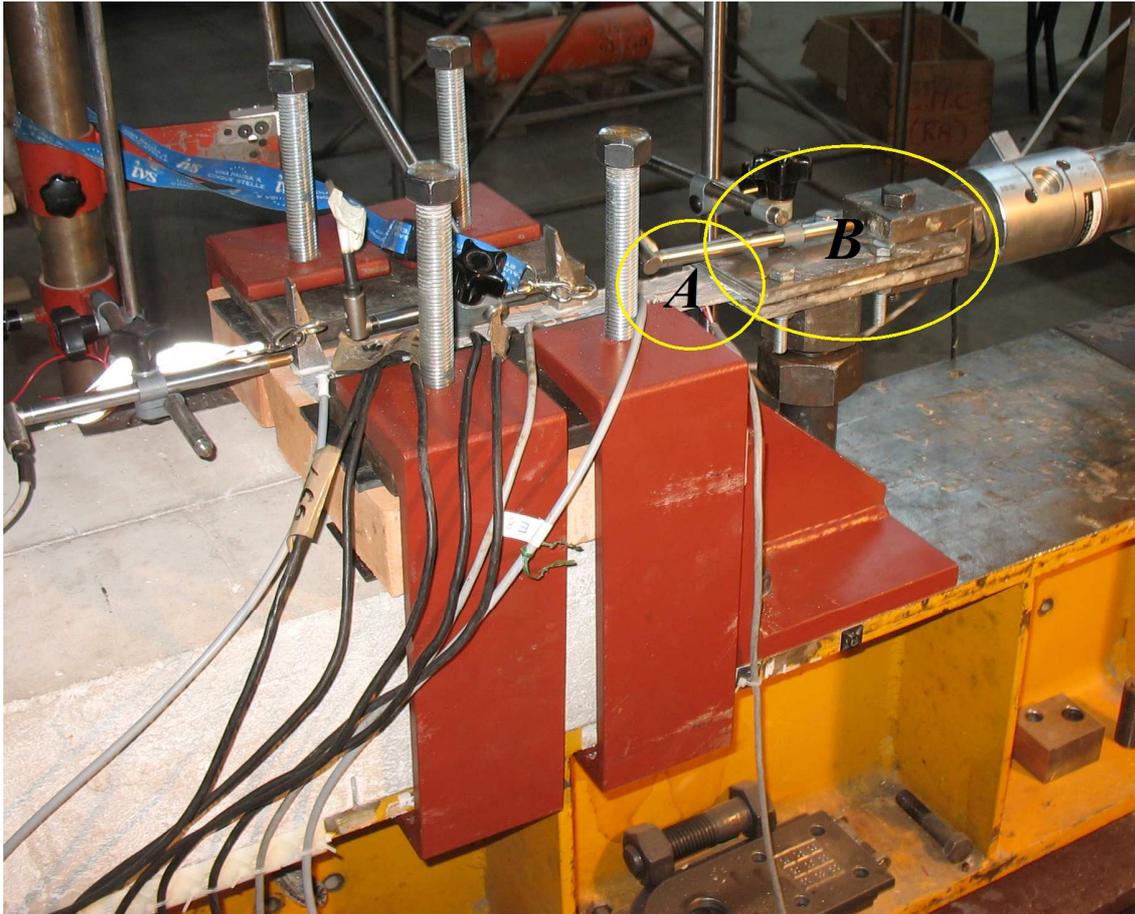


Figura 2.2.4 – Modello A : sperimentale.

Nel programma Midas Fea quello che è stato fatto è innanzitutto inserire l'unità di misura a cui fare riferimento, successivamente sono stati inseriti i due diversi elementi geometrici caratterizzanti il mio problema.

Sono stati realizzati gli elementi *Solid* mediante il comando *Geometry > Primitive Feature > Box* (tasto rapido ), il quale permette di realizzare elementi geometrici parallelepipedo, come mostrato nella figura sottostante inserendo le diverse lunghezze ed in particolare il vertice di base, ovvero il punto corrispondente allo $0,0,0$ (x,y,z) relativo del mio elemento geometrico.

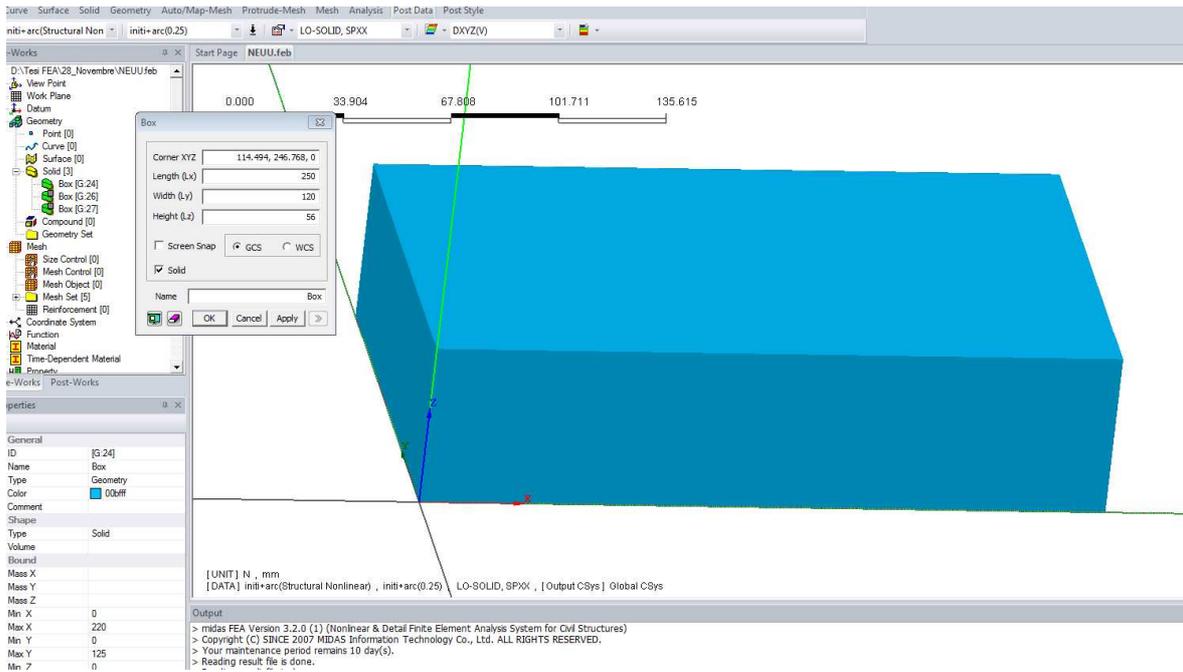


Figura 2.2.5 – Modello A : Box1.

Come detto sopra quindi si inserisce per prima cosa il *Corner XYZ*, ovvero il vertice del parallelepipedo, e poi le lunghezze in x,y e z rispettivamente negli spazi *Length (Lx)*, *Length (Ly)* e *Length(Lz)*.

Per mostrate meglio l' inserimento del valore *Corner X,Y,Z* , si fa riferimento alla figura sottostante, in cui si è mostrato come è stato possibile disegnare l' elemento FRP, poggiato sul mattone.

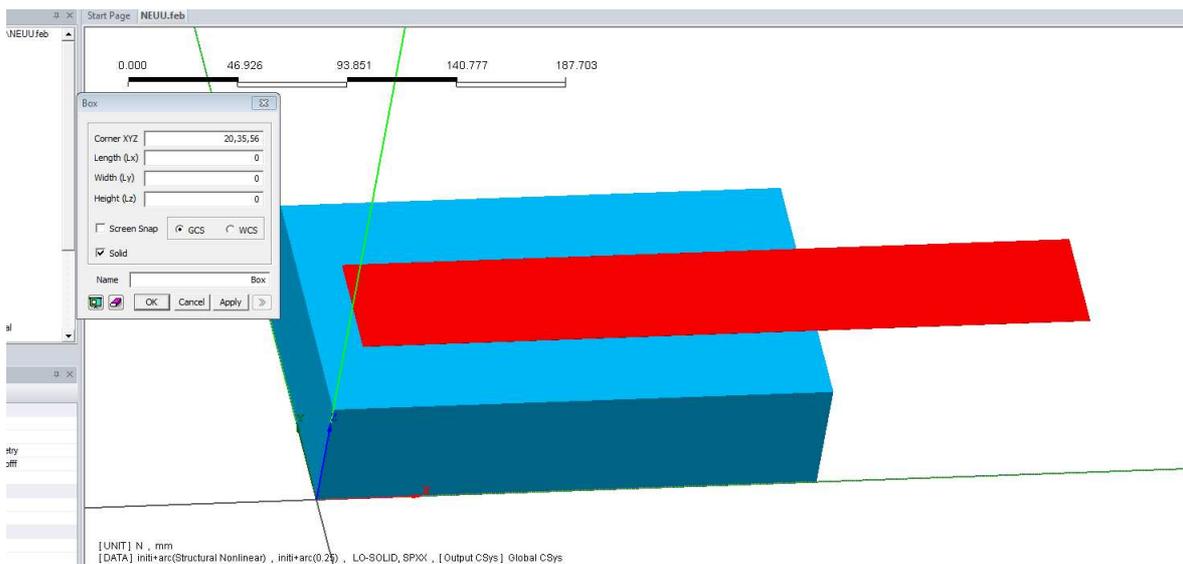


Figura 2.2.6 – Modello A : Box1 e Box2.

Si può quindi notare come il *Corner X,Y,Z*, per l' elemento FRP si trovi alle coordinate 20,35,56.

Bisogna sottolineare un' aspetto di fondamentale importanza per quanto riguarda la geometria del modello numerico, ovvero il fatto che è stato necessario suddividere in due parallelepipedi distinti l' FRP, come mostrato in *figura 2.2.7*, in quanto risultava necessario per poter individuare al meglio l' interfaccia tra mattone e FRP, cmq sia quest' aspetto verrà ripreso successivamente nel *paragrafo 2.5*, viene mostrata quindi un' ulteriore figura che mostra la suddivisione dell' FRP:

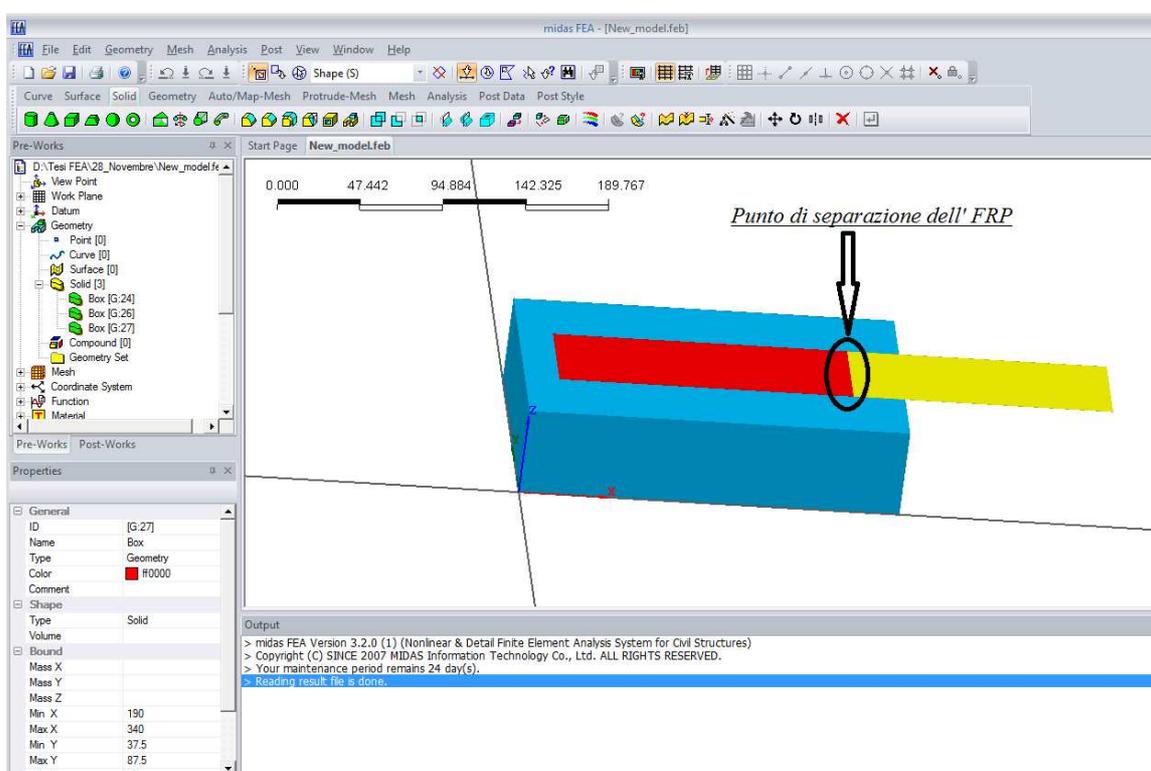


Figura 2.2.7 – Modello A : particolare separazione FRP.

Ulteriore aspetto di fondamentale importanza dal punto di vista geometrico è stato quello di creare sostanzialmente nodi in comune tra elementi 3D combacianti, in poche parole in corrispondenza dell' incollaggio si ha la possibilità di creare nodi distinti tra mattone e FRP, oppure nodi congiunti, quindi lungo quella porzione, si avranno nodi in comune, ciò comporta due cose, la prima è che questa accortezza permetterà successivamente di creare un' interfaccia tra i due elementi (*Paragrafo 2.5*), impossibile da fare altrimenti, la seconda è che in questo modo è possibile avere continuità materiale tra gli elementi selezionati.

Di conseguenza è stata effettuata questa procedura tra il mattone e la porzione A dell'FRP come mostrato in *figura 2.2.8*, per poter creare l' interfaccia, tra la porzione A e la porzione B per poter avere la continuità materiale, e niente invece è stato fatto tra il mattone e la porzione B dell' FRP, perché per ipotesi si presuppone quella porzione scollegata dal mattone.

Va sottolineato come questa opzione sia possibile inserirla grazie al tasto *Geometry > Boolean Operation > Cut*, in cui bisogna selezionare il *Boolean Master* e il *Boolean Tool(s)*, ovvero l'elemento master da tagliare e la rispettiva forma del taglio.

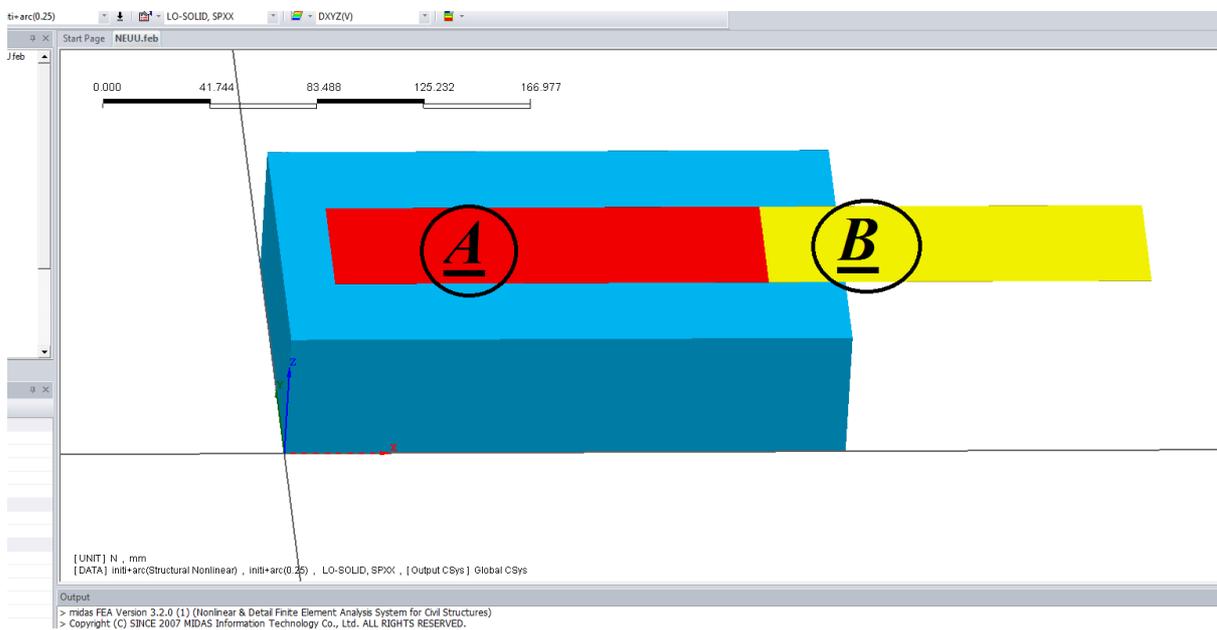


Figura 2.2.8 – Boolean operation : cut.

2.3 Modellazione delle proprietà meccaniche

In questa sezione si mostrerà come sono state inserite e modellate le proprietà dei diversi materiali utilizzati, ovvero in questo modello semplice, il mattone e l'FRP.

Innanzitutto bisogna dire che per poter inserire un materiale nel programma Midas Fea per poterlo utilizzare nella discretizzazione degli elementi è necessario prima creare il materiale ovvero specificare se tutte le sue proprietà, e successivamente associare a queste proprietà un elemento 1D, 2D, oppure 3D, è inoltre possibile creare un'elemento interfaccia.

Le proprietà del materiale possono essere definite attraverso il comando *Analysis > Material > Create > Isotropic*, in cui si apre una schermata riportata in *figura 2.3.1*.

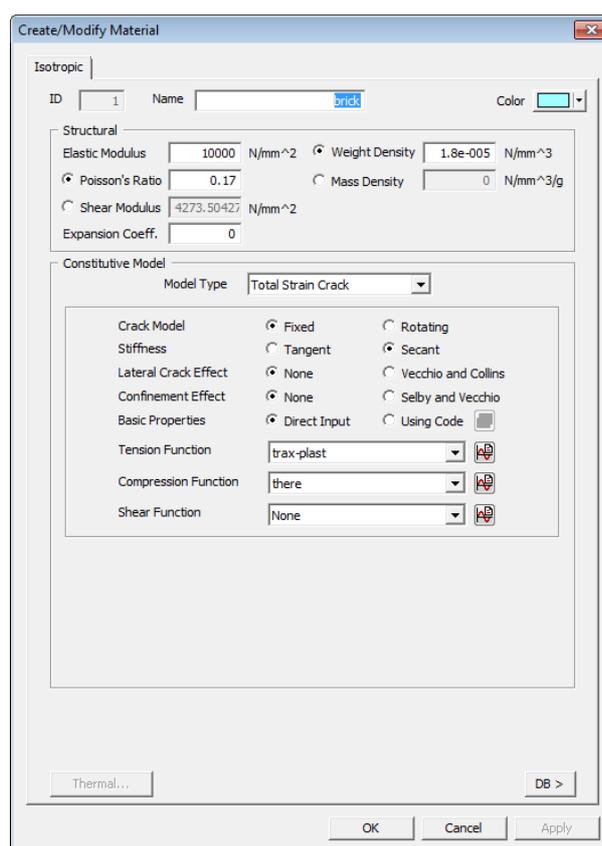


Figura 2.3.1 – Create Material.

Con questo comando per prima cosa bisogna decidere se si vuole creare un materiale isotropo, ortotropo oppure si vuole creare un elemento di interfaccia, e poi a seconda

della scelta si aprono delle schermate differenti, in particolare nella figura riportata in alto si è fatto riferimento alla schermata dei materiali isotropi in quanto sia per il mattone che per la lamina si è adottata questa modellazione.

Sotto la voce *Constitutive Model*, è stato per l'appunto inserito il modello costitutivo del materiale, nel nostro caso si è fatto riferimento ad un modello del tipo *Total Strain Crack*.

Per l'implementazione di tale modello è necessario definire i seguenti parametri:

- *tipologia modello di danno*: è possibile scegliere tra *rotative crack model* e *fixed crack model*.

La differenza tra queste due opzioni è che mentre il *rotative crack model* gli assi della crepa cambiano continuamente secondo gli assi delle deformazioni principali, nel modello *fixed crack model*, gli assi della crepa rimangono fissi una volta fissati.

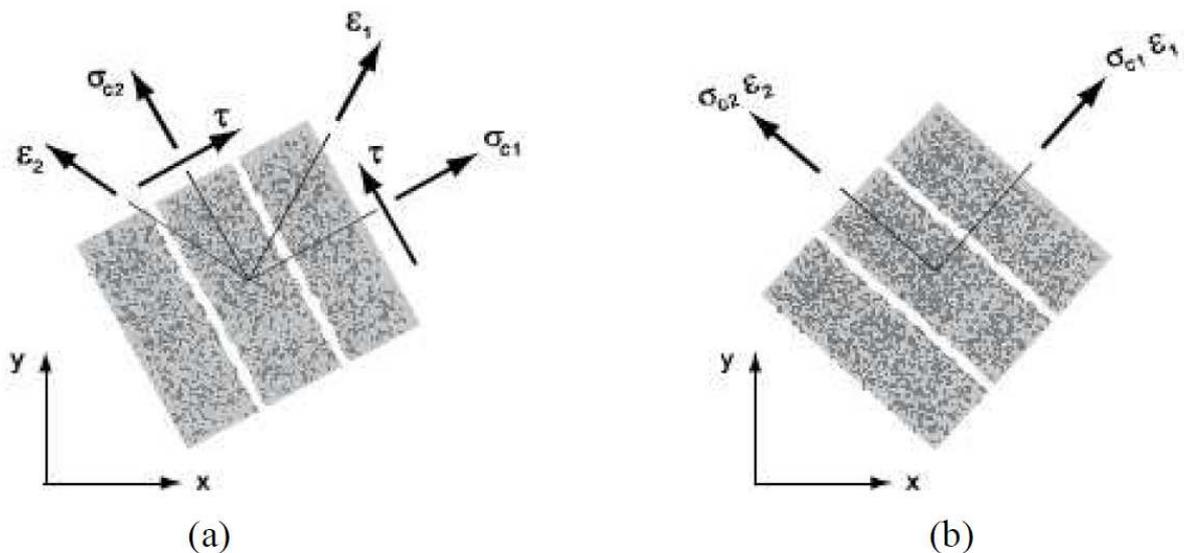


Figura 2.3.2 – a) *Fixed Crack Model* ; b) *Rotative Crack Model*.

- *proprietà generiche dell'elemento*: è necessario definire alcune proprietà caratteristiche del materiale quali modulo elastico E , coefficiente di Poisson ν (o alternativamente modulo tangenziale G), peso specifico, coefficiente di espansione;
- *confinamento*: tale aspetto può essere implementato secondo la proposta di Selby e Vecchio (1993);

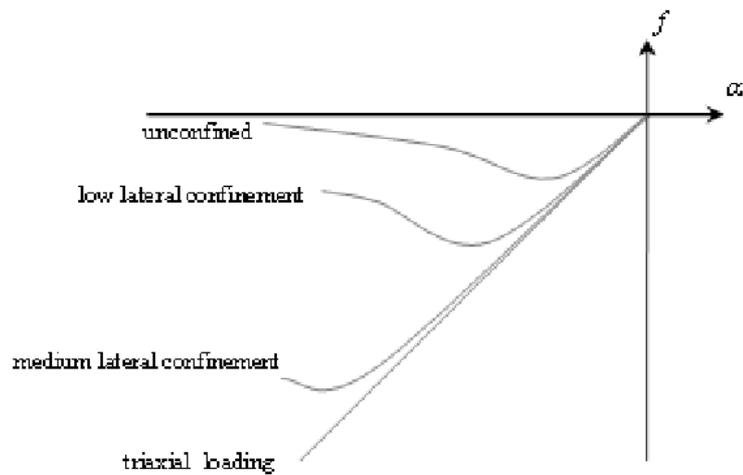


Figura 2.3.3 – Confinement Effect.

Secondo Selby e Vecchio infatti questo aspetto indica l'aumento di resistenza alla compressione dovuto al confinamento laterale del materiale.

Tale approccio è basato sul concetto di pre-deformazione in cui l'espansione laterale dovuta all'effetto Poisson viene modellata attraverso l'imposizione di un carico addizionale sulla struttura.

Il singolo elemento è così caratterizzato da un coefficiente di Poisson nullo e non presenta alcuna espansione laterale. Essa infatti viene modellata applicando delle forze nodali fittizie che generano una pre-deformazione pari a quella che si avrebbe adottando una modellazione con coefficiente di Poisson non nullo.

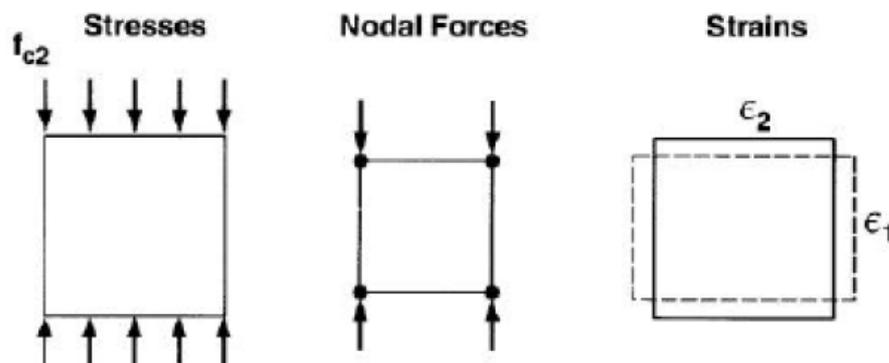


Figura 2.3.4 – Modellazione tradizionale Effetto Poisson.

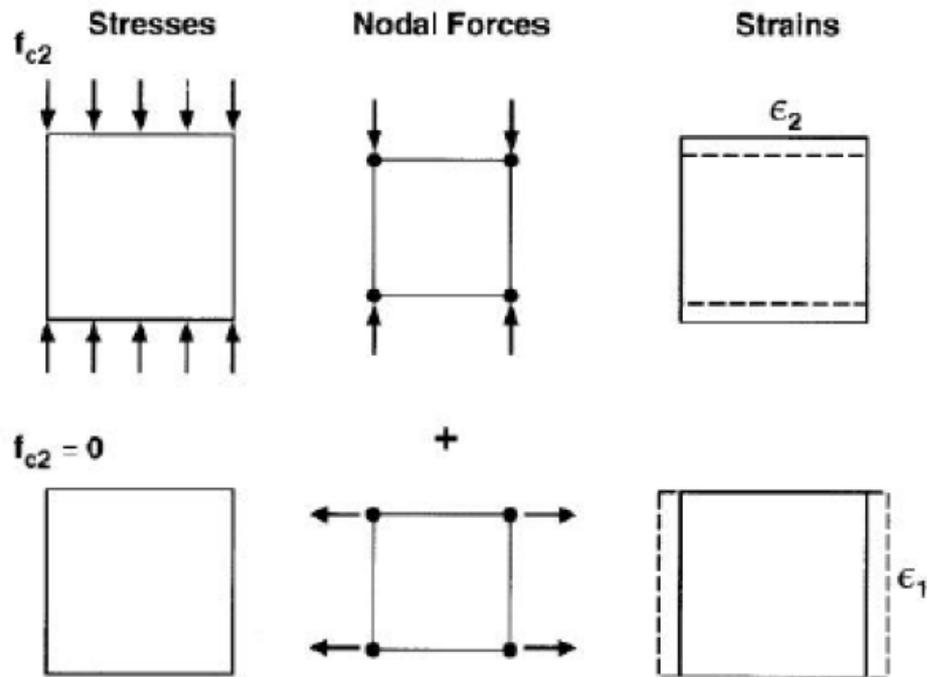


Figura 2.3.5 – Modellazione Effetto Poisson proposta da Selby e Vecchio.

Utilizzando tale procedura si ha però un notevole vantaggio computazionale in quanto la matrice di rigidezza non presenta i termini fuori diagonale relativi all'effetto Poisson.

- *effetto della fessurazione laterale*: è possibile tenere conto di tale aspetto utilizzando le leggi proposte da Vecchio e Collins (1993).
- *comportamento a trazione*: E' necessario implementare un apposito legame costitutivo a trazione dell'elemento.
- *comportamento a compressione*: per modellare il comportamento a compressione si è utilizzato il legame costitutivo proposto da Thorenfeldt et al. (1987).

Passando alla definizione delle vere e proprie proprietà dei materiali, sono stati inseriti in ordine:

- *Modulo elastico* = 10000 MPa;
- *Coefficiente di Poisson* = 0.17;
- *Weight density* = 1.8 e-005.

Sono stati inseriti i diversi comportamenti a trazione e a compressione del materiale.

Per quanto riguarda il comportamento a trazione del mattone si è adottato un comportamento elasto-softening, quindi un primo ramo elastico seguito da un ramo di decrescita della tensione dopo il picco (figura 2.3.2).

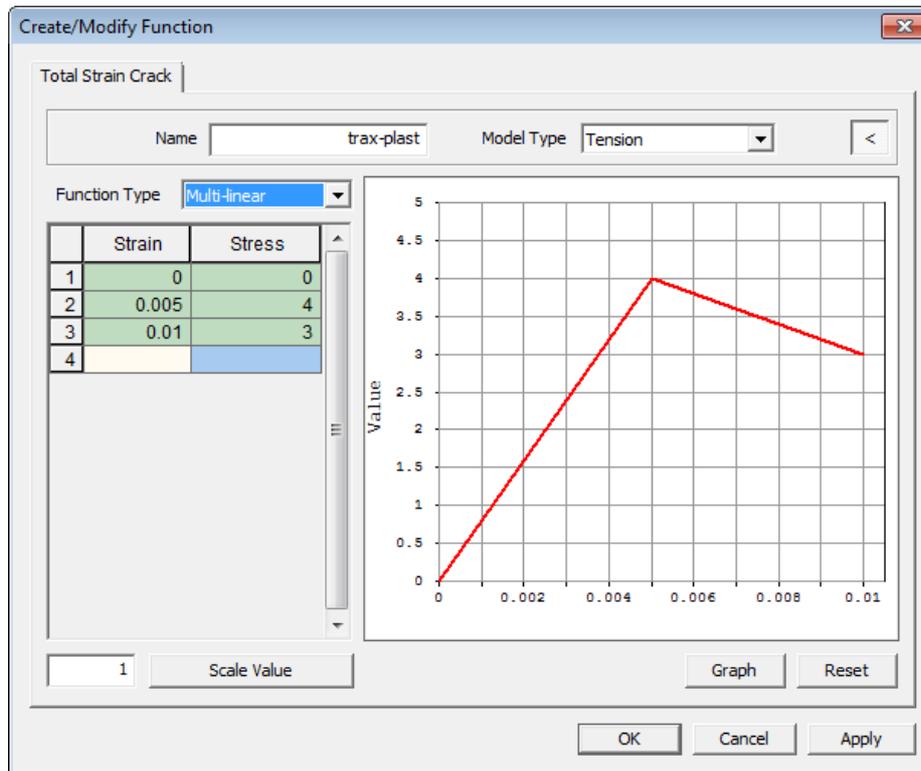


Figura 2.3.6 – Legame a trazione del mattone.

Di seguito vengono riportate le diverse opzioni tra le quali è stato possibile scegliere per il modello costitutivo del materiale:

- *Elastic;*
- *Linear;*
- *Multilinear;*
- *Exponential;*
- *Hordijk;*
- *Constant;*
- *Brittle.*

Ovviamente ciascuno di essi è caratterizzato da alcuni parametri fondamentali, i quali devono essere inseriti nelle opportune sezioni.

Nel nostro caso è stata inserita l' opzione *Multilinear*, in quanto con questa opzione è possibile creare un qualsiasi legame costitutivo inserendolo per punti.

Per quanto riguarda invece il comportamento in compressione del mattone è stato inserito un comportamento a parabola, caratterizzato da una tensione di picco a compressione pari a *40 MPa* (figura 2.3.7).

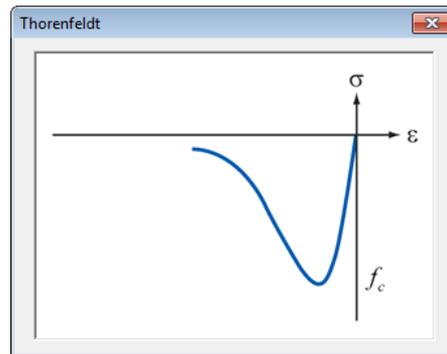


Figura 2.3.7 – Legame a compressione del mattone.

Lo stesso percorso è stato eseguito per la determinazione delle proprietà della lamina, in particolare viene riportata di seguito la tabella riassuntiva:

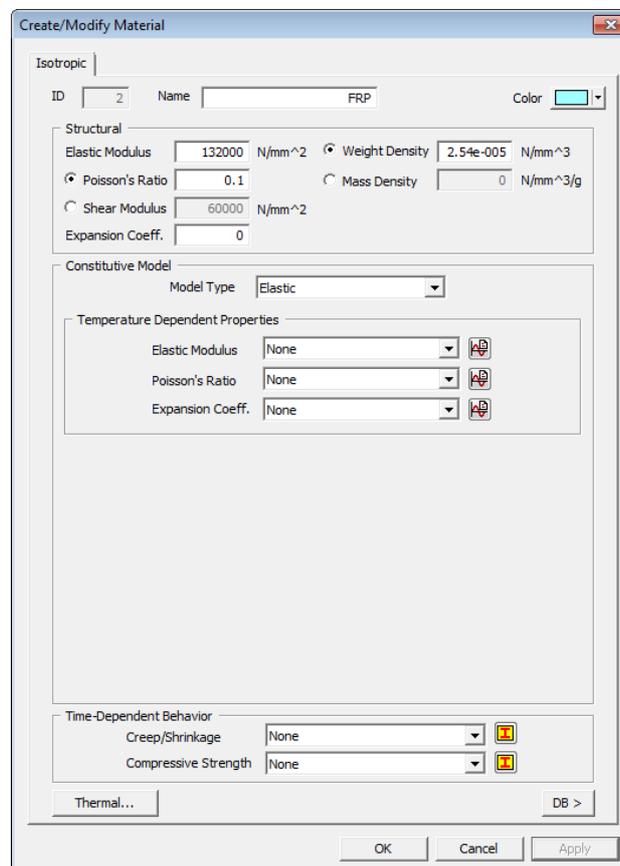
The image shows a software dialog box titled "Create/Modify Material". It is set to "Isotropic" and has "ID" 2 and "Name" FRP. The "Structural" section includes: Elastic Modulus (132000 N/mm²), Poisson's Ratio (0.1), Shear Modulus (60000 N/mm²), Expansion Coeff. (0), Weight Density (2.54e-005 N/mm³), and Mass Density (0 N/mm³/g). The "Constitutive Model" section has "Model Type" set to "Elastic". The "Temperature Dependent Properties" section has "Elastic Modulus", "Poisson's Ratio", and "Expansion Coeff." all set to "None". The "Time-Dependent Behavior" section has "Creep/Shrinkage" and "Compressive Strength" both set to "None". There are "Thermal...", "OK", "Cancel", "Apply", and "DB >" buttons at the bottom.

Figura 2.3.8 – Proprietà della lamina.

Come si può ben vedere dalla figura, si è considerato l'FRP , con un comportamento puramente elastico, con un modulo elastico pari a $132000MPa$.

Attraverso quindi il comando *Analysis > Property > Create > 3D*, è possibile aprire il menù riportato in *figura 2.3.9*, in cui è possibile creare le diverse proprietà, associando ad ogni proprietà creata il materiale ad essa corrispondente, nel nostro caso come detto in precedenza sono state create le proprietà 3D per il mattone e 3D per la lamina, in più è stata creata una proprietà interfaccia.

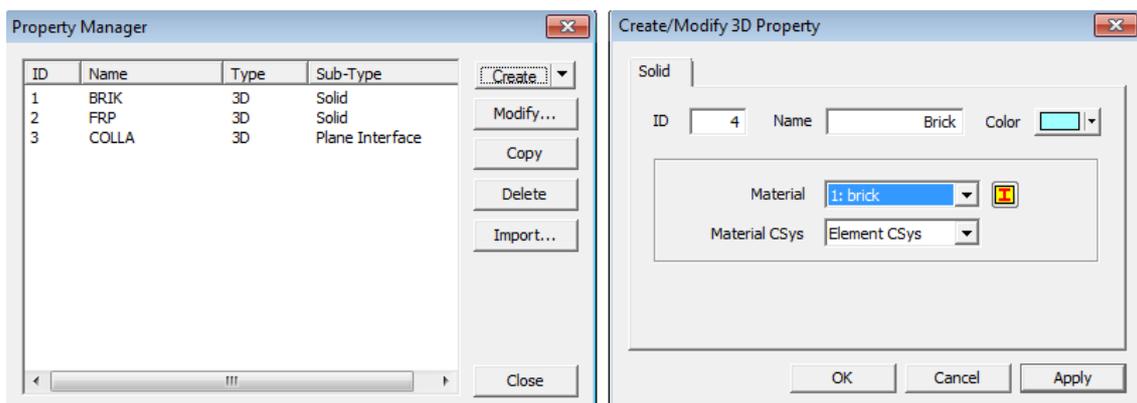
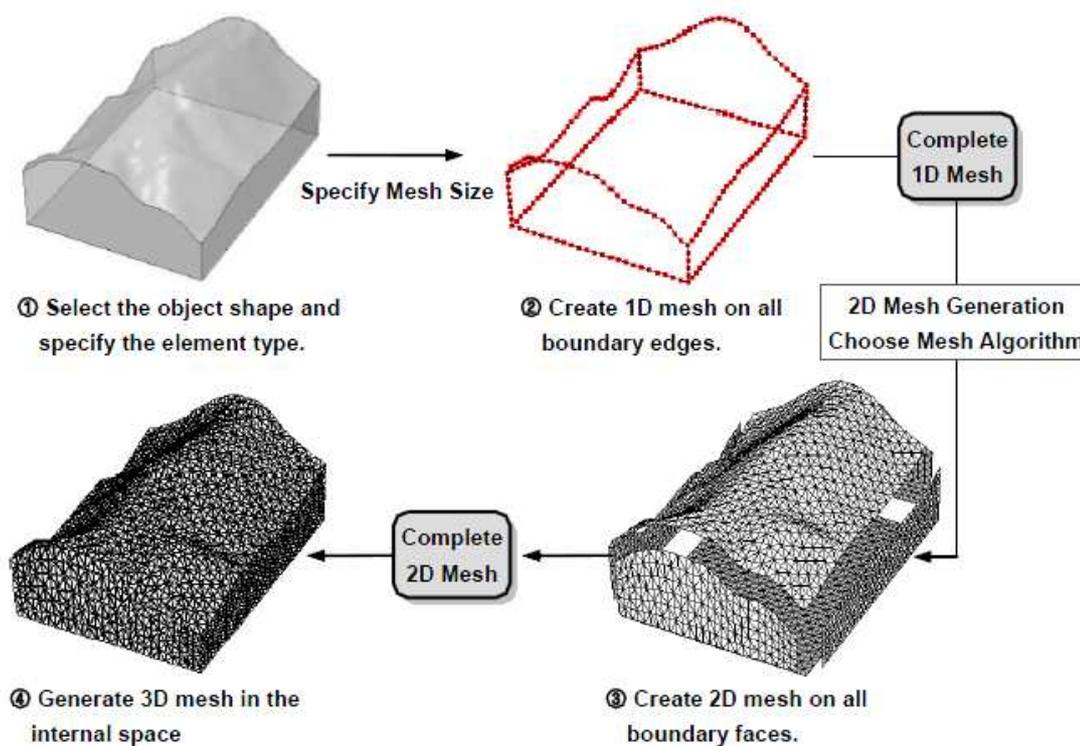


Figura 2.3.9 – Create Property.

2.4 Discretizzazione del modello geometrico

Una volta definita la geometria di base del modello numerico, il passo successivo è stato quello di discretizzare il modello geometrico creato nel capitolo precedente, per poter andare ad effettuare l'analisi non lineare.

Il codice numerico Midas FEA segue il generico processo di discretizzazione proposto in *Figura 2.4.1*. Una volta definita la dimensione caratteristica della discretizzazione (*Mesh Size*), è generata dal programma una mesh unidimensionale lungo gli elementi *Edge* (*Tabella 2.2.1*) di bordo del modello geometrico. A questo punto, il programma genera una discretizzazione bidimensionale degli elementi *Face*, sulla base della mesh 1D già costruita sugli elementi di bordo. L'algoritmo di discretizzazione 2D può essere definito automaticamente dal codice numerico o opportunamente scelto dall'utente. Infine viene realizzata la mesh 3D nello spazio interno del modello geometrico, che è delimitato dalla discretizzazione 2D precedentemente creata.



General Process of Mesh Generation

Figura 2.4.1 – Metodologia generale di discretizzazione.

Esistono due tipologie di discretizzazione a seconda della *valenza*:

- *Structured Mesh*

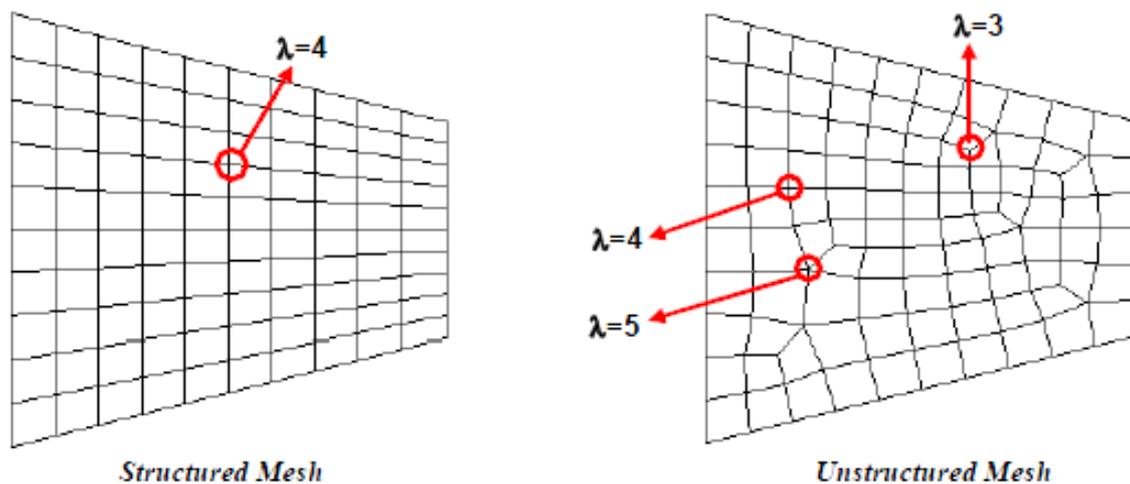
- *Unstructured Mesh*

La *valenza*, è un parametro che definisce la regolarità della discretizzazione e per questo è definita anche con il nome di *grado di regolarità*; in particolare la *valenza* è definita dal numero di elementi che condividono un singolo punto interno della discretizzazione.

Nel caso di *Structured Mesh*, la valenza dei nodi interni è costante; tale tipologia di mesh è realizzabile attraverso il comando *Mesh > Map Mesh > Solid* (tasto rapido ).

Nel caso di *Unstructured Mesh* i nodi interni presentano diversi valori di *valenza*; tale tipologia di mesh è realizzabile attraverso il comando *Mesh > Auto Mesh > Solid* (tasto rapido ). L'utilizzo di *Structured Mesh*, genera una discretizzazione più efficiente del modello geometrico, ma il processo di realizzazione è limitato dalle condizioni di regolarità che il modello geometrico deve possedere.

Viene riportata di seguito una figura che mostra con più chiarezza la differenza tra le due mesh, Structured e Unstructured:



Sono stati utilizzati elementi *brick*, ed in particolare elementi tetraedrici del primo ordine, caratterizzati cioè da 4 nodi. L'utilizzo di elementi del secondo ordine comporta un vantaggio in termini di qualità della discretizzazione ma anche un aumento dell'onere computazionale a causa del maggior numero di gradi di libertà dell'intero sistema. Poiché il modello presenta un'elevata complessità geometrica, si è quindi preferito adottare elementi tetraedrici del primo ordine per limitare i tempi di analisi.

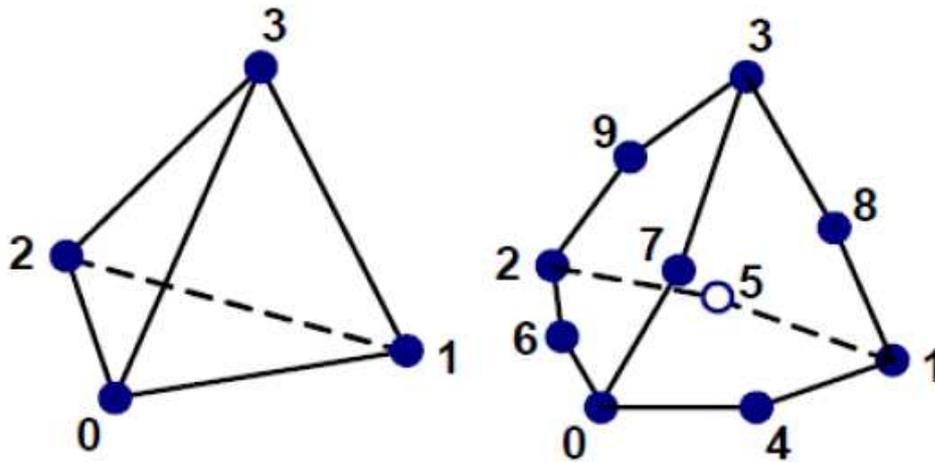


Figura 2.4.2 – Elementi tetraedrici del primo ordine e del secondo ordine.

Nella definizione della discretizzazione della struttura subentrano diversi sistemi di coordinata:

- *Global Coordinate System* (GCS): è il sistema globale di riferimento ed è definito dagli assi X-Y-Z
- *Element Coordinate System* (ECS): è il sistema di riferimento del singolo elemento ed è definito dagli assi x-y-z.
- Altri sistemi di riferimento sono il “*Nodal Coordinate System*” (NCS), l’ “*Output Coordinate System*” (OCS), il “*Material Coordinate System*” (MCS).

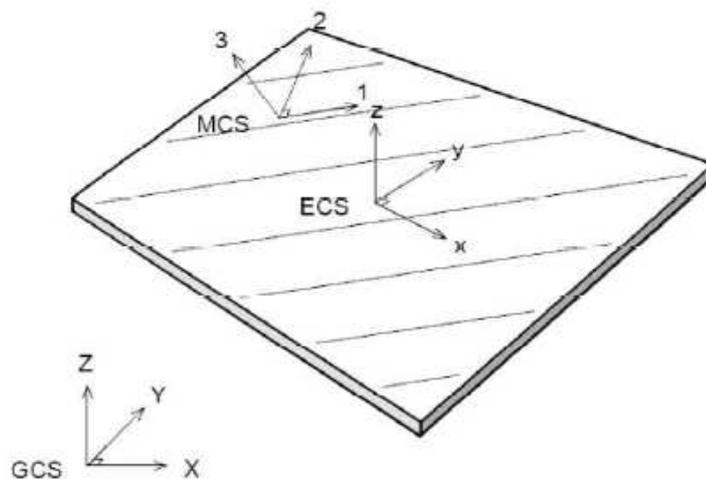


Figura 2.4.3 – Sistemi di riferimento.

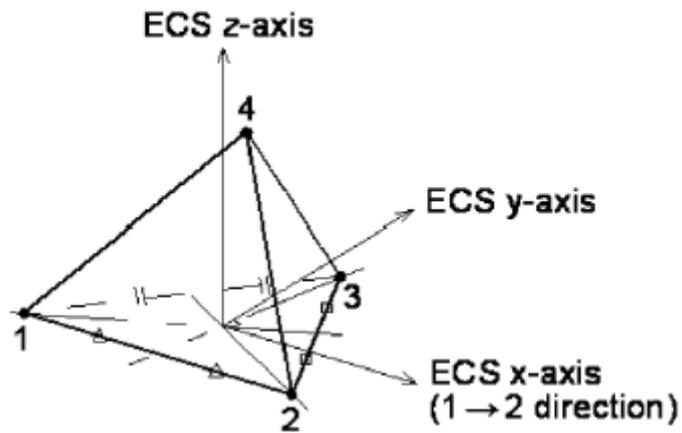


Figura 2.4.4 – Element Coordinate System per elementi tetraedrici.

L'elemento solido presenta i seguenti vettori di tensione e deformazione:

$$\begin{aligned} \sigma &= \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yy} & \sigma_{zz} & \tau_{xy} & \tau_{yz} & \tau_{zx} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{yy} & S_{zz} & S_{xy} & S_{yz} & S_{zx} \end{bmatrix} \\ \varepsilon &= \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{zz} & \gamma_{xy} & \gamma_{yz} & \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} E_{xx} & E_{yy} & E_{zz} & E_{xy} & E_{yz} & E_{zx} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

dove con S_{ij} ed E_{ij} è indicata la simbologia utilizzata all'interno del codice numerico.

In *Figura 2.4.5* è rappresentata la convenzione adottata sui segni di tensione e deformazione.

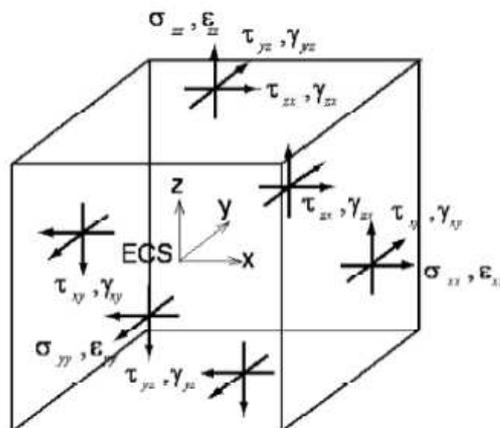


Figura 2.4.5 – Convenzione sui segni di tensione e deformazione.

Nella modellazione agli elementi finiti, per caratterizzare gli elementi geometrici, si introduce il concetto di elemento di riferimento, di forma geometrica semplice, definito in uno spazio naturale e adimensionale. La formulazione si basa sul fatto di creare una corrispondenza biunivoca tra un elemento di forma qualsiasi nel sistema cartesiano (x,y,z) e un elemento di forma semplice nel sistema naturale (ξ,η,ζ) .

Le coordinate x,y,z e gli spostamenti u,v,w del generico elemento nel sistema (x,y,z) sono quindi definiti dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^N N_i x_i & y &= \sum_{i=1}^N N_i y_i & z &= \sum_{i=1}^N N_i z_i \\ u &= \sum_{i=1}^N N_i u_i & v &= \sum_{i=1}^N N_i v_i & w &= \sum_{i=1}^N N_i w_i \end{aligned}$$

dove N_i sono le cosiddette funzioni di forma.

Le funzioni di forma N_i sono in numero pari al numero di nodi e variano in valore tra 0 e 1; in particolare assumo valore unitario in corrispondenza del nodo i e valore nullo in corrispondenza degli altri nodi dell'elemento.

Nel caso di elementi tetraedrici a quattro nodi le funzioni di forma sono definite dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} N_1 &= 1 - \xi - \eta - \zeta \\ N_2 &= \xi \\ N_3 &= \eta \\ N_4 &= \zeta \end{aligned}$$

La matrice \mathbf{B}_i definisce la relazione tra gli spostamenti nodali u_i e il vettore delle deformazioni $\boldsymbol{\varepsilon}$:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \sum_{i=1}^N \mathbf{B}_i u_i$$

dove la matrice \mathbf{B}_i è definita dalle derivate delle funzioni di forma:

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Attraverso la matrice B_i è possibile definire la matrice di rigidezza dell'elemento:

$$K_{ij} = \int_{V_e} B_i^T D B_i dV$$

La discretizzazione di ogni singolo elemento è stata effettuata con la medesima metodologia ovvero Unstructured mesh, realizzabile con il comando *Mesh > Auto Mesh > Solid* (tasto rapido ) (figura 2.4.6).

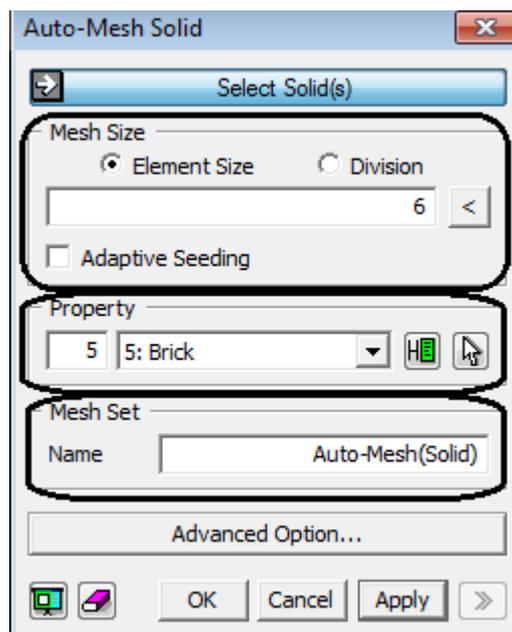


Figura 2.4.6 – Auto-Mesh Solid.

Come si può ben notare della schermata in *figura 2.4.6*, la discretizzazione si può realizzare identificando tre parametri :

- *Mesh size* : grandezza degli elementi tetraedrici;
- *Property*: proprietà dell' elemento da discretizzare;
- *Mesh Set*: nominare la mesh che si sta creando.

Bisogna porre particolare attenzione nel valutare il valore da inserire in *Mesh size*, ovviamente inserendo dei valori elevati la mesh verrà molto ampia, viceversa inserendo dei valori ridotti.

Ovviamente non esiste un valore consigliato di quanto grande realizzare la mesh, ma dipende tutto dal modello che si sta realizzando e dal tipo di analisi che l'utente si aspetta il programma di calcolo effettui; se ad esempio si è interessati a valutare il comportamento di un grande edificio nel suo complesso, non avrebbe senso discretizzare allo stesso modo in cui si discretizzerebbe un modello di un nodo trave pilastro.

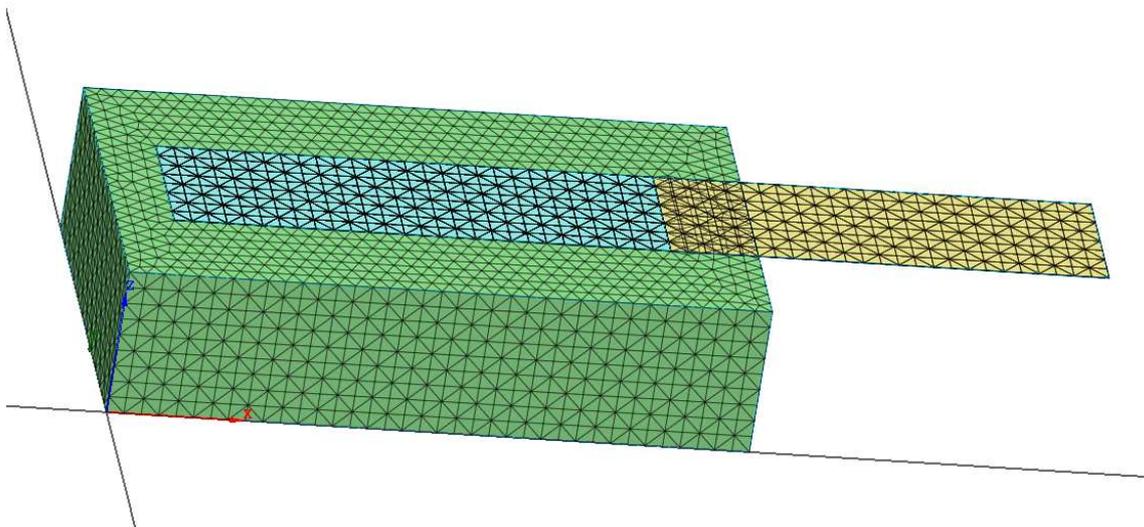


Figura 2.4.7 – *Mesh size =6*.

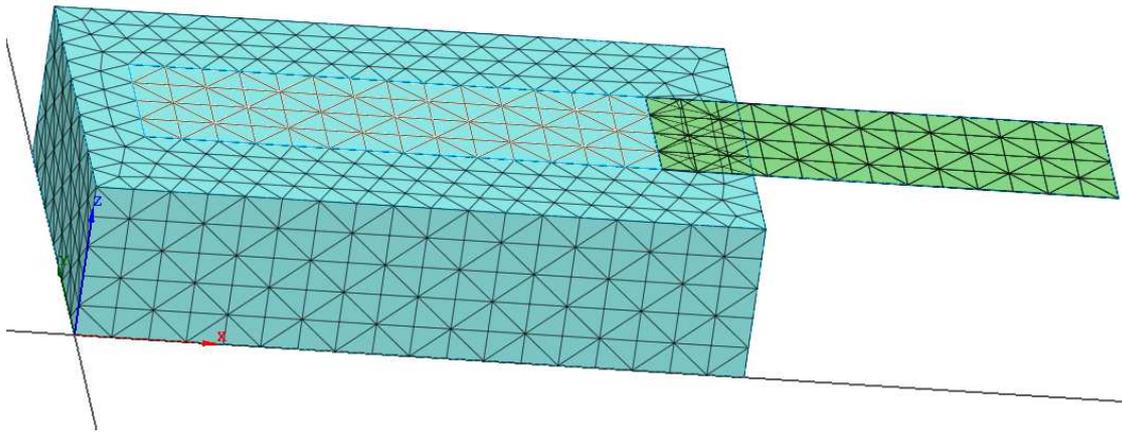


Figura 2.4.8 – Mesh size =12.

La discretizzazione utilizzata in questo primo modello risulta essere una discretizzazione media, quindi né tanto specifica, né tanto diradata, ed in particolare è mostrata in *figura 2.4.7*.

2.5 Interfaccia mattone – FRP

Sezione a parte merita la trattazione, sia dal punto di vista analitico che dal punto di vista numerico, dell'interfaccia che è stata realizzata tra mattone e FRP, in quanto oltre ad essere una parte molto spinosa per quanto riguarda il calcolo, rappresenta ciò su cui si basa il lavoro della tesi, ovvero valutare come la lamina riesce a scambiare azioni con il mattone.

Come detto nel *paragrafo 2.2*, è stato utilizzato il comando *Boolean cut*, per poter creare l'elemento di interfaccia, in quanto solo se i due elementi hanno nodi in comune è possibile effettuare questa operazione.

Così come è stato fatto per il mattone e l'FRP, si sono inserite anche per l'interfaccia le rispettive proprietà utilizzando sempre il comando *Analysis > Material > Create > Interface*, come riportato in *figura 2.5.1*.

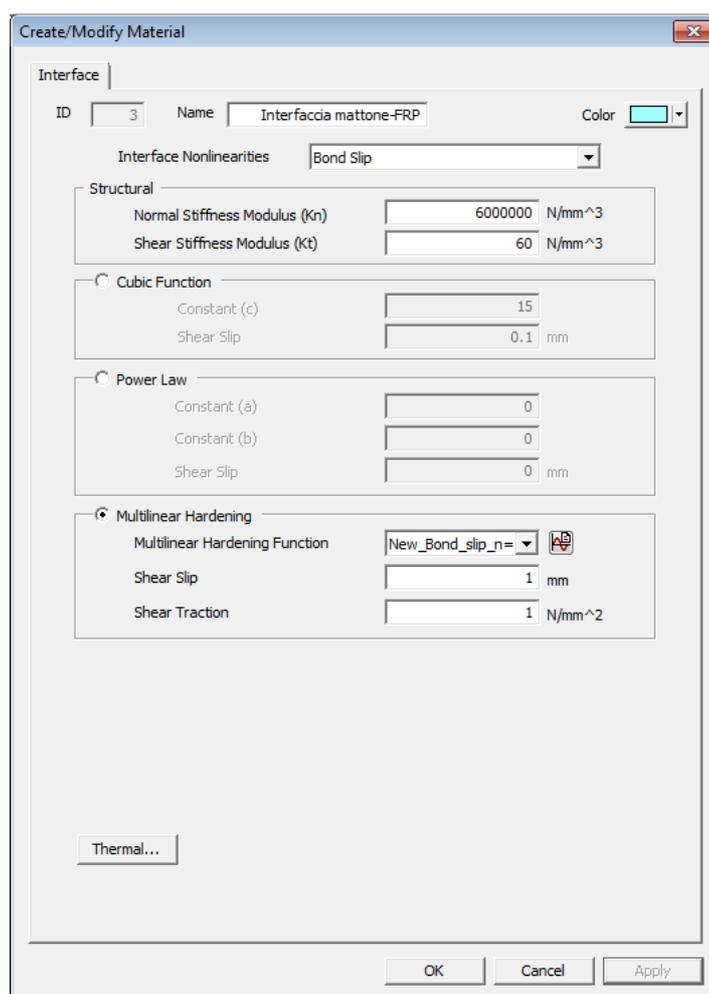
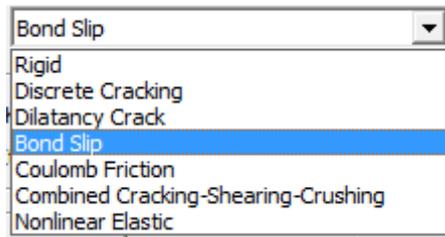


Figura 2.5.1 - Create Interface model.

Come legame di interfaccia, le possibili soluzioni erano:



Ovviamente è stata selezionata l'opzione *Bond Slip*, in quanto la legge che regola questa interazione è una legge di questo tipo.

I parametri da settare rimangono quelli presenti nella sezione *Structural*, ovvero *Normal Stiffness modulus (Kn)*, e *Shear Stiffness Modulus (Kt)*. Per poter inserire in maniera idonea questi parametri ci si deve rifare ad una regola pratica secondo cui come rigidità normale si utilizza un valore pari a 1000 volte il modulo elastico del mattone e come valore della rigidità di taglio un valore adeguato alla legge di interfaccia che si inserisce nella sezione successiva.

Per poter inserire la curva Bond slip, sono possibili tre soluzioni come ci illustra Midas Fea, la prima riguarda l'inserimento di una funzione cubica in cui bisogna inserire due valori:

- *Constant*;
- *Shear slip*.

L'altra possibilità è quella di inserire un legame *Power Law*, ed infine l'ultima possibilità che risulta essere anche quella più flessibile è quella di inserire per punti la legge di interfaccia.

Tra le diverse opzioni è stata inserita proprio la terza, quindi è stata inserita per punti la legge bond-slip; inizialmente prendendo come valori di riferimento la τ di picco, il valore dello slip in corrispondenza della τ di picco e l'ultimo valore dello slip, è stata inserita una curva caratterizzata solamente da 3 punti (*figura 2.5.2*).

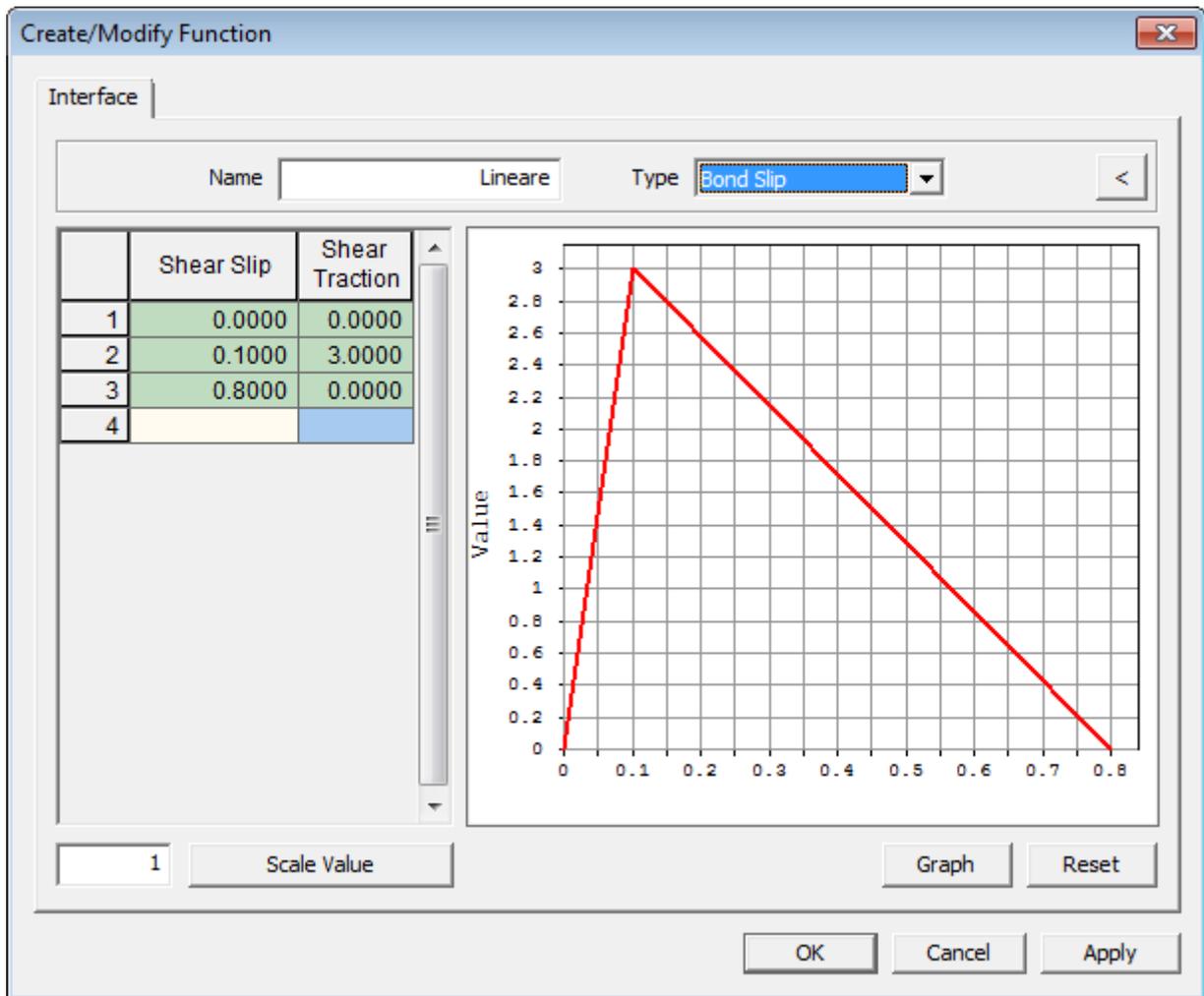


Figura 2.5.2 - Legge di interfaccia lineare.

Successivamente invece una volta che è stato fatto girare il programma e quindi risolte tutte le altre problematiche è stato possibile inserire una vera e propria legge di interfaccia proposta da Popovics et al. (1973) riportata qui di seguito:

$$\tau(s_p) = \tau_{\max} \cdot \frac{s_p}{s} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s_p}{s}\right)^n}$$

in cui:

τ_{\max} rappresenta il valore massimo della tensione di interfaccia

\bar{s} indica il valore di scorrimento corrispondente alla tensione tangenziale τ_{\max}

n è un parametro che definisce il ramo di softening.

Attraverso un file Excel è stato possibile inserendo questa formula, ed inserendo i i tre parametri riportati sopra, avere a disposizioni i punti necessari per poter descrivere al meglio la curva.

I valori inseriti sono stati ripresi dai risultati ottenuti dalle prove sperimentali, e successivamente alla fine dell'analisi di questo modello è stata effettuata una calibrazione della legge di interfaccia, in modo da ottenere i reali valori.

$$\tau_{\max} = 4 \text{ MPa}$$

$$\bar{s} = 0.05$$

$$n = 3$$

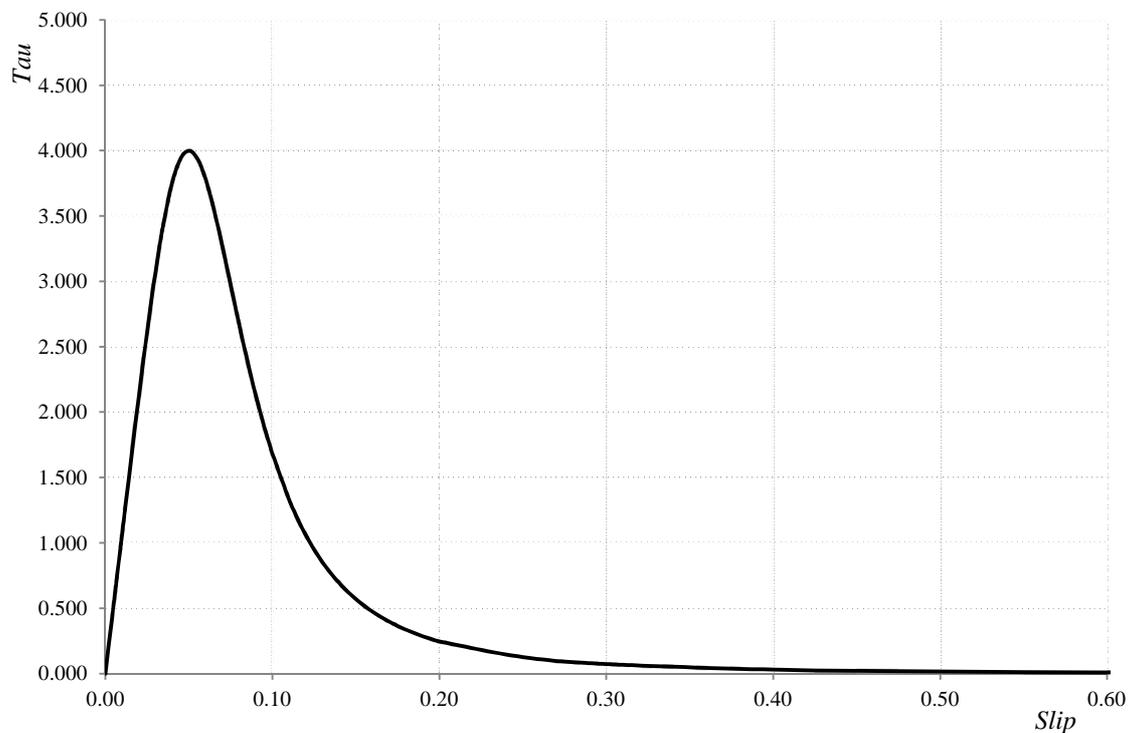
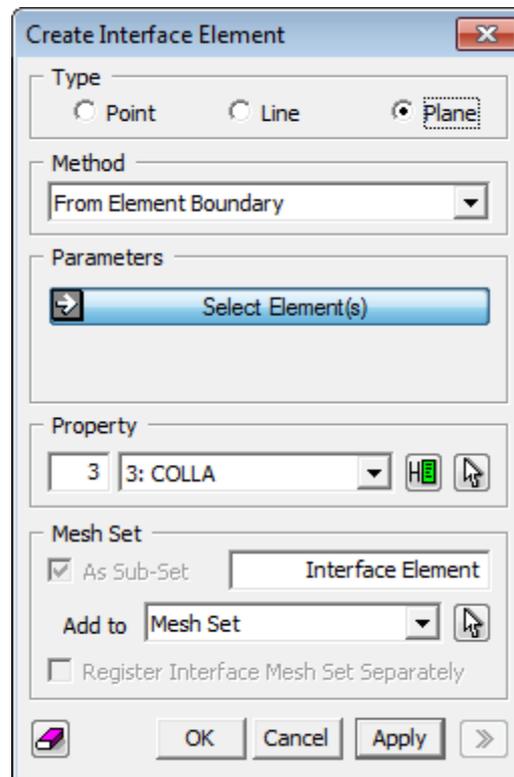


Figura 2.5.3 - Legge Bond - Slip.

In particolare il parametro n è un parametro che regola la larghezza della pancia della curva bond slip, e nel nostro caso regola il ramo plastico della curva forza-allungamento che verrà mostrata alla fine dell'analisi.

Una volta settati i parametri riguardanti le proprietà meccaniche è stato possibile effettuare la discretizzazione dell'interfaccia, quindi si è creato un strato di elementi tetraedrici tra il

mattoni e la lamina, questa operazione è resa possibile grazie al comando *Mesh > Element > Create Interface Element* (tasto rapido ).



È possibile creare elementi di interfaccia in un punto, lungo una linea oppure lungo un piano, nel nostro caso poiché si sta effettuando un'analisi tridimensionale, si crea l'interfaccia su di un piano, inoltre il programma di calcolo offre la possibilità di utilizzare diversi metodi, a seconda della posizione e del tipo di interfaccia che si vuole creare, le diverse possibilità sono:

- *From Element Boundary*: crea elementi di interfaccia nell'intorno dell'elemento selezionato;
- *Manual Node ID Input*: crea elementi di interfaccia inserendo i nodi iniziale e finale lungo cui c'è l'interfaccia;
- *Covert Element*: consente di convertire un elemento 2D in un elemento 3D;
- *From Free Face*: si creano elementi di interfaccia sulle singole facce dei tetraedri;
- *From Plate*: elementi di interfaccia sono creati sugli elementi plate.

Nel caso trattato si è utilizzato il comando *From Element Boundary*, in quanto era necessario creare un'interfaccia lungo tutto il tratto A della lamina (figura 2.2.8).

L'aspetto della creazione dell'interfaccia è un problema che ha portato via un sacco di tempo, in quanto non è stato semplice definire in maniera appropriata la geometria dell'interfaccia, in quanto poiché l'inserimento dell'opzione *From Element Boundary*, consente di inserire interfaccia nell'intorno dell'elemento selezionato, ciò comportava che anche nel collegamento tra i due elementi di interfaccia A,B (*figura 2.2.8*) si creasse un'interfaccia di questo tipo bond-slip,cosa che invece non si voleva, quindi dopo numerosi tentativi è stato possibile capire che il modo in cui creare l'interfaccia, seppur usando il *From Element Boundary*, ma soltanto lungo delle facce scelte dall'utente.

Questo procedura è resa possibile selezionando oltre all'elemento sul cui bordo creare l'interfaccia, anche l'elemento su cui eliminarla, per maggiore chiarezza vengono mostrate le due figure sottostanti.

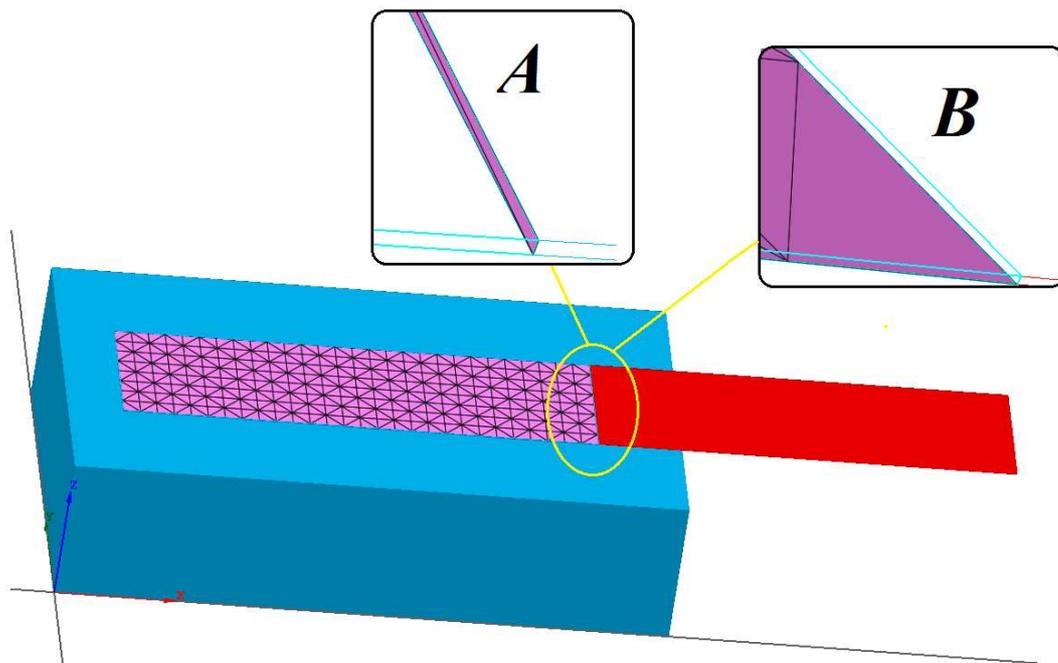


Figura 2.5.4 - Discretizzazione interfaccia.

Come si può ben notare dalla *figura 2.5.4*, era possibile incorrere nel problema A, come spiegato in precedenza e quindi avere un legame Bond-slip anche tra i due elementi lamina e ciò avrebbe comportato un notevole errore sui risultati successivi, in realtà il giusto approccio al problema porterebbe alla soluzione tipo B.

2.6 Vincolamento e condizioni di carico

2.6.1 Vincolamento

In questo paragrafo si fa riferimento al vincolamento che è stato inserito nel modello, quindi si andranno ad identificare i gradi di libertà delle diverse mesh create precedentemente; inoltre oltre alle condizioni di vincolo sono stati ovviamente applicati dei carichi al modello per poter valutare il comportamento non lineare.

Nella figura sottostante verranno sottolineati i diversi ritegni inseriti nel modello sperimentale, ovviamente nel trasferirli al modello numerico sono stati osservati diversi accorgimenti.

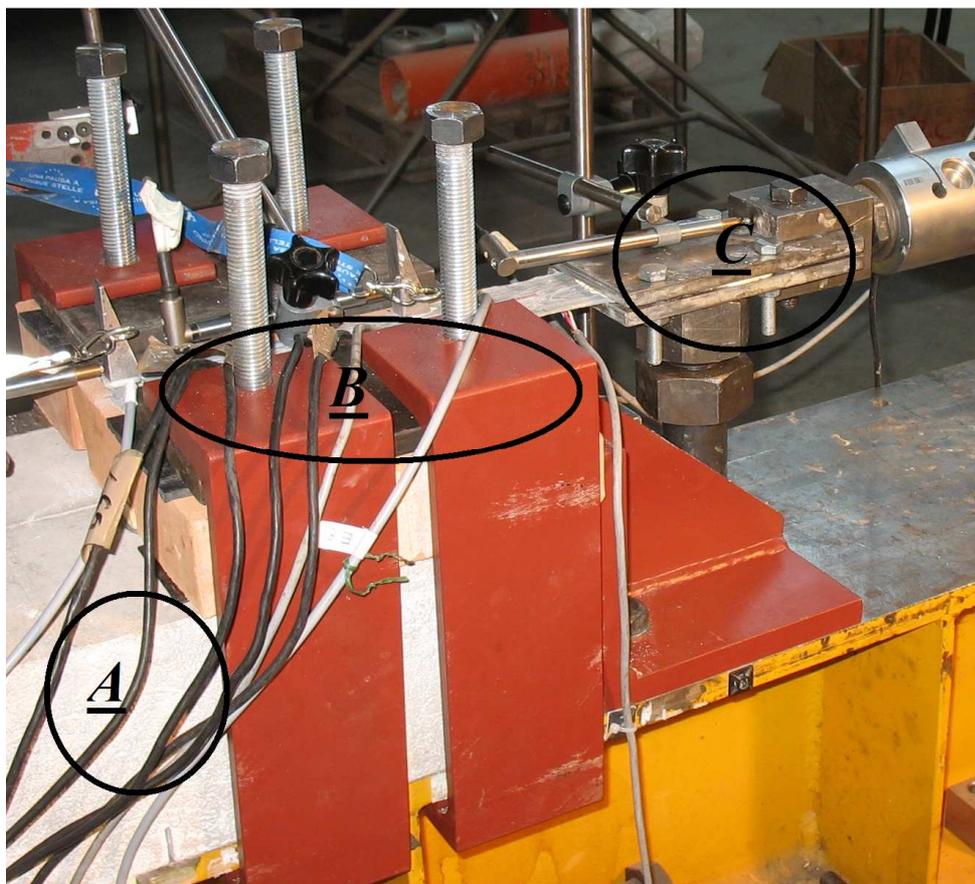


Figura 2.6.1.1 - Vincolamento.

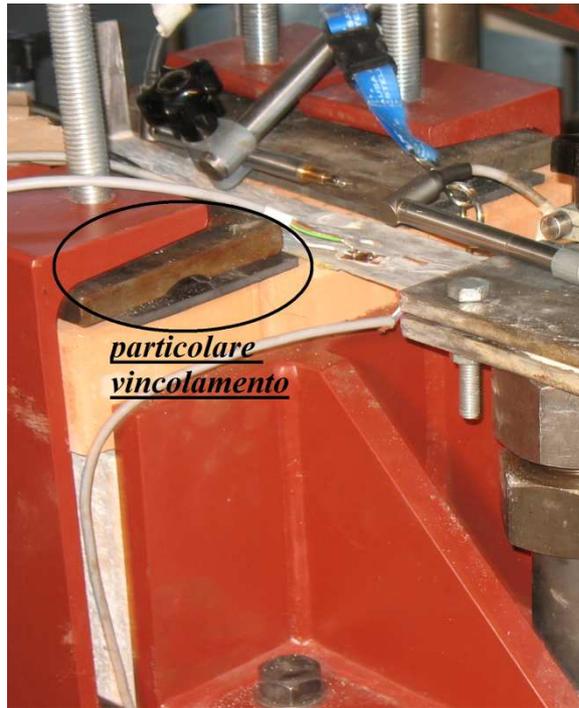


Figura 2.6.1.2 - Particolare vincolamento B.



Figura 2.6.1.3 - Particolare vincolamento anteriore.

Come si può ben notare in *figura 2.6.1.1*, sono stati evidenziati i diversi vincoli utilizzati nel modello sperimentale e che successivamente sono stati ripresi per la generazione del modello numerico .

Il vincolo di tipo A , rappresenta un vincolo alla base del mattone e nel modello numerico è stato schematizzato come un vincolo a carrello che impedisce quindi la traslazione in direzione z seguendo il riferimento riportato in *figura 2.6.4*.

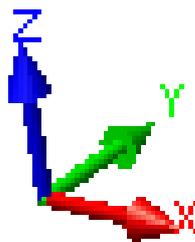


Figura 2.6.1.4 - Sistema di riferimento.

Il vincolamento di tipo B è rappresentato da un ritegno in grado di tenere schiacciato il mattone e quindi evitare qualsiasi movimento in direzione z, nella *figura 2.6.1.2*, viene riportato un particolare per comprendere meglio il significato di tale vincolo.

Il ritegno C, è rappresentato anch'esso da dei carrelli che non permettono all'estremità della lamina alcun movimento in direzione z, e nella campagna sperimentale ciò è stato possibile grazie alla piastra di afferraggio in cui è possibile tirare l'FRP per imporre il carico desiderato.

L'ultima tipologia di vincolamento è quella rappresentata in *figura 2.6.1.3*, nella quale lungo circa 2/3 dell'altezza del provino è applicato un ritegno per impedire gli spostamenti lungo la direzione x.

All'interno del programma di calcolo Midas Fea il percorso che bisogna seguire per l'applicazione dei diversi vincoli al nostro modello numerico è piuttosto semplice.

Il comando con cui vengono applicate queste indicazioni è *Analysis > BC > Constraint* (tasto rapido ). Seguendo questo percorso si apre una schermata come quella riportata in *figura 2.6.1.5*, nella quale bisogna settare le diverse tipologie di vincolamento.

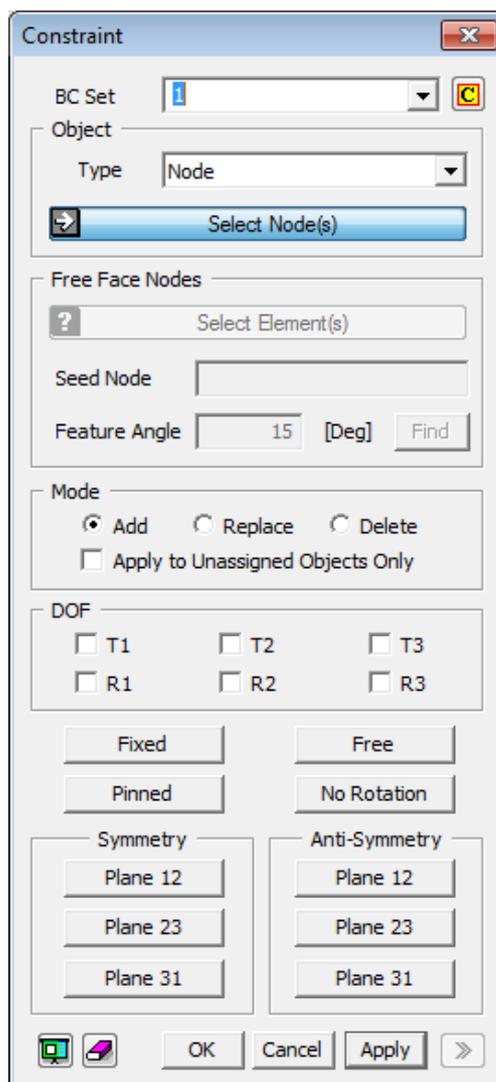
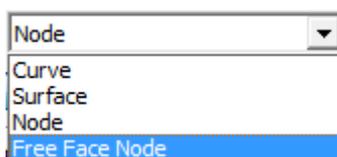


Figura 2.6.1.5 - Constraint.

Nella riga *BC Set* si inserisce il nome con cui richiamare i diversi vincoli, in *Object > Type* invece, è possibile determinare su cosa applicare il vincolamento, come riporta la figura sottostante.



Quindi a seconda che il vincolo si vuole applicare a nodi, o a superfici o ad altri elementi, bisogna scegliere l'opzione giusta in questa tendina.

Nel nostro caso per quanto riguarda i vincolamenti B, C e quello applicato sulla parte anteriore del mattone, si è utilizzato il vincolamento nodale, quindi si sono andati a

selezionare tutti i singoli nodi ed applicare le condizioni di vincolo, per quanto riguarda invece il vincolamento di tipo A, invece, si è preferito utilizzare il comando *Surface*, in grado di creare un vincolamento omogeneo lungo tutta la faccia selezionata.

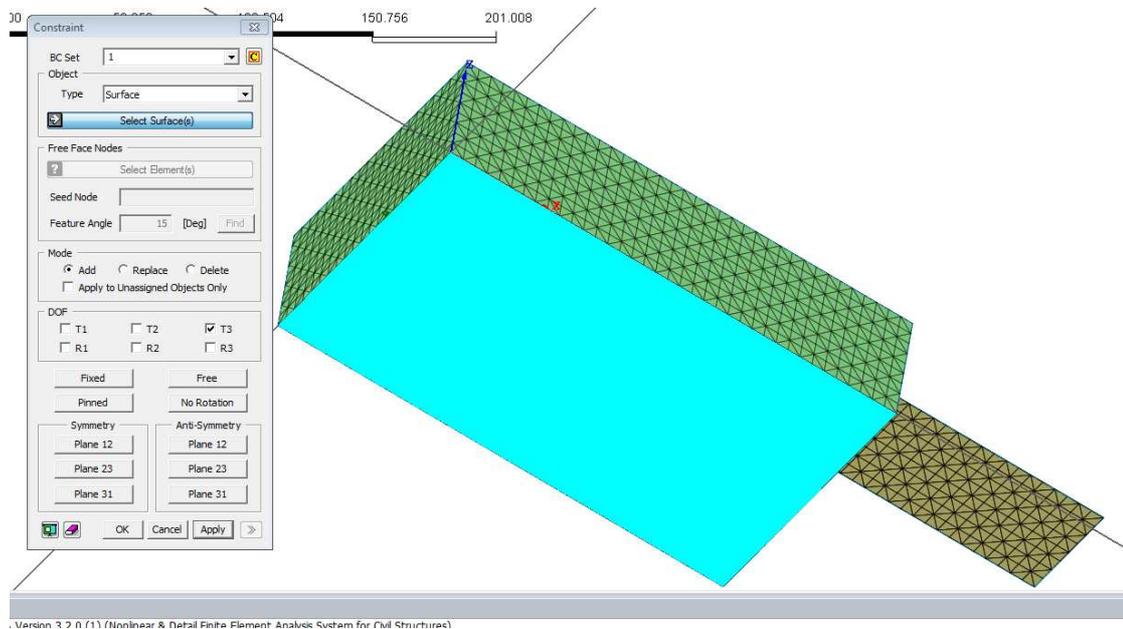


Figura 2.6.1.6 - Constraint.

Una volta che è stata selezionata l' opzione desiderata su cui applicare il vincolo bisogna decidere quali sono i gradi di libertà.

In questo programma di calcolo in particolare invece di utilizzare le solite indicazioni quindi le tre direzioni ortogonali x,y,z , si utilizzano i numeri $1,2,3$, andando poi anche a specificare se si tratta di vincoli traslazionali oppure di vincoli rotazionali ,contrassegnando quindi i vari numeri con la lettera T nel primo caso ed R nel secondo.

C' è la possibilità di semplificare l' assegnazione dei vincoli andando a selezionare tra le opzioni segnate nella *figura 2.6.1.7*, quella desiderata, in modo che il programma imponga in maniera automatica il vincolamento corrispondente.

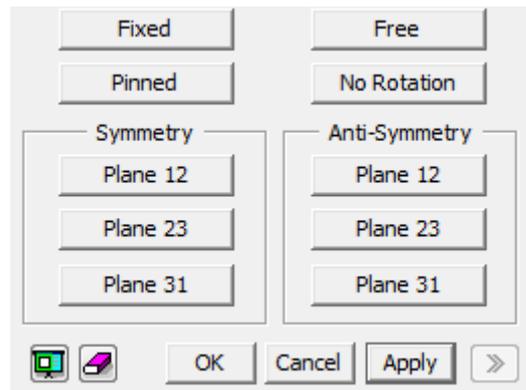


Figura 2.6.1.7- Automatic DOF.

Si riporta di seguito una figura riassuntiva de vincolamento adottato per questa tipologia di modello (figura 2.6.1.8).

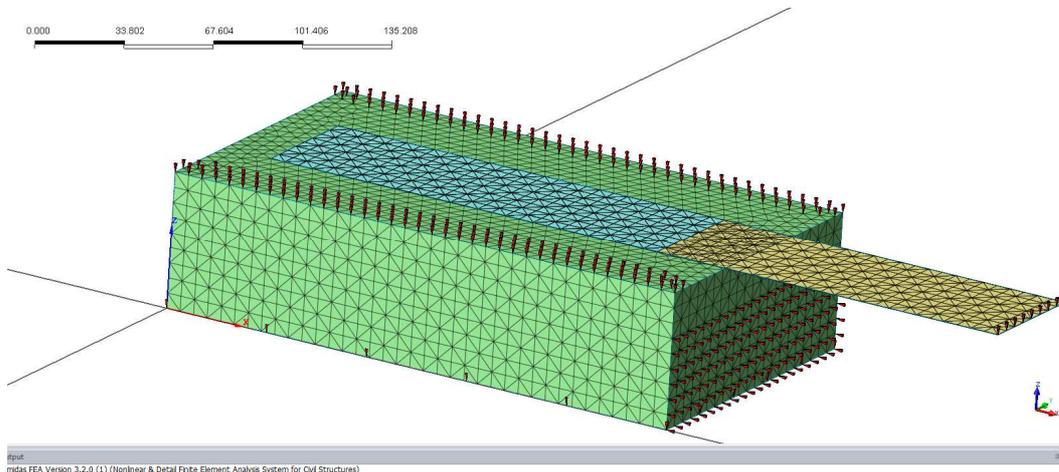


Figura 2.6.1.8- Vincolamento modello A.

2.6.2 Load Set

In questo paragrafo sono riportate tutte le indicazioni adottate per descrivere al meglio il carico applicato al modello.

Ovviamente, come per tutta la durata della tesi si è fatto riferimento alle indicazioni che sono state fornite dalla campagna sperimentale.

Dal punto di vista sperimentale l'applicazione del carico sul mattone rinforzato con la lamina è stata possibile grazie a quella che è stata chiamata cella di carico.

La cella di carico, utilizzata per misurare il carico applicato al rinforzo, è posizionata al termine del martinetto ad azione manuale, prima dell'afferraggio ed è visibile in *figura 2.6.2.1*.



Figura 2.6.2.1- Cella di carico.

Le prove sono state svolte applicando una forza di trazione al rinforzo, trasmessa dal sistema di tiro al composito attraverso le due piastre di afferraggio.

Il martinetto impiegato è stato pilotato manualmente mediante uso di una manovella ad asse verticale (*figura 2.6.2.2*).

L'applicazione del carico avviene ruotando la manovella, mentre un riduttore di giri rende lento e progressivo lo spostamento della vite senza fine.

La prova viene eseguita in controllo di spostamento.

Man mano che si applica il carico, il sistema di acquisizione registra in tempo reale i dati forniti da estensimetri, LVDT e cella di carico.

Prima di iniziare ogni prova è necessario definire, per ogni strumento utilizzato, i parametri corretti per il suo funzionamento.

Per quanto riguarda gli estensimetri, è necessario definire il corretto voltaggio di alimentazione (pari a 2.5 V), regolare il grado di amplificazione del segnale e bilanciare il ponte di Wheatstone.

Si comincia ad applicare carico al campione fino a giungere ad un valore pari a 100kg, dopo il quale si effettua lo scarico fino a tornare allo zero.

Completato il ciclo di carico-scarico iniziale, che serve a garantire un eventuale assestamento del campione, inizia la prova vera e propria, che ha luogo facendo crescere la forza fino all'innescò del meccanismo di debonding, che si è manifestato per valori diversi di carico a seconda della tipologia di campione.

Si procede quindi ad applicare carico fino al completo distacco del rinforzo dal substrato, continuando a monitorare le letture degli strumenti grazie al sistema di acquisizione.



Figura 2.6.2.2- Sistema di tiro: sono visibili la manovella ad asse verticale e il riduttore posto subito dopo la manovella.

Questo è stato quello che ha riguardato applicare il carico dal punto di vista sperimentale, dal lato numerico invece l'applicazione del carico è stata effettuata puntualmente lungo la parte finale della lamina fibrorinforzata.

Il comando necessario all'applicazione del carico segue il seguente percorso *Analysis > Load > Displacement*.

Bisogna sottolineare che nel modello di calcolo il carico applicato equivale ad applicare uno spostamento di *2mm* lungo la parte finale della lamina.

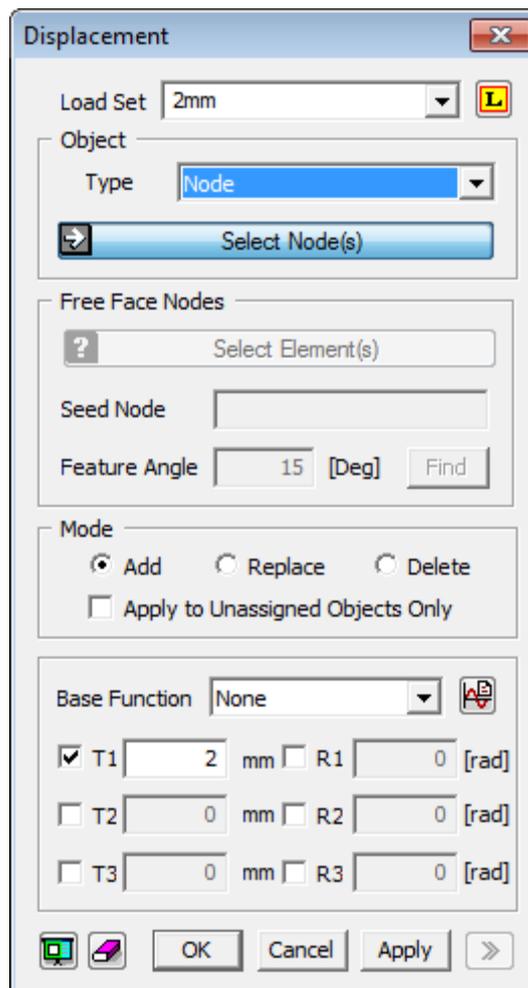


Figura 2.6.2.3- Load Set.

Come mostra la figura in alto, allo stesso modo dell'applicazione del vincolamento, bisogna scegliere se applicare il carico sui nodi o sulla superficie, nel nostro caso è stato applicati ai nodi sulla parte anteriore della lamina (*figura 2.6.2.4*).

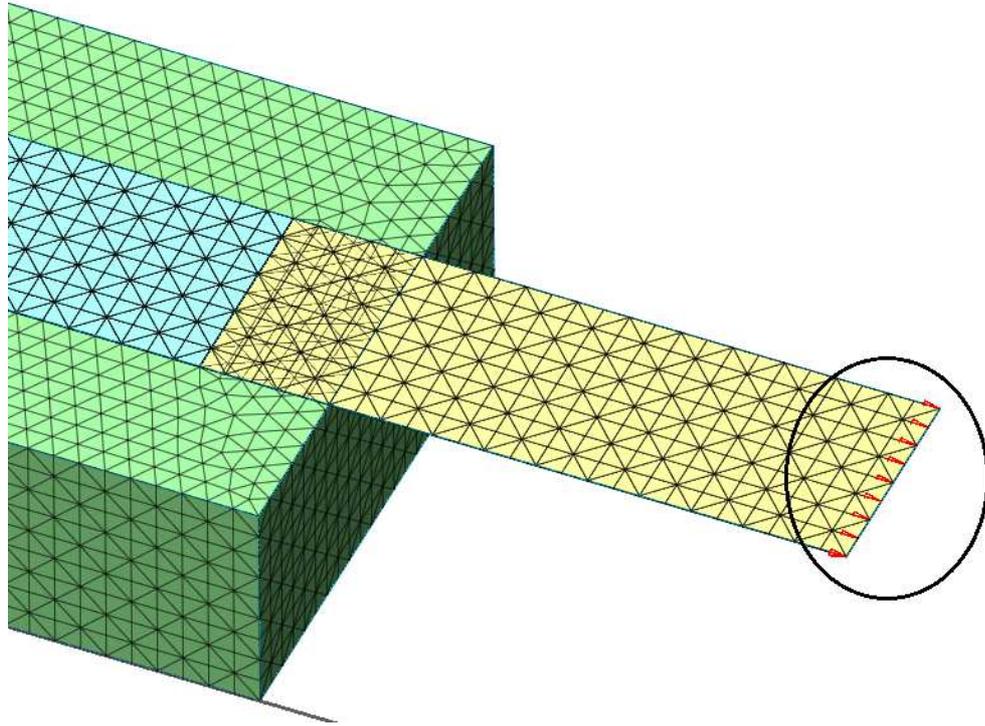


Figura 2.6.2.4- Load Set.

Così come per i vincoli anche per quanto riguarda il carico, viene ripresa la convenzione delle direzioni $1,2,3$ invece che x,y,z , e la notazione T , e R , quindi bisogna inserire i valori adatti nella casella giusta ricordando il segno $+$ o $-$ a seconda che i carichi siano applicati in direzione concorde o discorde alle tre direzioni.

2.7 *Analisi non lineare*

In questo paragrafo saranno riportate tutte le indicazioni necessarie ad effettuare l'analisi non lineare del modello geometrico discretizzato.

Nell'analisi non lineare agli elementi finiti il rapporto tra il vettore forza ed il vettore spostamento non è più lineare. Per diversi motivi, ad esempio in caso di non linearità del materiale, il rapporto diventa non lineare, e gli spostamenti dipendono molto spesso dagli spostamenti delle fasi precedenti, ad esempio in caso di comportamento plastico del materiale.

Proprio come per un'analisi lineare, vogliamo calcolare un vettore spostamento che equilibri le forze interne ed esterne. Nel caso lineare il vettore soluzione può essere calcolato subito, a differenza del caso non lineare.

Per determinare lo stato di equilibrio, non solo ci sono soltanto discreti problemi nello spazio, ma anche nel tempo. Per raggiungere l'equilibrio alla fine di ogni incremento. Si può utilizzare un algoritmo di soluzione iterativo, che prende il nome di soluzione incrementale- iterativa.

Un buon punto di partenza è quello in cui si ha uno stato di equilibrio tra forza interna e forza esterna, in modo da soddisfare le condizioni al contorno.

$$f_{int} = f_{ext}$$

$$u_i = u_i^o \quad (i \text{ Prescribed})$$

Nell'analisi non lineare, il vettore delle forze interne dipende di solito dalla non linearità degli spostamenti (ad esempio elasticità non lineare).

Questo è il caso in cui il materiale è "path dependent" ovvero dipende dal percorso eseguito, come nella plasticità.

Il vettore delle forze esterne può anche dipendere dallo spostamento, e in questo caso si parla di non linearità della geometria.

Per consentire una soluzione numerica viene effettuata una discretizzazione del tempo, che può essere un tempo reale o uno pseudo-tempo.

Nel processo iterativo, a partire dal tempo t in cui è nota la soluzione ${}^t\mathbf{u}$, si ricerca la

soluzione ${}^{t+\Delta t}\mathbf{u}$ che soddisfa la relazione $f_{\text{int}} = f_{\text{ext}}$ al tempo $t+\Delta t$:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{u} = {}^t\mathbf{u} + \Delta\mathbf{u}$$

$$g(\Delta\mathbf{u}) = f_{\text{ext}}(\Delta\mathbf{u}) - f_{\text{int}}(\Delta\mathbf{u}) = 0$$

in cui:

$\Delta\mathbf{u}$ è il vettore incognita;

\mathbf{g} è il vettore delle forze residue.

L'adozione di un simile metodo puramente incrementale, porta generalmente a errori nella risoluzione del sistema non lineare, a meno che non vengano adottati incrementi molto piccoli.

Nel caso di analisi non lineari è necessario adottare un processo iterativo per la determinazione dell'incognita $\Delta\mathbf{u}$:

$$\Delta\mathbf{u}_{i+1} = \Delta\mathbf{u}_i + \delta\mathbf{u}_{i+1}$$

Indipendentemente dal tipo di processo iterativo adottato, il principio è il medesimo: il corretto incremento di spostamento $\Delta\mathbf{u}$ viene ricercato per successive iterazioni finchè la condizione di equilibrio è rispettata, a meno di una tolleranza da definire.

La differenza tra le varie procedure iterative, riguarda quindi in sostanza il modo in cui il vettore $\delta\mathbf{u}$ viene determinato.

Tra i diversi metodi dell'analisi non lineare utilizzabili, tra cui il Newton-Raphson e l'Arc Length, è stato utilizzato un metodo alternativo generale, da cui il metodo di Newton Raphson modificato trae ispirazione, e si chiama metodo *Initial Stiffness Method*.

Questo metodo utilizza la matrice di rigidezza iniziale, calcolata all'inizio della fase di carico, e la lascia invariata durante l'intero processo di analisi.

Questo metodo viene utilizzato per quelle analisi che tendono a mostrare l'instabilità. Le soluzioni che si trovano sono generalmente stabili, anche se gli incrementi di carico e la convergenza di ciascun incremento avvengono in maniera piuttosto lenta.

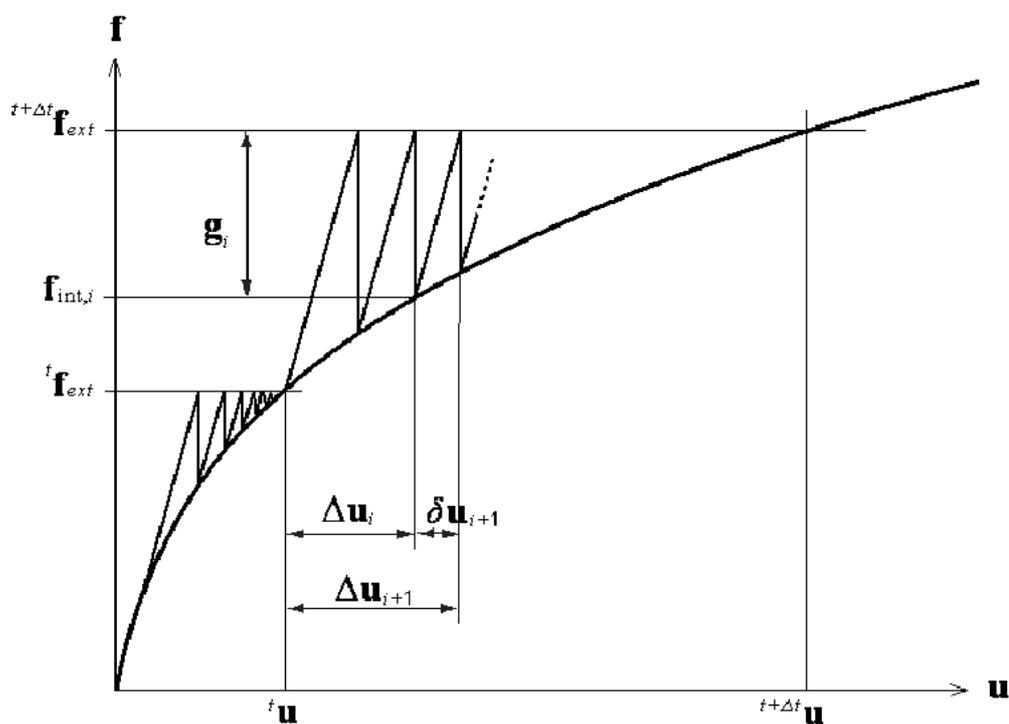


Figura 2.7.1- Initial Stiffness Method.

In particolare è stato utilizzato oltre al metodo descritto sopra un ulteriore metodo, in quanto il codice di calcolo consente di cambiare il metodo di iterazione durante l'analisi, nel caso in cui non si riesca a trovare la soluzione. Il secondo metodo utilizzato quindi è l'Arc Length.

In un processo di iterazione ordinario, le previsioni per gli incrementi di spostamento possono diventare di grosse dimensioni, ciò accade soprattutto se la curva di carico spostamento è quasi orizzontale, cosa che può comportare l'arresto dell'analisi.

Il problema può essere superato con l'uso di questo metodo, in quanto possono essere controllati meccanismi particolari che potrebbero portare all'arresto dell'analisi.

Di fondamentale importanza nel nostro caso è il fatto che questo metodo è in grado di superare il problema dello snap-back proposto in figura 2.7.2, problema che potrebbe insorgere durante l'analisi che si appresta ad effettuare.



Figura 2.7.2- Snap - back.

Il metodo arc-length (Riks (1972)-Wempner (1971)) si basa sulla ricerca dell'intersezione tra la curva del percorso strutturale e l'arco di circonferenza centrato nel punto iniziale del passo di equazione :

$$s = \int ds$$

$$ds = \sqrt{(d\mathbf{p}^T d\mathbf{p} + d\lambda^2 \Psi^2 \mathbf{q}_{ef}^T \mathbf{q}_{ef})}$$

dove Ψ e' un parametro dimensionale necessario per poter calcolare ds.

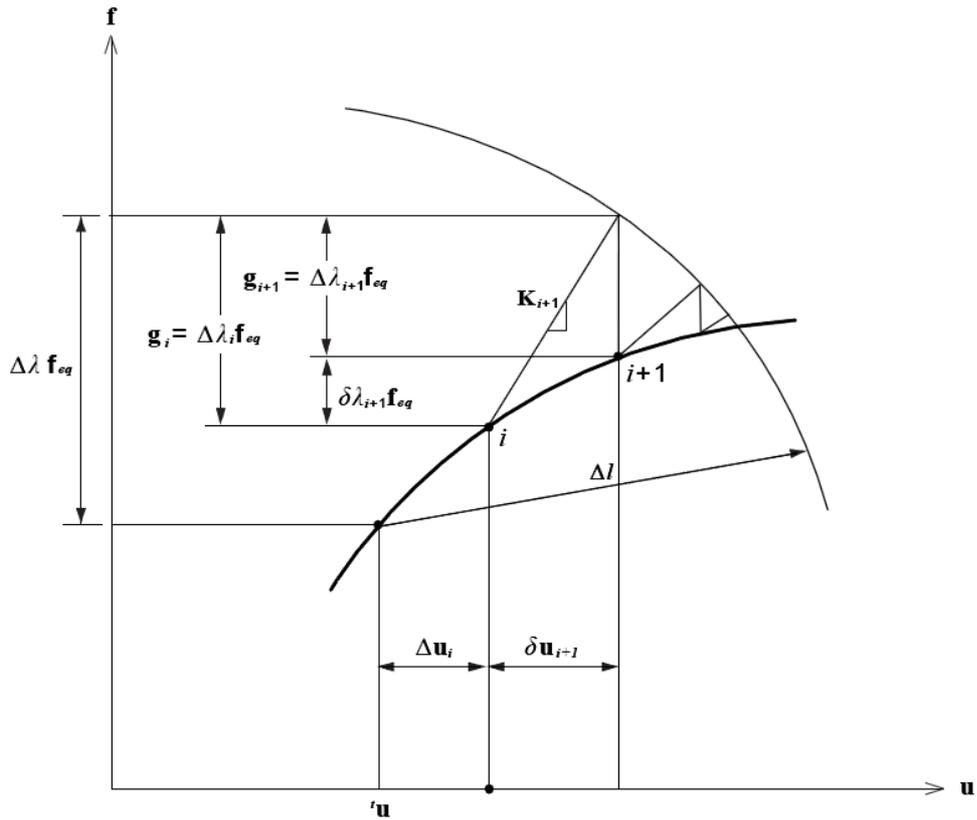


Figura 2.7.3- Arc Length Method.

Il processo iterativo all'interno di ogni step termina quando l'errore commesso nella ricerca della soluzione esatta è ritenuto accettabile. A tale scopo è possibile adottare diversi criteri di convergenza. In particolare all'interno del codice Midas FEA è possibile adottare tre diversi tipi di convergenza:

- Force norm;
- Displacement norm;
- Energy norm.

In *Figura 2.7.4* sono rappresentate le varie grandezze che caratterizzano i tre criteri di convergenza.

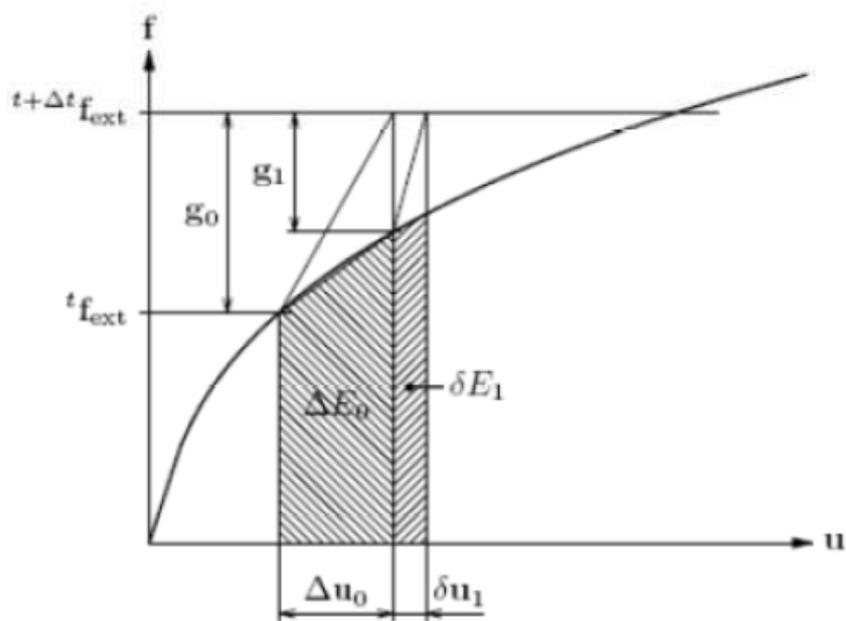


Figura 2.7.4- Criteri di convergenza.

Si è scelto di adottare il terzo criterio di convergenza definito dalla relazione:

$$\text{Energy norm ratio} = \left| \frac{\delta \mathbf{u}_i^T (\mathbf{f}_{int,i+1} + \mathbf{f}_{int,i})}{\Delta \mathbf{u}_0^T (\mathbf{f}_{int,1} + \mathbf{f}_{int,0})} \right| \leq k$$

in cui k è un valore da definire dall'utente in funzione dell'accuratezza della soluzione che si vuole ricercare; in tale lavoro di tesi è stato assunto un valore di k pari a 0.001 (Figura 2.7.6).

L'analisi attraverso il programma di calcolo Midas Fea è possibile seguendo il percorso *Analysis > Analysis Case > Add*, in cui è possibile aggiungere un caso di analisi (Figura 2.7.5).

In questa schermata è possibile come mostrato dal menù a tendina inserire diverse tipologie di analisi tra cui una *Linear Static*, *Linear Buckling* ecc.

Le analisi svolte durante questo lavoro di tesi sono tutte analisi non lineari statiche, quindi selezionato cliccando sull'opzione *Nonlinear Static*.

Un passo fondamentale risulta essere quello sotto indicato con *Add to or Modify*, in cui bisogna selezionare dalle caselle A quello che interessa sviluppare durante l'analisi, e trasferirlo nella sezione B, nel nostro caso quindi sono state selezionate tutte le mesh create, tutti i vincolamenti e tutti i carichi.

Ciò consente di creare un certo tipo di modello nella finestra principale di Midas Fea, ma allo stesso tempo di andare ad analizzare ad esempio solamente un porzione di esso, oppure è possibile applicare diversi carichi contemporaneamente, ma andare ad effettuare analisi del tutto separate per ogni carico.

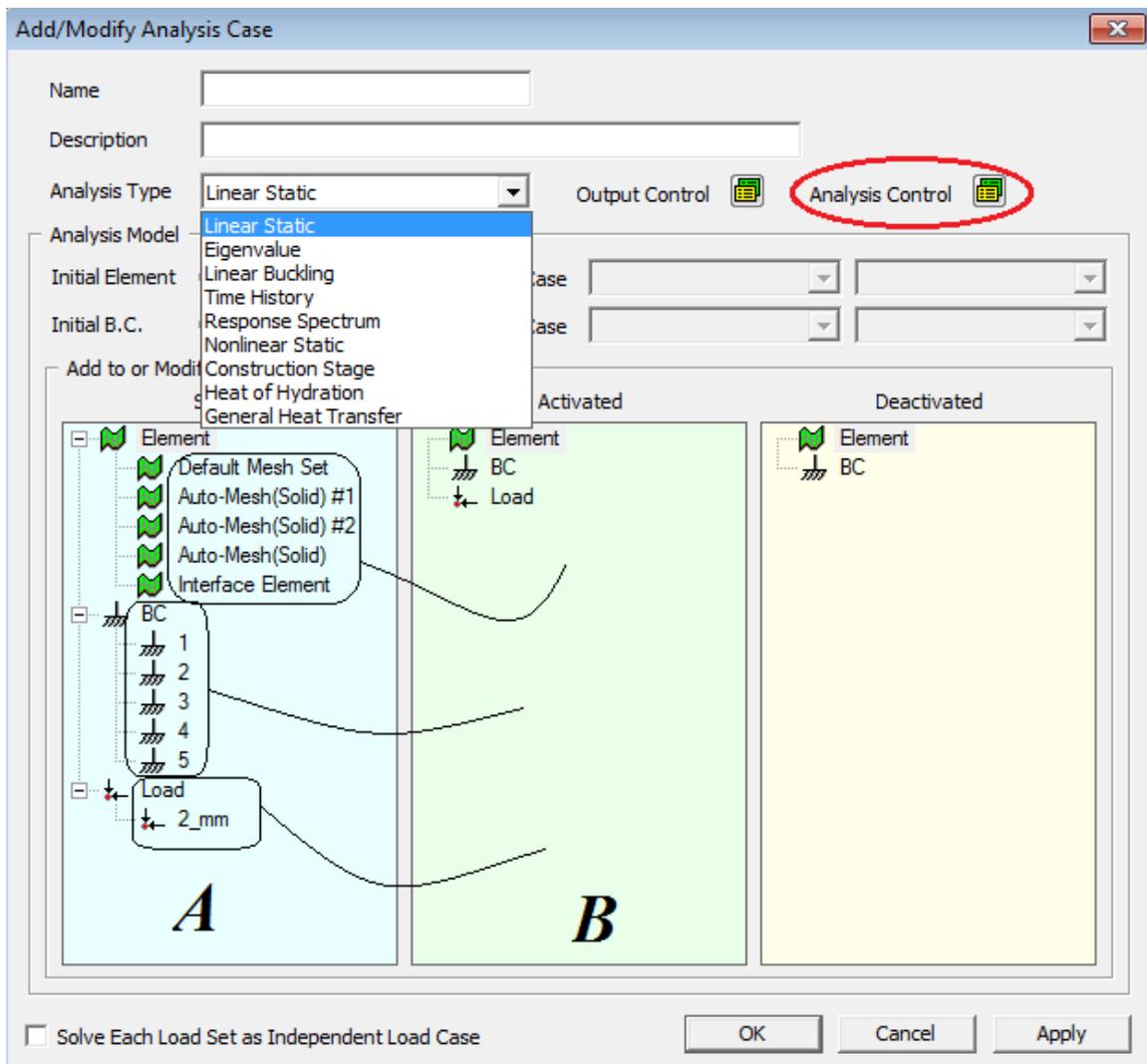


Figura 2.7.5- *New Analysis Case.*

Dopo che è stato deciso il tipo di analisi che si vuole effettuare, cliccando sul tasto *Analysis control*, si apre una schermata riportata in *figura 2.7.6*, in cui è possibile settare i parametri dell'analisi da effettuare.

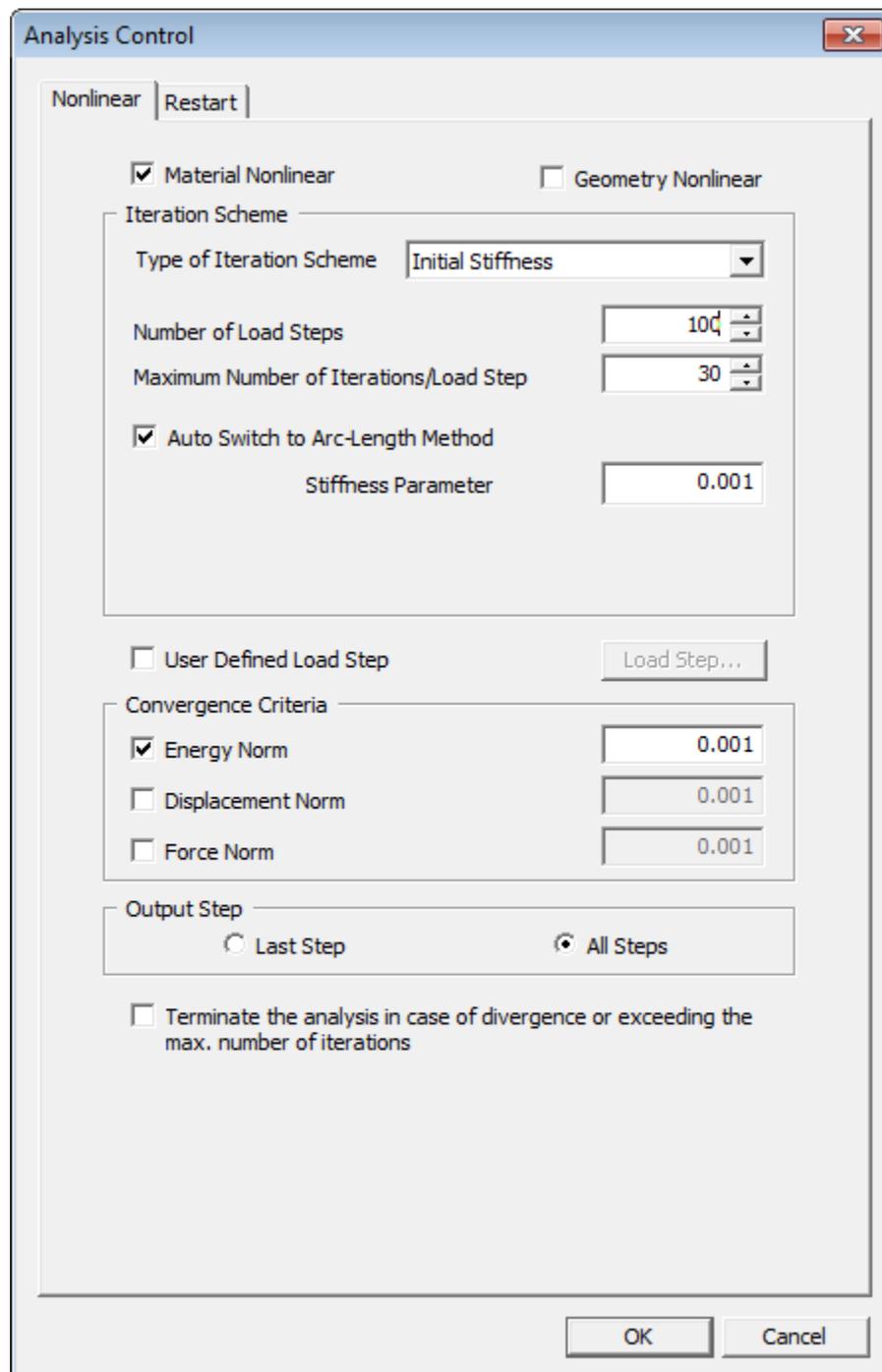


Figura 2.7.6- Analysis Control.

In particolare bisogna decidere se prendere in considerazione sia la non linearità geometrica che la non linearità del materiale (per semplicità di analisi è stata presa in considerazione soltanto la non linearità dei materiali), scegliere il tipo di metodo per l'analisi non lineare, che come spiegato in precedenza risulta essere il metodo *Initial Stiffness Method* con l' *Auto Switch* al metodo *Arc – Length*, inoltre bisogna decidere il numero step con cui applicare il carico (nel nostro caso 100), il numero massimo di

iterazioni per step (30), il parametro di rigidezza oltre cui il metodo passa dallo *Initial Stiffness* all' *Arc – Length*, ed infine scegliendo il criterio di convergenza si inserisce il parametro di convergenza.

Una volta settati tutti questi parametri è possibile effettuare l'analisi vera e propria del nostro modello *Analysis > Solve* (tasto rapido ).

È possibile come si vede in *figura 2.7.7*, seguire passo per passo l'analisi del modello, e quindi avere sotto controllo grazie alla finestra *Output*, il passo che si sta analizzando il numero di iterazione per passo, e il valore del criterio di convergenza scelto, nel nostro caso la *Energy norm*.

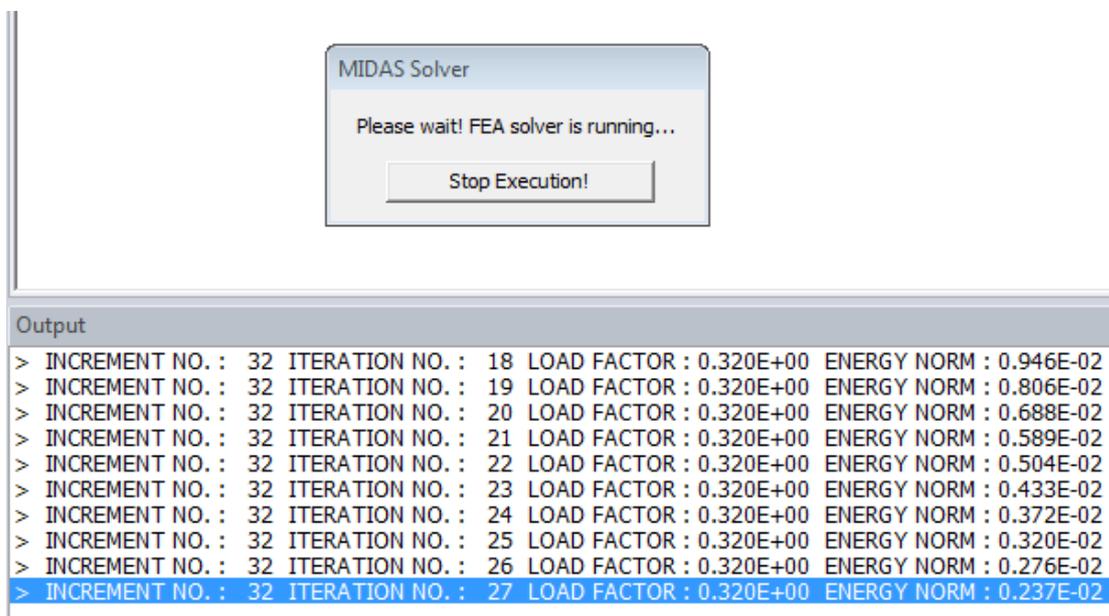


Figura 2.7.7- Output.

2.8 Elaborazione ed analisi dei risultati numerici

In questo paragrafo verranno mostrati tutti i risultati ottenuti effettuando l'analisi non lineare del modello A, mostrato in tutti i suoi dettagli nei precedenti paragrafi, in particolare verranno ripresi, come già è stato fatto de situazioni trattate nella tesi di Alessandro Bellini, nello specifico verranno confrontati i risultati ottenuti con il modello numerico sviluppato in questa tesi, con i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale intrapresa dallo stesso, presso il laboratorio Larm in via Terracini.

I risultati ottenuti attraverso l'analisi sono raccolti nella sezione *Post - Works*, in ordine di incrementi di carico; è possibile visualizzare i diversi risultati per le diverse caratteristiche tensionali e deformative (figura 2.8.1).

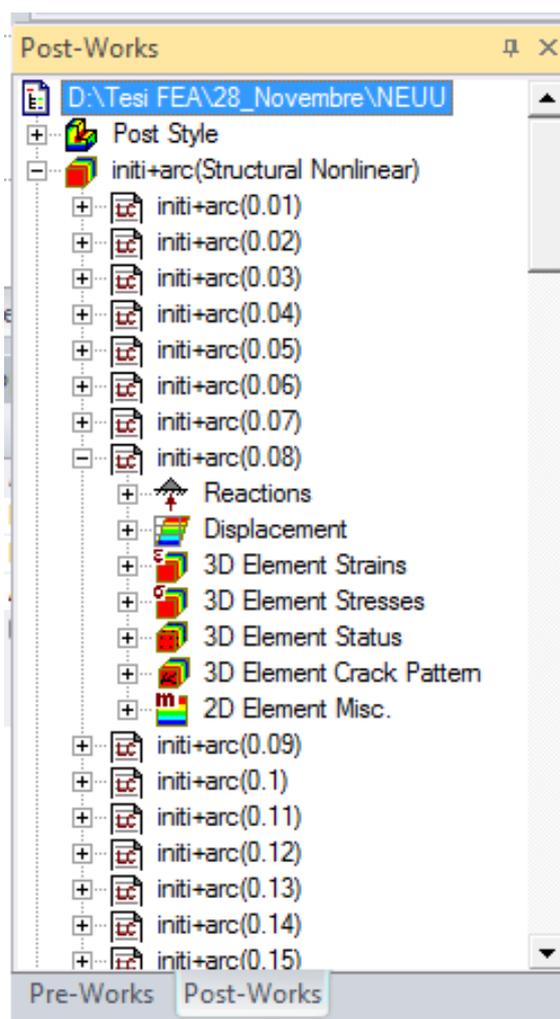


Figura 2.8.1- Post-Works

Dal punto di vista sperimentale, come già detto in precedenza si fa riferimento alla prova effettuata sul mattone B3A2a, condotta il 26/05/2011, utilizzando una strumentazione composta da 9 estensimetri (7 lungo il tratto incollato e 2 sul tratto libero per la misura del modulo elastico) e 3 LVDT, oltre ovviamente alla cella di carico.

Un primo parametro che sicuramente ci dà rassicurazioni sul modello creato è sicuramente la tensione lungo la σ_{xx} lamina (figura 2.8.2).

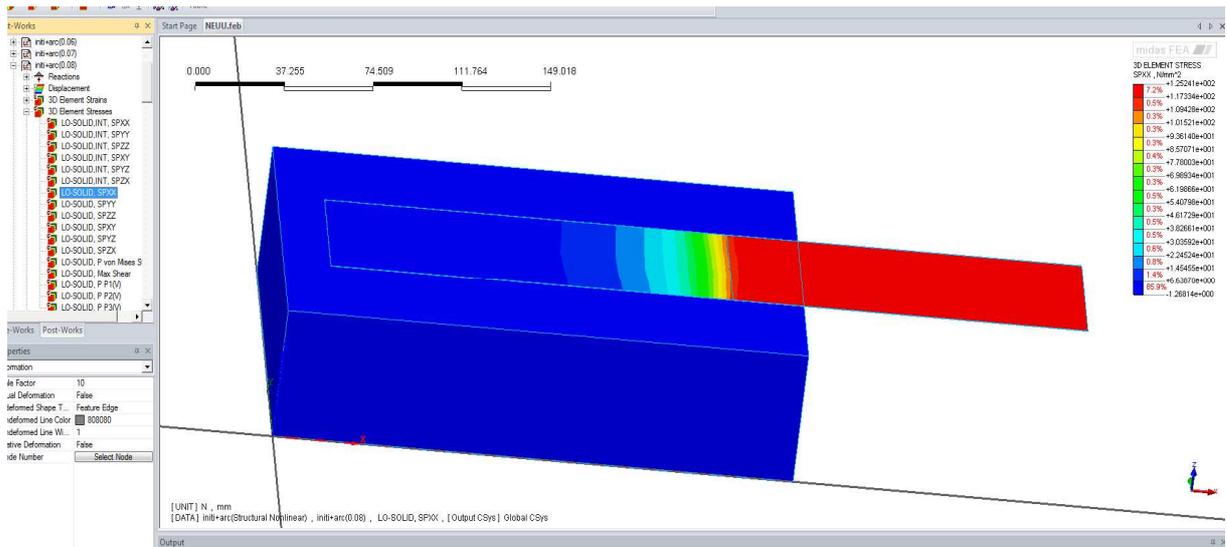


Figura 2.8.2- σ_{xx} lungo la lamina.

Come si può ben vedere dalla figura la tensione risulta essere costante fino all' inizio dell'interfaccia, proprio come ci si aspettava, per poi calare lungo la porzione incollata al mattone, in quanto lungo questo tratto è stato possibile trasferire sforzi da parte della lamina.

Dai differenti colori del mattone e della lamina è possibile inoltre notare come la tensione presente sul FRP risulti essere nettamente superiore rispetto quella presente nel mattone.

È possibile mostrare anche un grafico in cui si può vedere il decadimento della tensione lungo l'incollaggio:

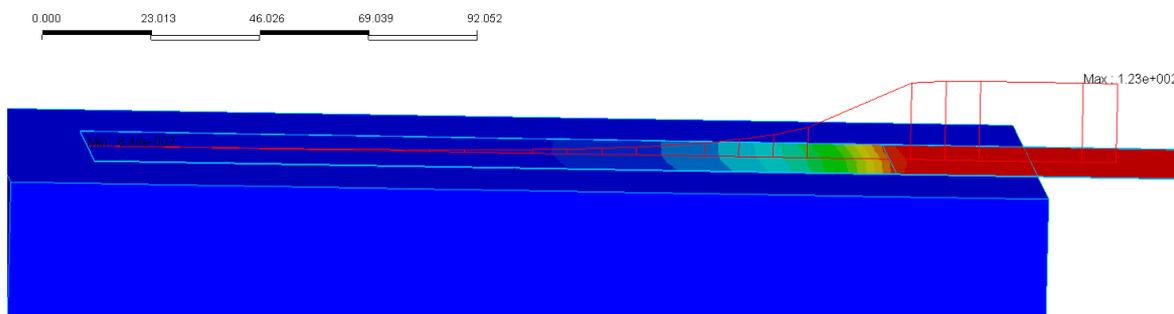


Figura 2.8.3- σ_{xx} lungo la lamina.

Selezionando la visualizzazione della sola mesh dell'interfaccia, è possibile inoltre sottolineare l'aspetto del trasferimento della tensione andando a diagrammare la tensione tangenziale lungo l'interfaccia, in modo da vedere quanto sforzo è possibile trasferire; come si vede in figura 2.8.4, il diagramma è il tipico diagramma decadente:

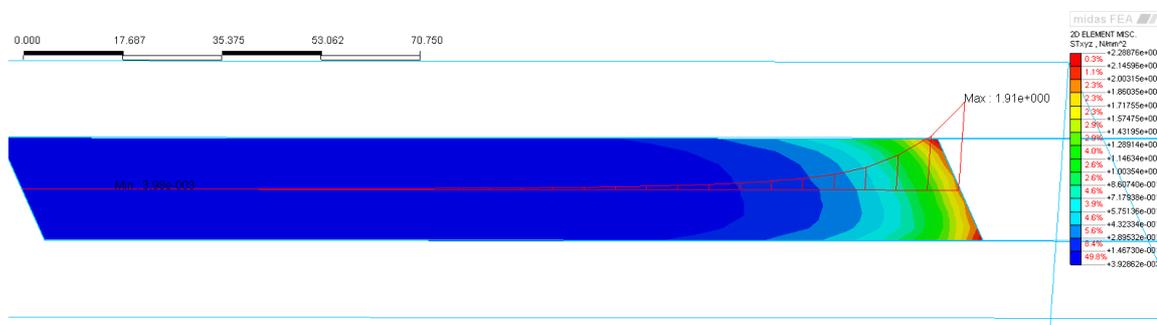


Figura 2.8.4 - Tensione tangenziale lungo l'interfaccia.

Quello che ci si aspetta è che giunti alla tensione di picco scelta nel legame bond-slip, l'interfaccia non sia più in grado di trasferire forza, in particolare ricordando il legame di interfaccia (figura 2.8.5), oltre i 4 MPa si dovrebbe arrivare al picco di forza nel diagramma forza-allungamento e quindi giungere sostanzialmente al carico massimo.

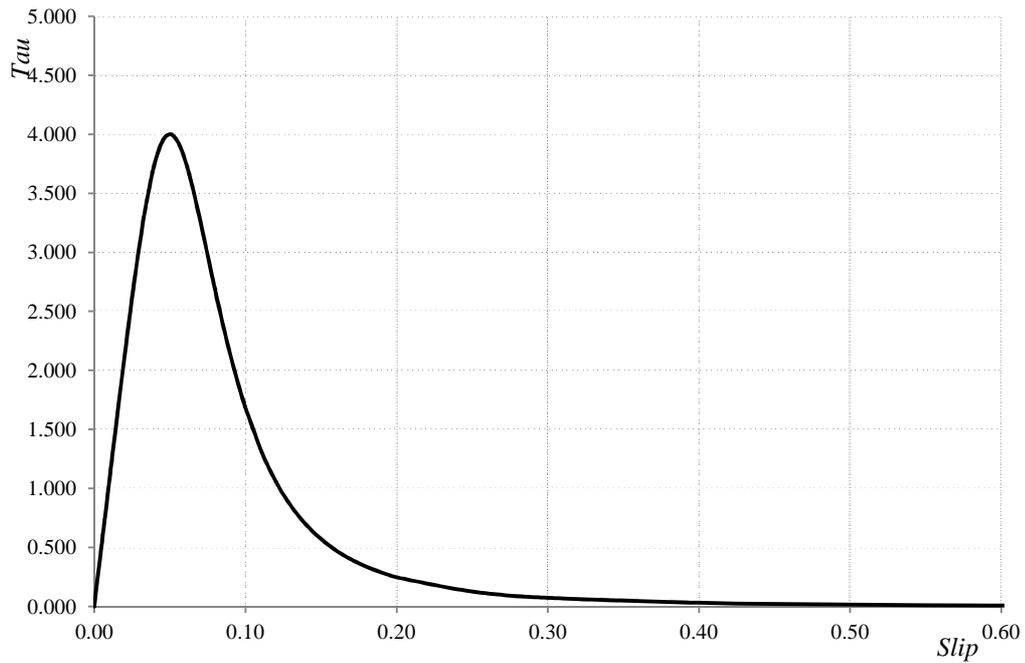


Figura 2.8.5- Legge bond- slip.

Uno dei primi aspetti affrontati per il confronto dei risultati con il modello sperimentale, è quello della valutazione del diagramma *Forza – Allungamento*, in cui per forza si intende la forza risultante dai 2 mm di carico che sono stati applicati lungo la faccia anteriore della lamina, mentre per allungamento si intende l’allungamento della lamina a partire dall’inizio dell’interfaccia, calcolabile come differenza di spostamento lungo x tra il punto A ed il punto B (figura 2.8.6).

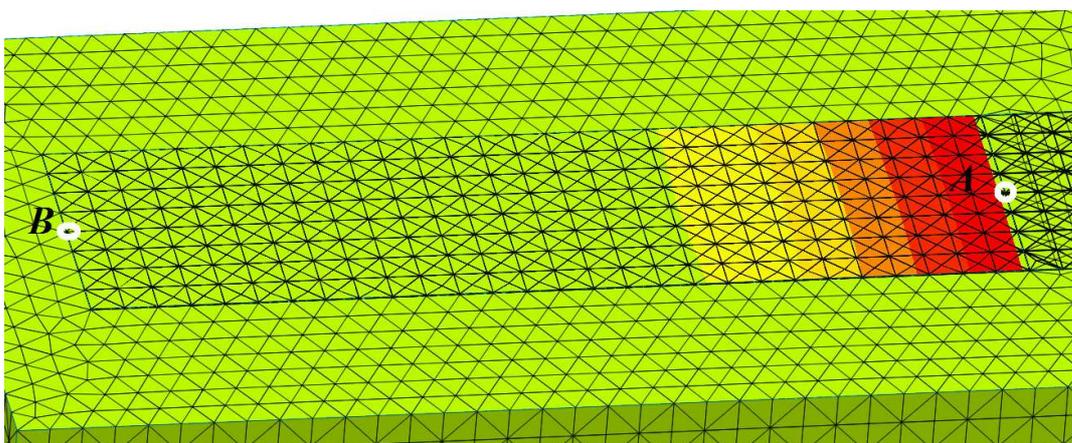


Figura 2.8.6- Allungamento.

Sono stati quindi estrapolati attraverso la funzione *Post* > *Extract Result* (figura 2.8.7) i valori della forza in corrispondenza della faccia anteriore della lamina, per ogni step di carico, quindi sostanzialmente è stata ricostruita la storia di carico del modello.

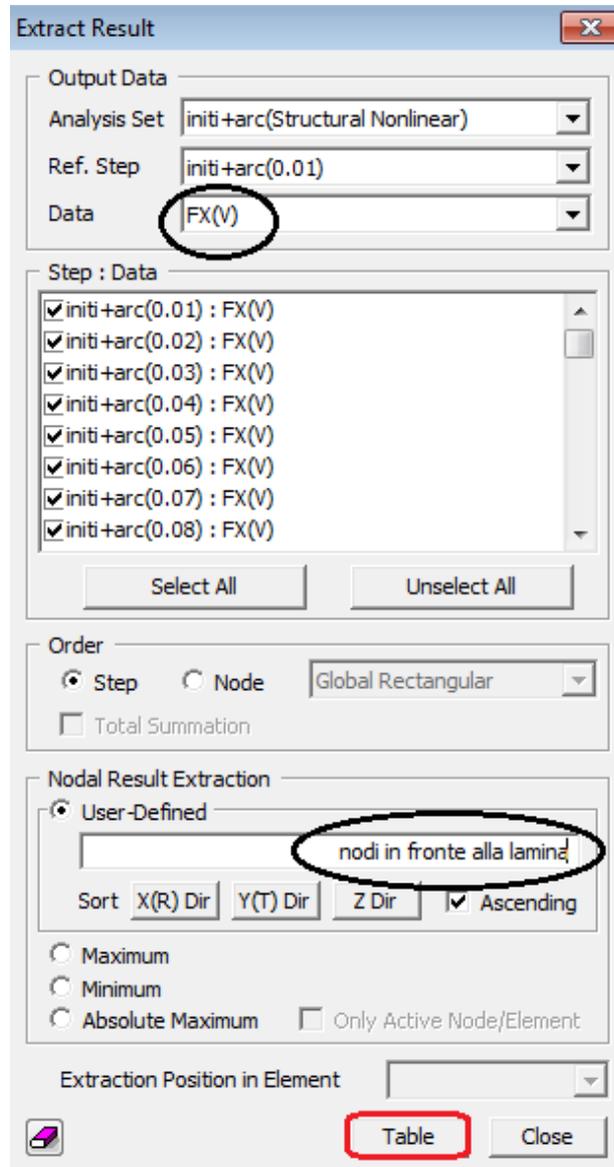


Figura 2.8.7- Extract Result.

Oltre al valore della forza in corrispondenza della lamina è stata valutata anche il valore della tensione sempre lungo sugli stessi punti, in modo tale da poter verificare la veridicità della soluzione utilizzando la semplice ed intuitiva formula:

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

Vengono riportati di seguito i risultati in una tabella così come sono presentati da Midas Fea.

No	Step	Step Value	Node:748	Node:749	Node:750	Node:751	Node:752	Node:753
1	infi+arc(0.01) : F	0.010000	3.020264	5.648071	5.530640	11.334229	5.511230	11.298098
2	infi+arc(0.02) : F	0.020000	5.942139	10.431152	10.086182	21.010498	10.067627	20.952397
3	infi+arc(0.03) : F	0.030000	8.894043	15.597168	15.081543	31.422852	15.058105	31.338861
4	infi+arc(0.04) : F	0.040000	11.850586	20.790527	20.105957	41.886719	20.075195	41.775871
5	infi+arc(0.05) : F	0.050000	14.809570	25.985352	25.129883	52.353516	25.091797	52.214844
6	infi+arc(0.06) : F	0.060000	17.768555	31.179688	30.155273	62.819336	30.110352	62.653321
7	infi+arc(0.07) : F	0.070000	20.728516	36.372070	35.174805	73.279297	35.123047	73.084967
8	infi+arc(0.08) : F	0.080000	23.688477	41.562500	40.194336	83.738281	40.134766	83.516601
9	infi+arc(0.09) : F	0.090000	26.646484	46.753906	45.214844	94.195313	45.146484	93.947261
10	infi+arc(0.1) : F	0.100000	29.607422	51.945313	50.234375	104.656250	50.162109	104.376951
11	infi+arc(0.11) : F	0.110000	32.564453	57.136719	55.257813	115.113281	55.175781	114.810541
12	infi+arc(0.12) : F	0.120000	35.521484	62.328125	60.277344	125.572266	60.187500	125.244141
13	infi+arc(0.13) : F	0.130000	38.476563	67.519531	65.300781	136.031250	65.205078	135.675781
14	infi+arc(0.14) : F	0.140000	41.433594	72.710938	70.322266	146.492188	70.218750	146.105461
15	infi+arc(0.15) : F	0.150000	44.390625	77.902344	75.343750	156.951172	75.230469	156.539061
16	infi+arc(0.16) : F	0.160000	47.345703	83.093750	80.367188	167.410156	80.244141	166.966791
17	infi+arc(0.17) : F	0.170000	50.296875	88.285156	85.386719	177.867188	85.261719	177.398431
18	infi+arc(0.18) : F	0.180000	53.257813	93.476563	90.402344	188.324219	90.269531	187.832031
19	infi+arc(0.19) : F	0.190000	56.214844	98.664063	95.421875	198.773438	95.285156	198.253901
20	infi+arc(0.2) : F	0.200000	59.167969	103.847656	100.437500	209.230469	100.289063	208.675781
21	infi+arc(0.21) : F	0.210000	62.128906	109.031250	105.449219	219.664063	105.296875	219.085931
22	infi+arc(0.22) : F	0.220000	65.089844	114.195313	110.445313	230.085938	110.285156	229.484371
23	infi+arc(0.23) : F	0.230000	68.050781	119.363281	115.441406	240.507813	115.277344	239.878901
24	infi+arc(0.24) : F	0.240000	71.003906	124.496094	120.394531	250.855469	120.228563	250.207031
25	infi+arc(0.25) : F	0.250000	73.964844	129.574219	125.273438	261.097656	125.109375	260.425781
26	infi+arc(0.26) : F	0.260000	76.925781	134.613281	130.113281	271.261719	129.937500	270.566401
27	infi+arc(0.27) : F	0.270000	79.882813	139.652344	134.953125	281.433594	134.769531	280.707031
28	infi+arc(0.28) : F	0.280000	82.839844	144.679688	139.781250	291.582031	139.601563	290.835931
29	infi+arc(0.29) : F	0.290000	85.796875	149.691406	144.593750	301.695313	144.402344	300.917961
30	infi+arc(0.3) : F	0.300000	88.734375	154.679688	149.378906	311.769531	149.187500	310.972851
31	infi+arc(0.31) : F	0.310000	91.636719	159.621094	154.125000	321.734375	153.925781	320.914061

Figura 2.8.8- Extract Result.

Come si può vedere dalla figura riportata sopra, i valori delle forze sono tabellati in colonne secondo i nodi a cui si riferiscono, ed in righe secondo lo step di carico corrispondente.

Uno schema riassuntivo dei dati necessari per la costruzione del diagramma Forza-Allungamento è riportato sotto, vengono riportati a titolo di esempio solamente i dati relativi ai primi 10 step di carico.

In particolare è doveroso dire come il valore della forza che viene riportato risulta ovviamente essere la somma di tutte le forze puntuali valutate all'estremità della lamina.

Tensione [N/mm ²]	Spostamento [mm]	Forza [N]
15.371	0.02	129.860
29.687	0.04	250.810
44.475	0.06	375.746
59.295	0.08	500.943
74.116	0.1	626.161
88.938	0.12	751.377
103.759	0.14	876.601
118.581	0.16	1.001.813
133.403	0.18	1.127.031
148.224	0.2	1.252.251

Tabella 2.8.1- Risultati analisi.

Ora che quindi abbiamo i valori della forza ad ogni step di carico, quello che manca è valutare ricavare sempre con la stessa procedura (*Post > Extract Result*) i valori dello spostamento lungo il punto A, ed il punto B (*figura 2.8.6*) e ricavare quindi l'allungamento corrispondente.

Inizio FRP	Fine FRP	Allungamento [mm]
0.002627	0.000201	0.002426
0.006464	0.000412	0.006052
0.009761	0.000633	0.009128
0.013021	0.000846	0.012175
0.016279	0.001058	0.015221
0.019536	0.00127	0.018266
0.022794	0.001483	0.021311
0.026051	0.001695	0.024356
0.029309	0.001907	0.027402
0.032566	0.002119	0.030447

Tabella 2.8.2- Risultati analisi.

Ora avendo a disposizione sia i valori della forza che i valori dell'allungamento ad ogni step di carico è possibile creare il grafico attraverso un semplice foglio Excel.

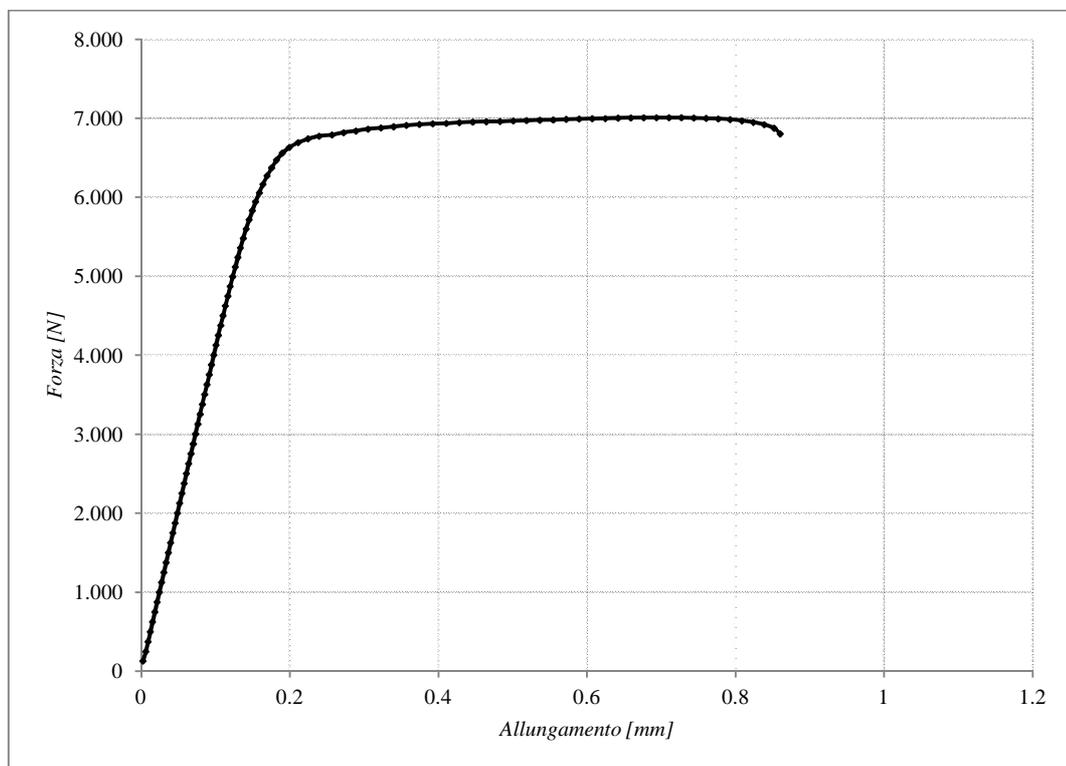


Figura 2.8.9- Diagramma Forza – Allungamento numerico.

Come detto all'inizio di questo paragrafo, l'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di confrontare i risultati ottenuti con il modello numerico e quelli ottenuti con il modello sperimentale, quindi ora il passo successivo è quello di riprendere lo stesso diagramma forza allungamento che è stato ricavato durante le analisi sperimentali.

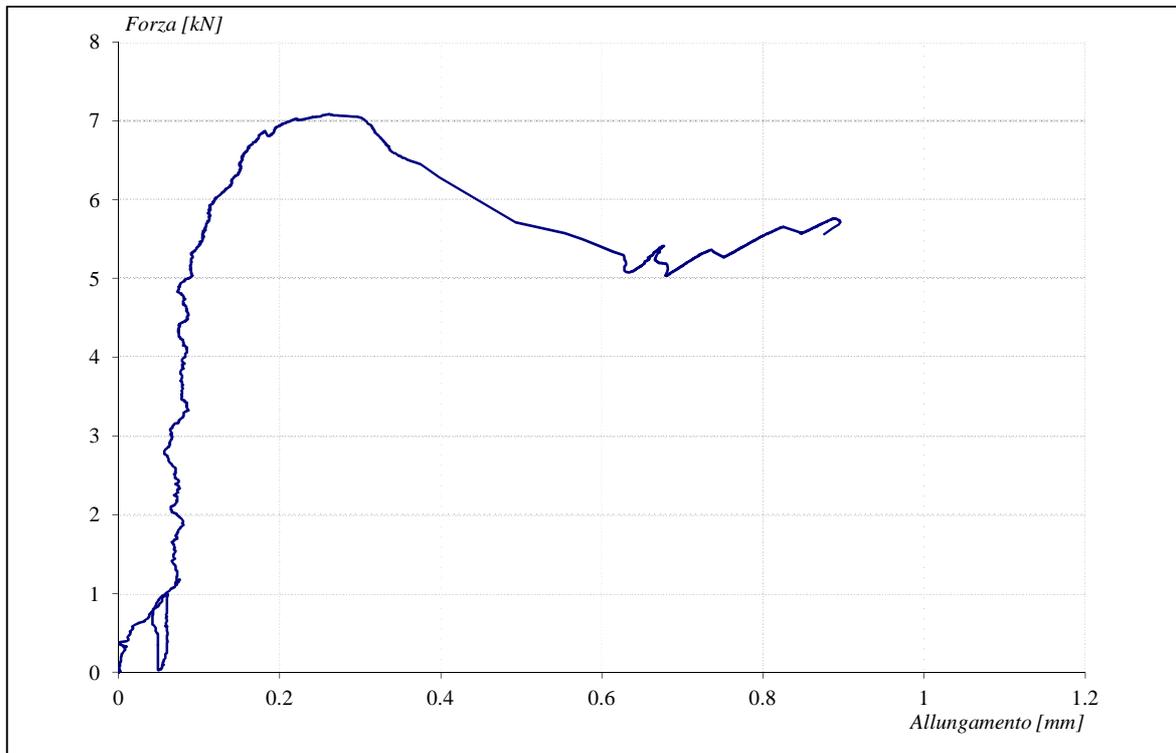


Figura 2.8.10- *Diagramma Forza – Allungamento sperimentale.*

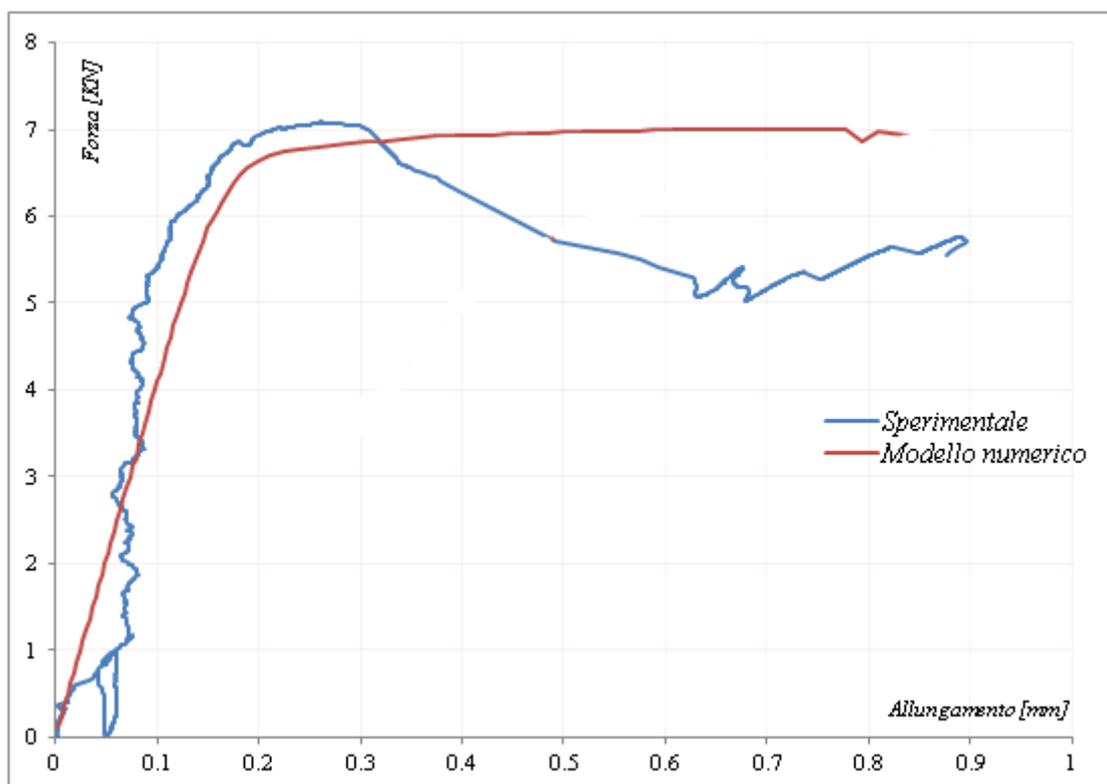


Figura 2.8.11- Diagramma Forza – Allungamento sperimentale.

La prima “differenza” sostanziale che si può scorgere mettendo a confronto i due diagrammi è che mentre nel modello numerico è possibile vedere un ampio ramo di uscita dal campo elastico e quindi un ampio ramo plastico, dal punto di vista sperimentale ovviamente ciò non risulta essere visibile, anche se prima di arrivare a rottura il provino continua ad allungarsi seppur con dei valori di forza notevolmente inferiori rispetto al picco registrato (ramo di softening).

Il valore massimo di forza sia per il modello numerico che per quello sperimentale si aggira sui 7010 [N], con un corrispondente allungamento di 0.2 mm.

Per migliorare la descrizione della prova svolta si riportano alcune immagini del campione sperimentale dopo il distacco del rinforzo, che è avvenuto, come per la maggior parte delle altre prove sperimentali eseguite in laboratorio sul resto dei provini (che non sono ambito di questa tesi), mediante asportazione di uno strato di superficiale di mattone (figura 2.8.12).

Questa modalità è assolutamente quella preferibile perché assicura che il rinforzo è stato applicato correttamente e permette di mobilitare al meglio la resistenza del materiale che è stato rinforzato.

Il distacco di una piccola porzione di mattone sulla parte anteriore indica che la distanza di 30mm adottata tra bordo del campione e inizio dell'incollaggio non è stata propriamente sufficiente.

Tuttavia va rilevato che, a causa dell'impiego di una lunghezza di ancoraggio molto elevata e pari a 200mm , le dimensioni del campione non hanno permesso di adottare una distanza maggiore.

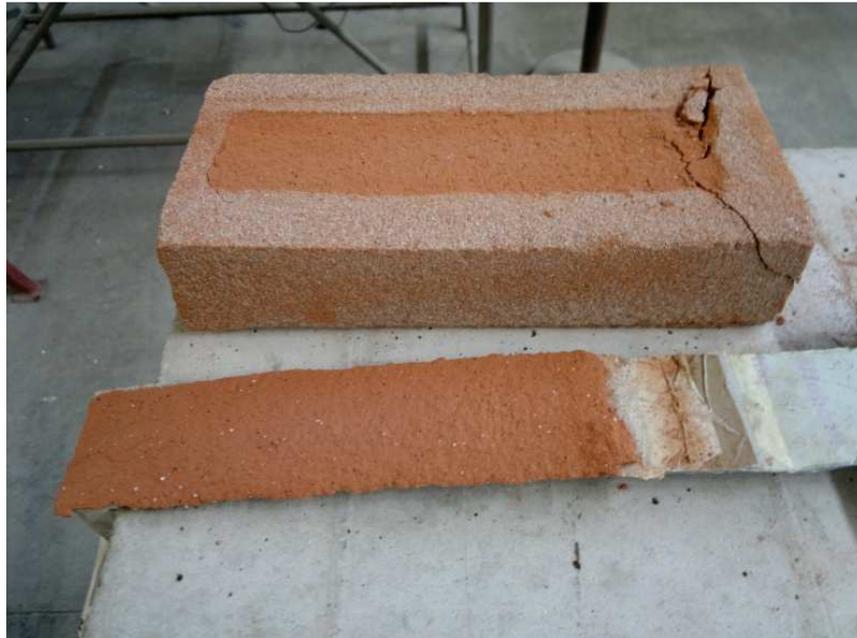


Figura 2.8.12- Particolare del distacco di una porzione di mattone (provino sperimentale).

A rafforzare la tesi sopra proposta che la rottura del campione sperimentale è avvenuta mediante asportazione di uno strato superficiale di mattone, sono state prese in considerazione le tensioni in direzione xx del mattone (*figura 2.8.13*).

In *figura 2.8.14* vengono inoltre riportate quelle che il codice di calcolo chiama vector, e che nell'ambito scientifico si chiamano le isostatiche, si può vedere quindi che in corrispondenza della porzione in cui c'è la lamina le isostatiche sono orientate nel verso delle z positive, e quindi ritorna ciò che accadeva a livello sperimentale, ovvero il formarsi di lamelle sulla superficie.

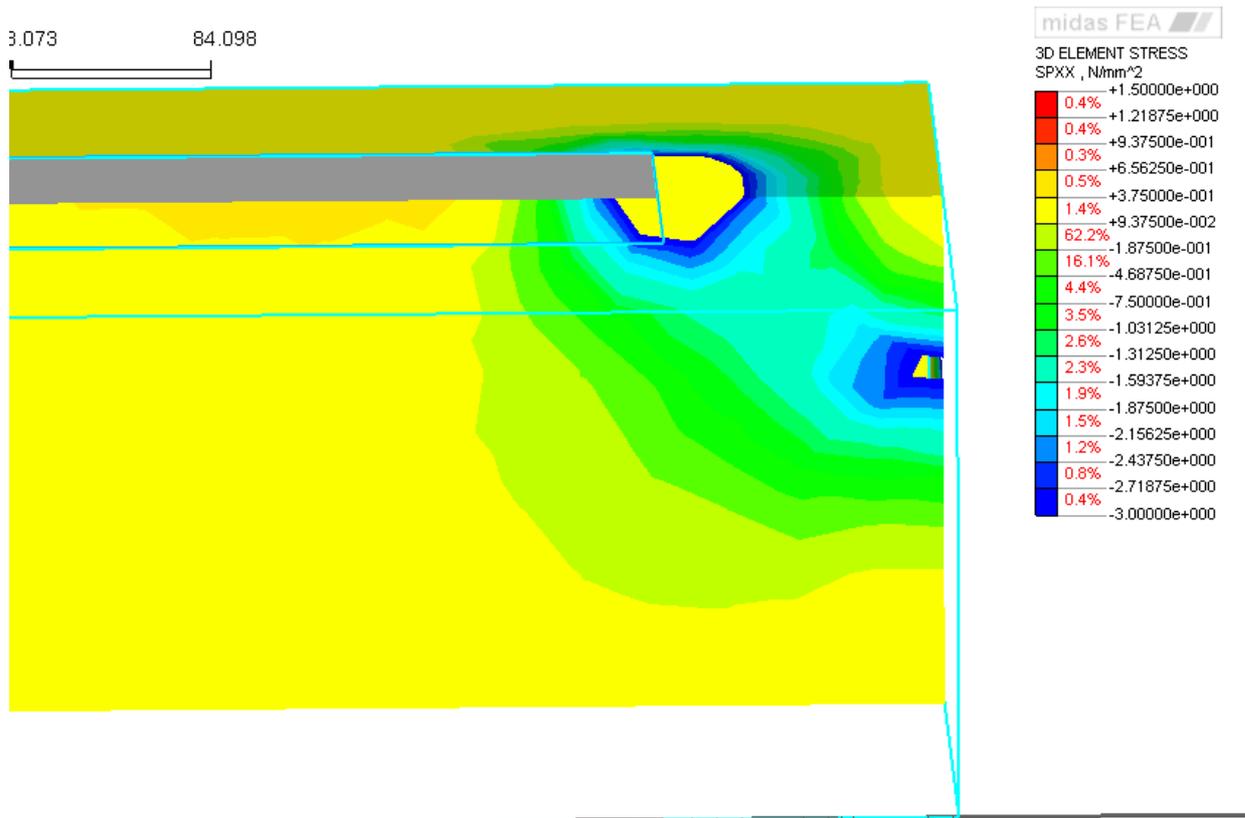


Figura 2.8.13- Particolare del distacco di una porzione di mattone(modello numerico).

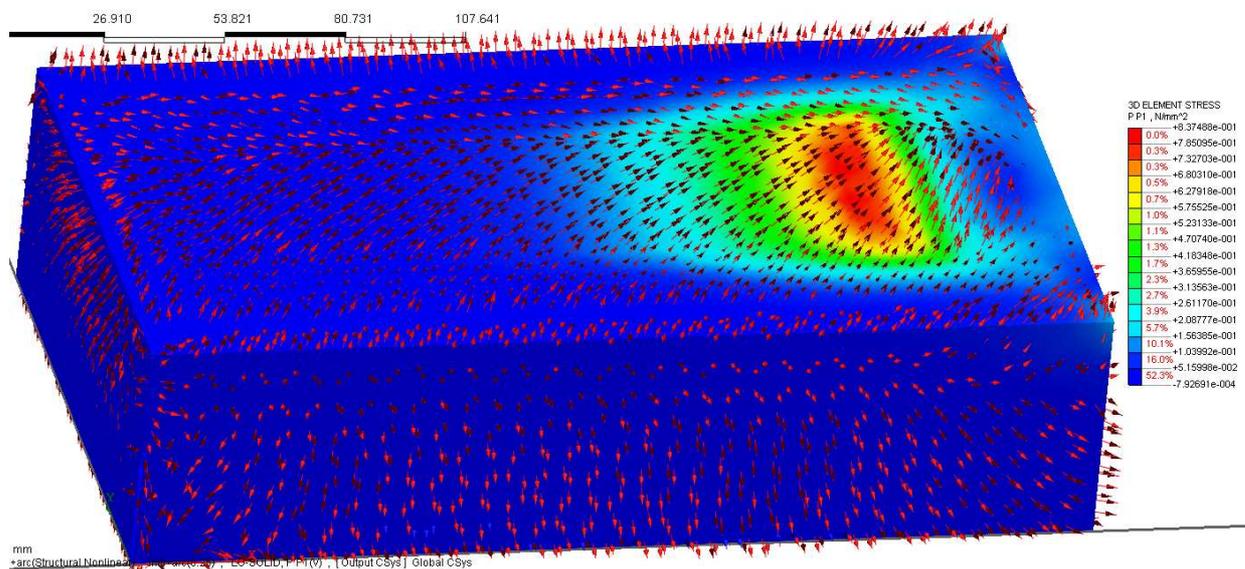


Figura 2.8.14- Particolare lamelle sul mattone.

Come si può vedere dalla *figura 2.8.13* e si può notare dalla legenda, c'è una porzione anteriore del mattone in cui c'è una zona di tensioni di compressione a differenza del resto del mattone che risulta essere teso, quindi è come se si formasse una biella compressa, cioè

quindi dimostra anche dal punto di vista numerico come sia molto casuale la rottura del campione per il distacco di questa porzione anteriore compressa.

Al crescere del carico, e quindi dal punto di vista numerico degli step, la zona compressa anteriore tende ad aumentare e a prendere porzione sempre più ampia di mattone.

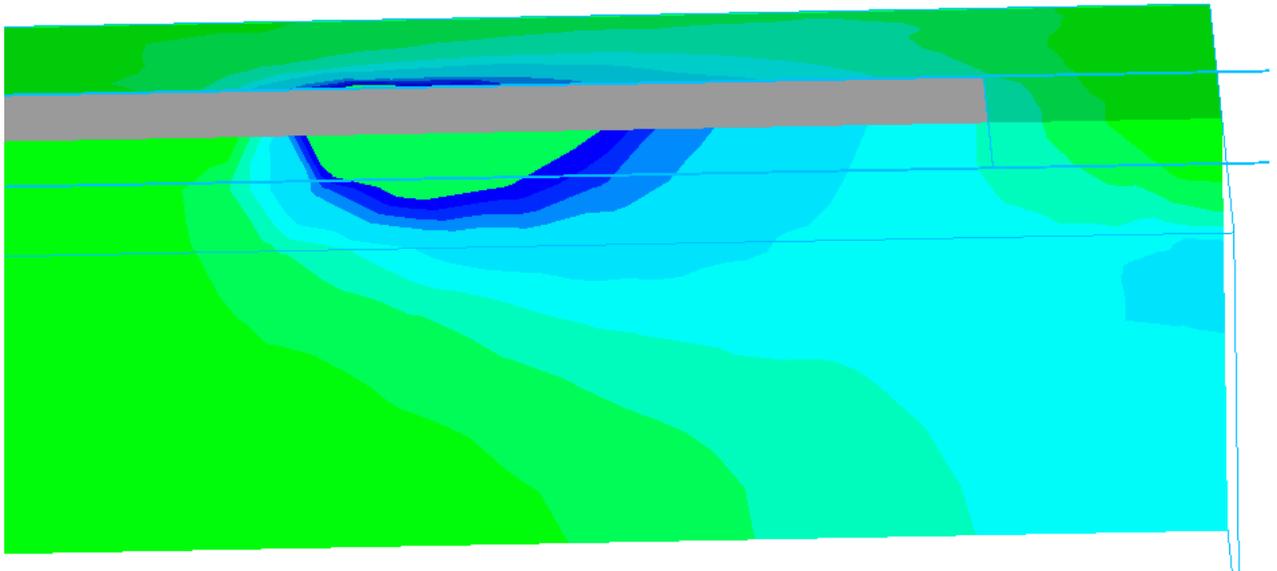


Figura 2.8.15- *Progressiva crescita della biella compressa.*

Altro aspetto di fondamentale importanza nella interpretazione dei risultati di questo modello è rappresentato dalla valutazione delle deformazione sulla lamina, e per questioni di equilibrio quindi anche della tensione tangenziale sull'interfaccia.

Parlando prima delle tensioni tangenziali sull'interfaccia, come mostrato già in precedenza in *figura 2.8.4*, l'andamento della tensione tangenziale segue le leggi previste dal punto di vista analitico, cosa che più che altro risulta avere un ruolo importante è il comportamento dell'interfaccia una volta raggiunta la tensione tangenziale di picco, che è stata posta pari a *4MPa*.

Questo particolare della zona anteriore compressa lo si nota ancora meglio andando a vedere quello che accade per le tensioni principali di compressione, che Midas Fea chiama *P P(3)V*, (*figura 2.8.16*).

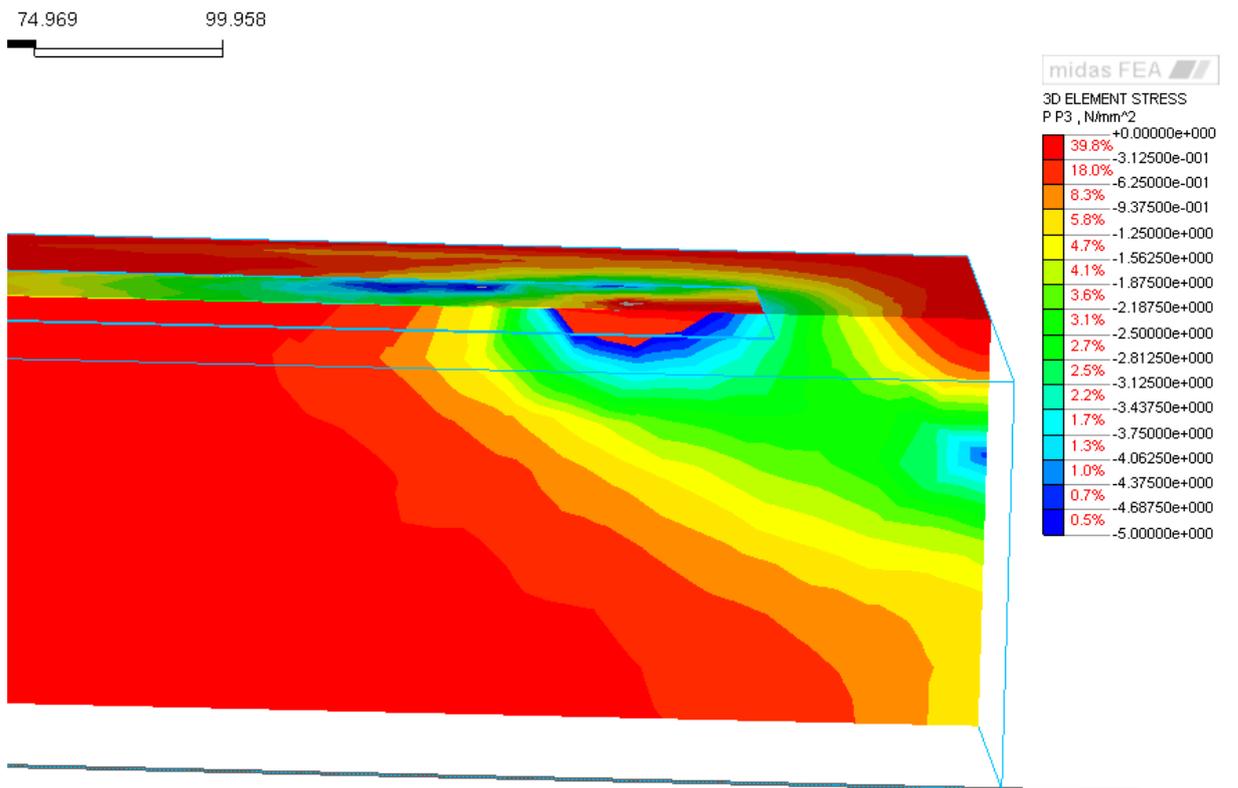


Figura 2.8.16- Tensioni principali di compressione.

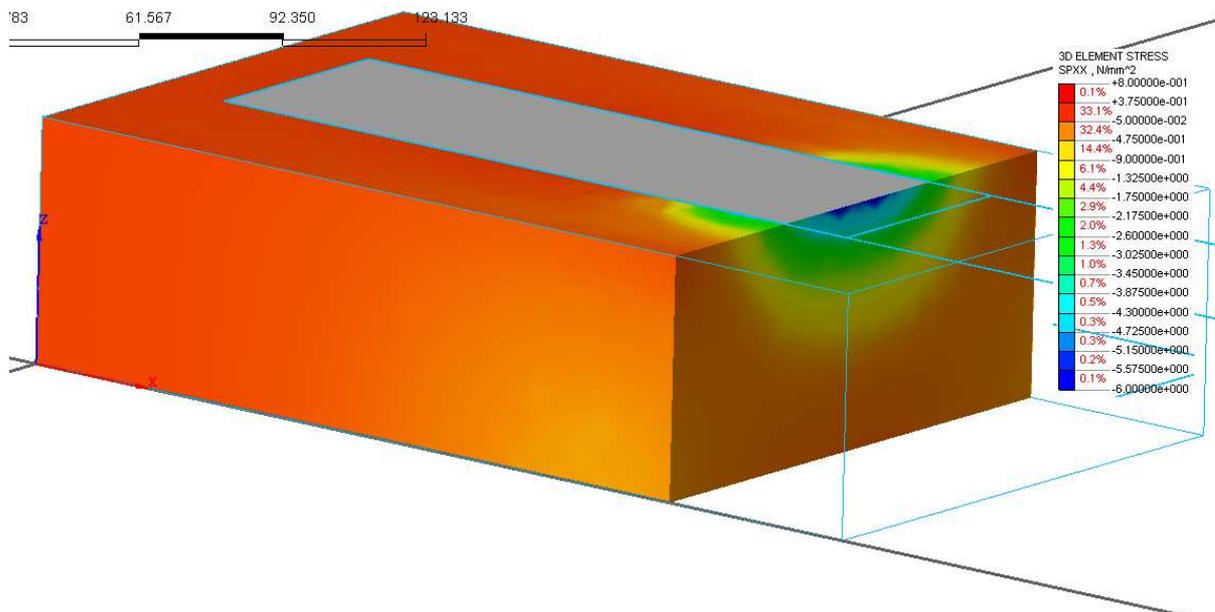


Figura 2.8.17- Tensioni SPXX.

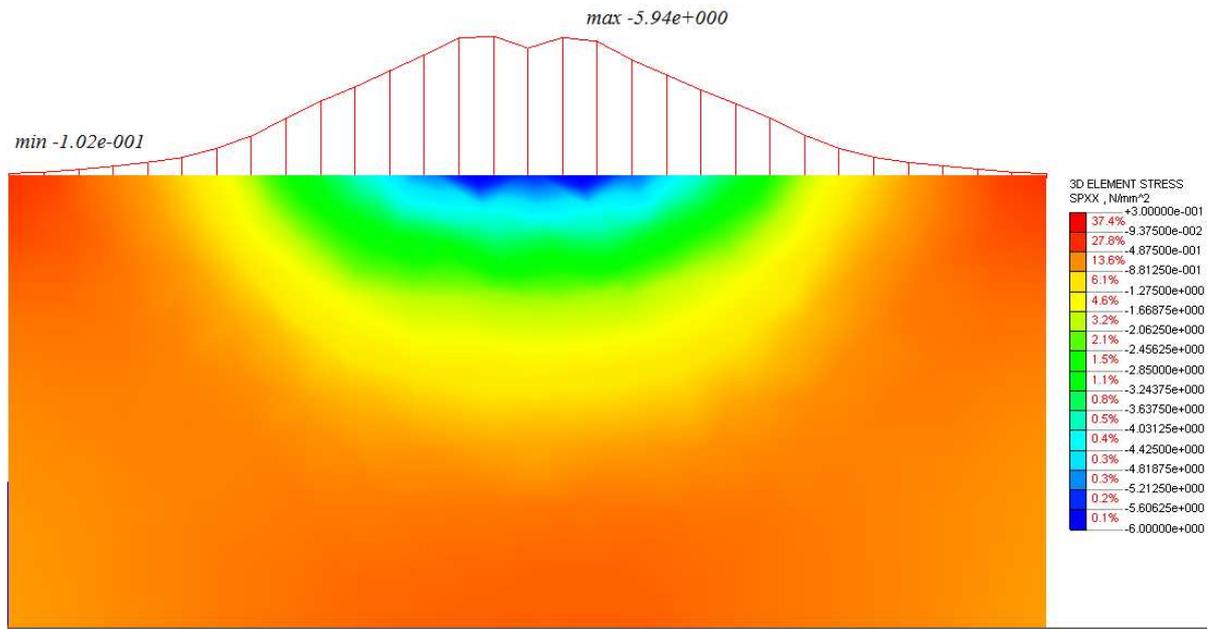


Figura 2.8.18- Tensioni SPXX.

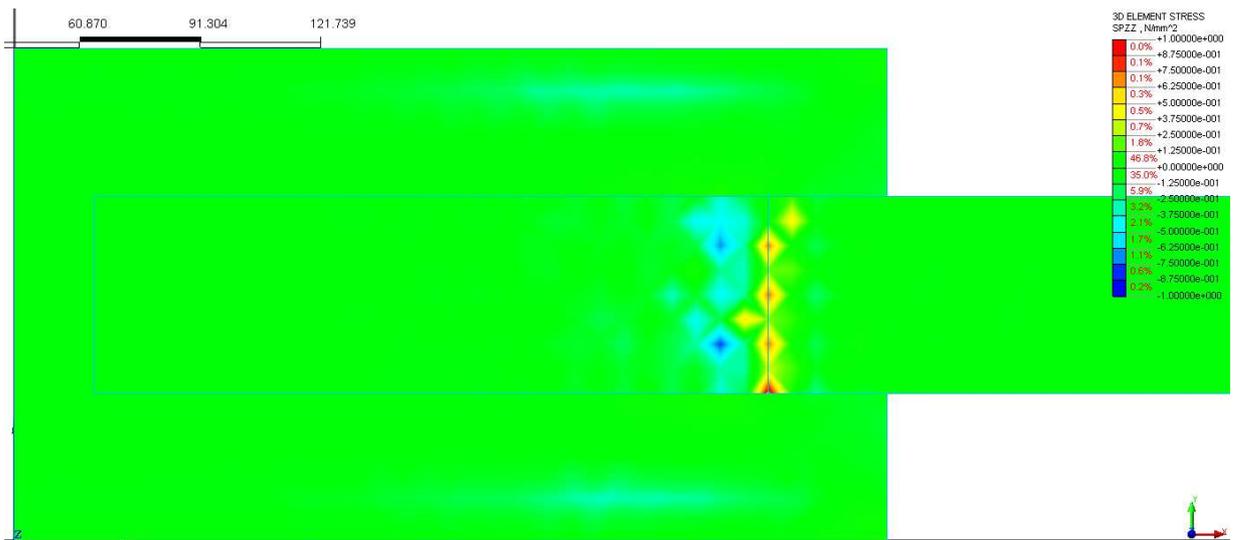


Figura 2.8.19- Tensioni di peeling SPZZ..

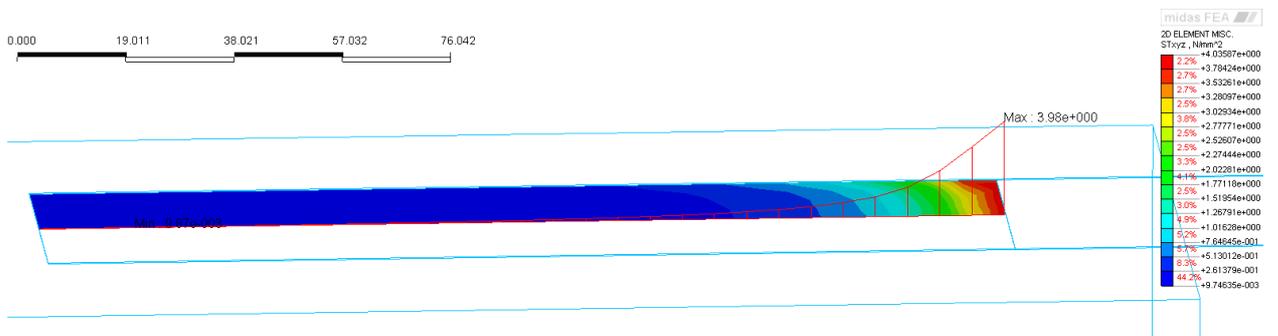


Figura 2.8.20- Tensione tangenziale lungo l'interfaccia.

La figura in alto mostra come è il diagramma delle tensioni tangenziali lungo l'interfaccia quando si è raggiunto il picco e quindi sostanzialmente quando si sono raggiunti i $4MPa$, in particolare questo valore viene raggiunto così come anche indicato dal grafico forza-allungamento in *figura 2.8.9*, ad un valore di allungamento pari a $0.2mm$.

Oltre questo valore inizia sostanzialmente la lamina non è più in grado di trasferire del carico, quindi come se si fosse distaccata, tuttavia nel resto della lunghezza la lamina risulta ancora essere attaccata e quindi è ancora possibile trasferire del carico, quindi dal punto di vista numerico quello che succede in prossimità del ramo plastico del diagramma forza-allungamento, dal punto di vista delle tensioni tangenziali è un retrocedere della tensione tangenziale di picco fino a che il provino non si rompe e quindi fino al punto indicato con X nella *figura 2.8.21*.

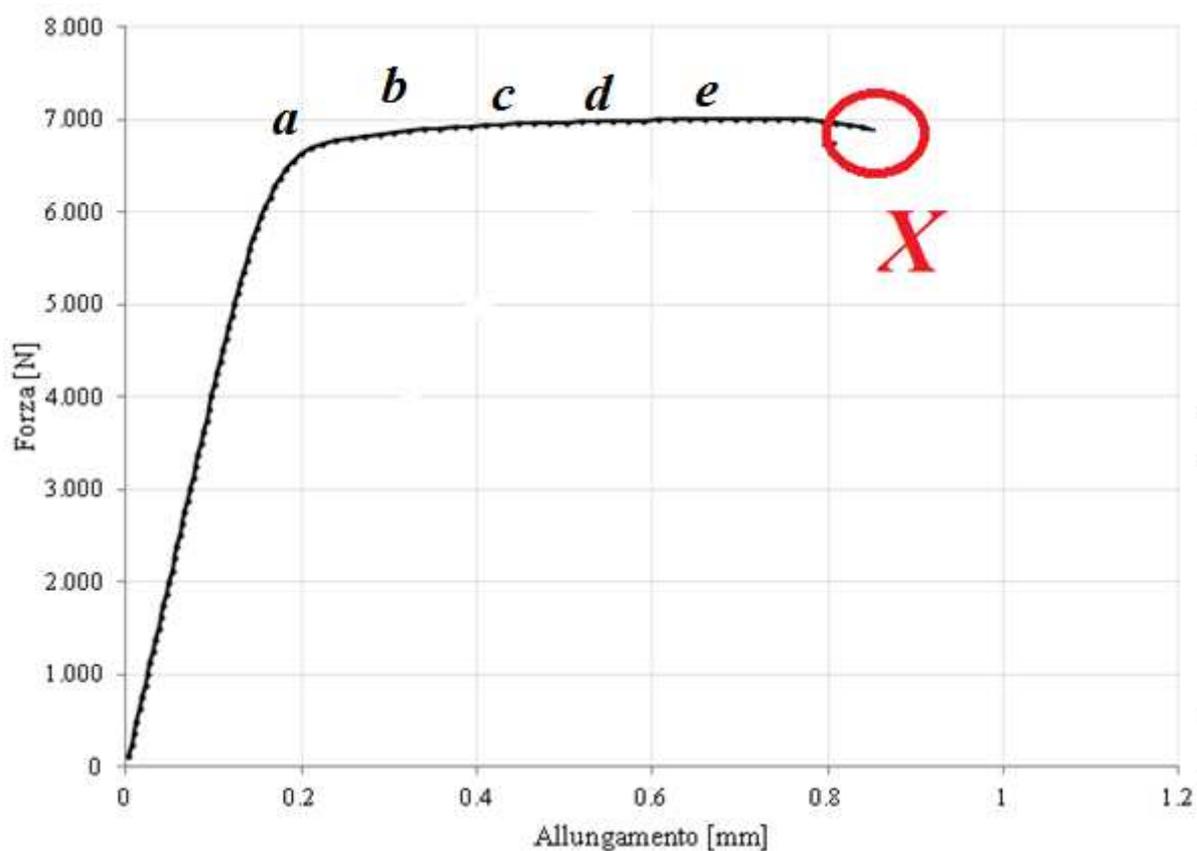


Figura 2.8.21- Punto di rottura del provino.

Di sotto viene riportata una figura riassuntiva di ciò che accade lungo il ramo plastico del diagramma forza-allungamento, dal punto di vista delle tensioni tangenziali.

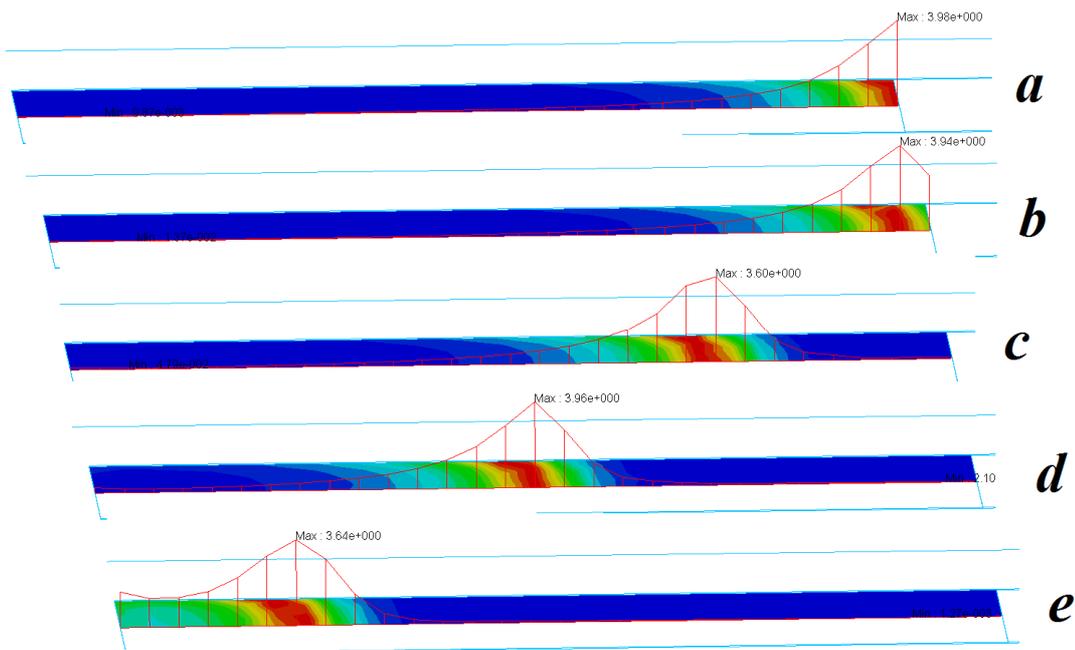


Figura 2.8.22- Progressivo delle tensioni tangenziali.

Ulteriore sottolineatura riguardo l'andamento delle tensioni tangenziali lungo l'interfaccia, riguarda il fatto che le tensioni non risultano essere costanti lungo la larghezza dell'interfaccia, ma variano, come è mostrato in figura 2.8.23 - 2.8.24.

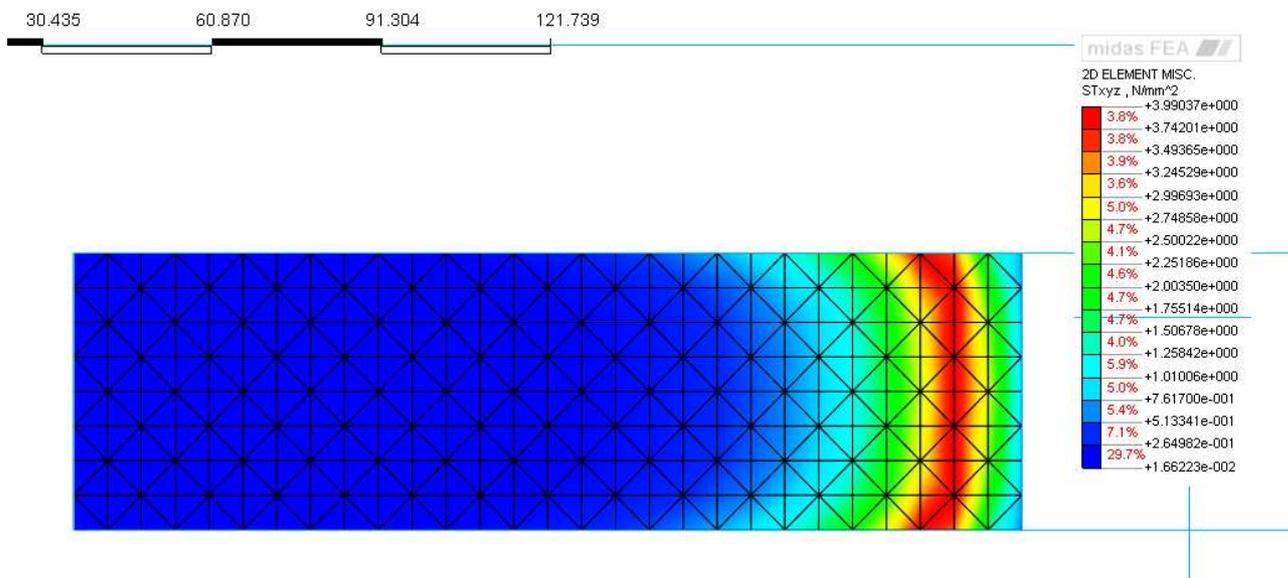


Figura 2.8.23- Tensioni tangenziali lungo l'interfaccia.

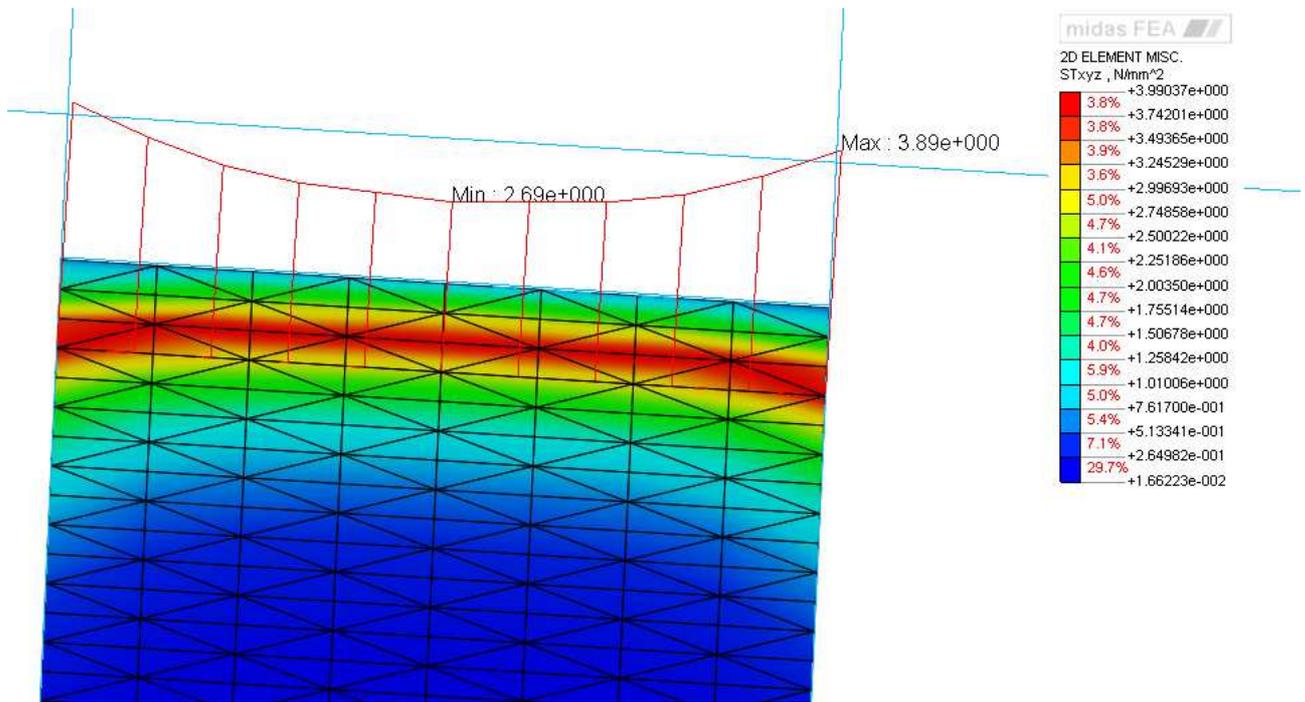


Figura 2.8.24- *Variazione tensioni tangenziali sulla larghezza dell'interfaccia.*

Altro aspetto sicuramente da andare a visionare dal punto di vista dei risultati ottenuti, è senz'altro il quadro delle deformazioni, che cmq sia ci si aspetta ricalchino a pieno l'andamento osservato dal punto di vista sperimentale, *figura 2.8.25.*

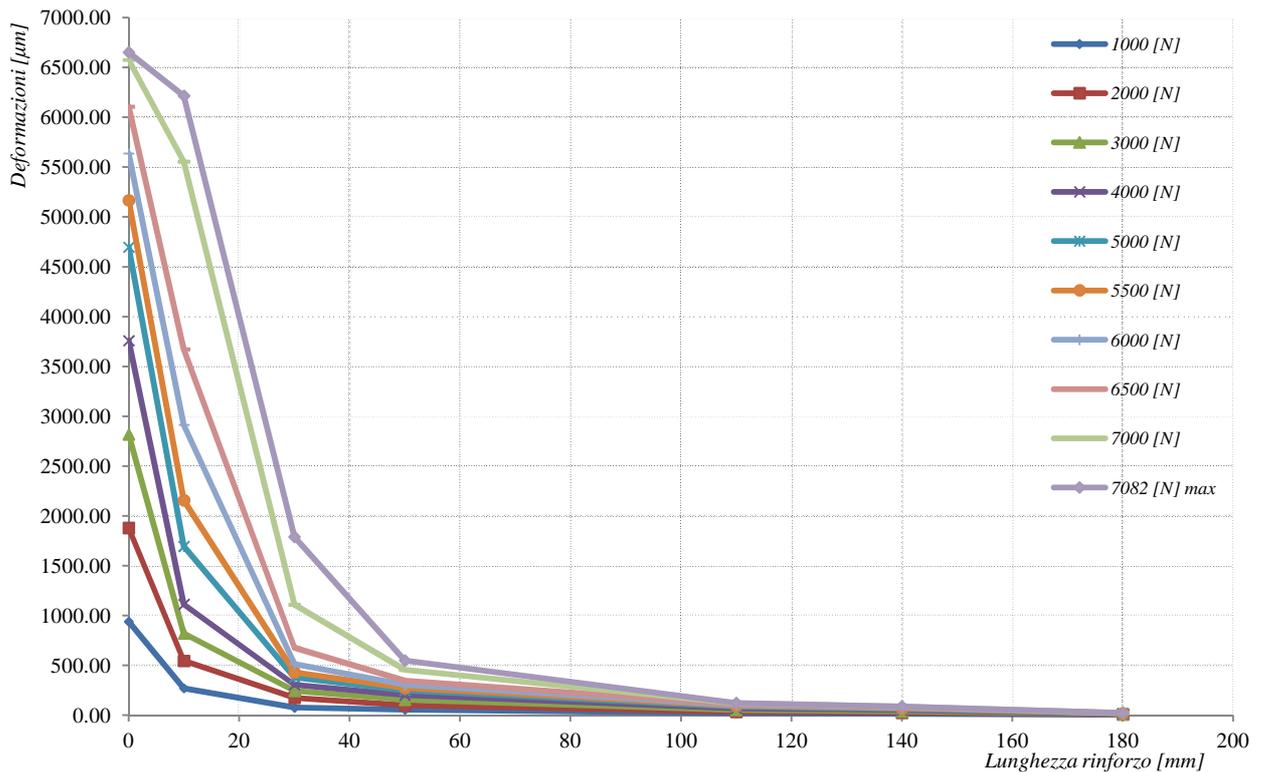


Figura 2.8.25- Deformazioni (sperimentale).

Per poter estrapolare i risultati delle deformazioni lungo la lamina, è stato utilizzato il comando *Probe Result* dal menù *Post*.

Questo comando ci permette di avere i risultati della quantità desiderata scegliendo il nodo da interrogare, e poi tenendo fissi i nodi scelti, si può modificare lo step a cui fare riferimento, quindi dal punto di vista delle deformazioni questo tasto risulta essere molto più semplice e molto meno oneroso, in quanto utilizzando *Extract Result*, come fatto in precedenza per le tensioni e per le forze, bisognava fare attenzione al punto in cui si interrogava il programma, in quanto con quella opzione era possibile avere i risultati su di un elemento finito in uno dei suoi vertici.

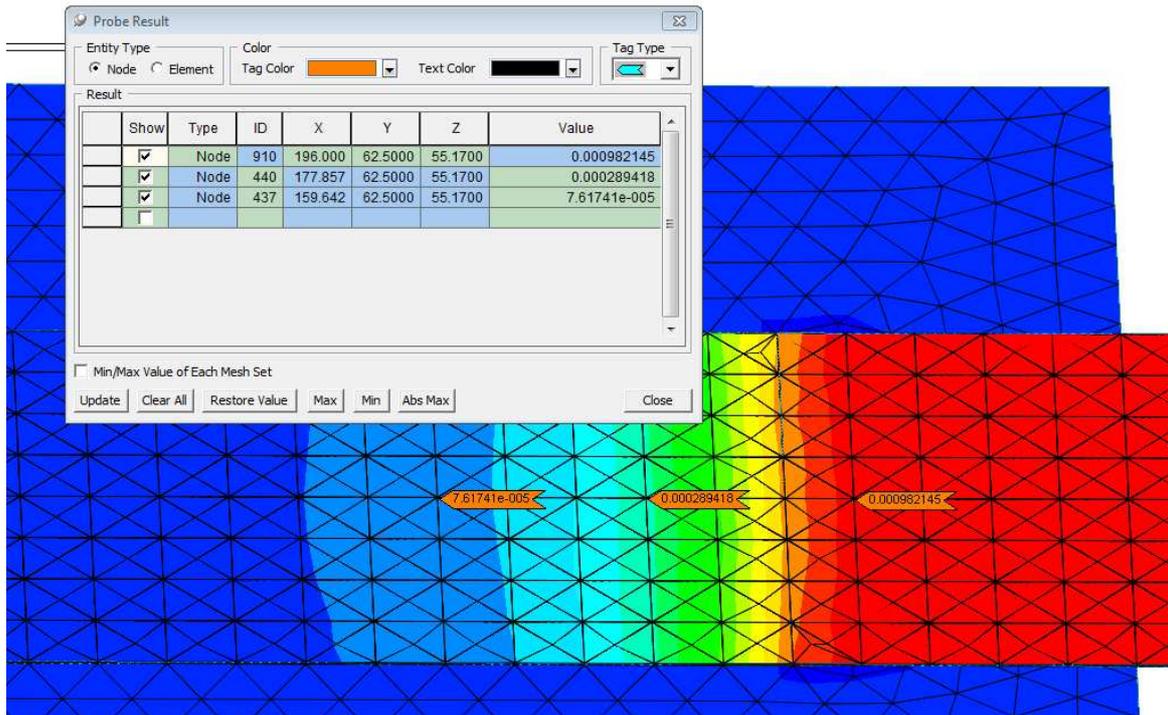


Figura 2.8.26 - Probe Result.

Viene riportata di seguito una tabella in cui sono riportati i valori delle deformazione in corrispondenza di determinati livelli di carico, associati ai nodi in cui nel modello sperimentale sono stati inseriti gli LVDT per il calcolo delle deformazioni.

Posizione [mm]	LIVELLO DI FORZA [N]									
	1.001	2003	3005	4005	4997	5601	6058	6560	7004	7.009
0	0.00092528	0.0018	0.00266	0.003582	0.004484	0.005	0.005459	0.00592	0.006277	0.00624776
12.84	0.000289418	0.0005788	0.000868	0.001157	0.00176	0.002254	0.0032	0.00387	0.006232	0.006233
32.1	7.61741E-05	0.0001523	0.0002285	0.000304	0.00038	0.000436	0.00053	0.000695	0.006197	0.006198
51.36	0.00002539	0.0000507	0.00007618	0.0001015	0.0001269	0.000139	0.0001555	0.00016	0.006168	0.00619
109.14	0.000001327	0.0000265	0.00003981	0.000053	0.000066	0.0000071	0.000081	0.0000879	0.002459	0.003979
134.82	0.00000154	0.00000309	0.0000046	0.0000061	0.000007	0.0000085	0.0000094	0.00001025	0.0008211	0.00122215
180	0.000001	0.0000018	0.0000027	0.0000002	0.0000002	0.0000002	0.0000003	3.2E-09	0.000061	0.0000885

Tabella 2.8.3- Deformazioni.

A partire da questo diagramma, con un foglio Excel è stato creato come in figura 2.8.25, il grafico delle deformazioni al variare del livello di carico (figura 2.8.28).

Bisogna sottolineare come a differenza del grafico delle deformazioni sperimentali, in questo caso sono stati aggiunti altri livelli di carico, in modo da mostrare quello che succede quando si è raggiunta la tensione tangenziale di picco.

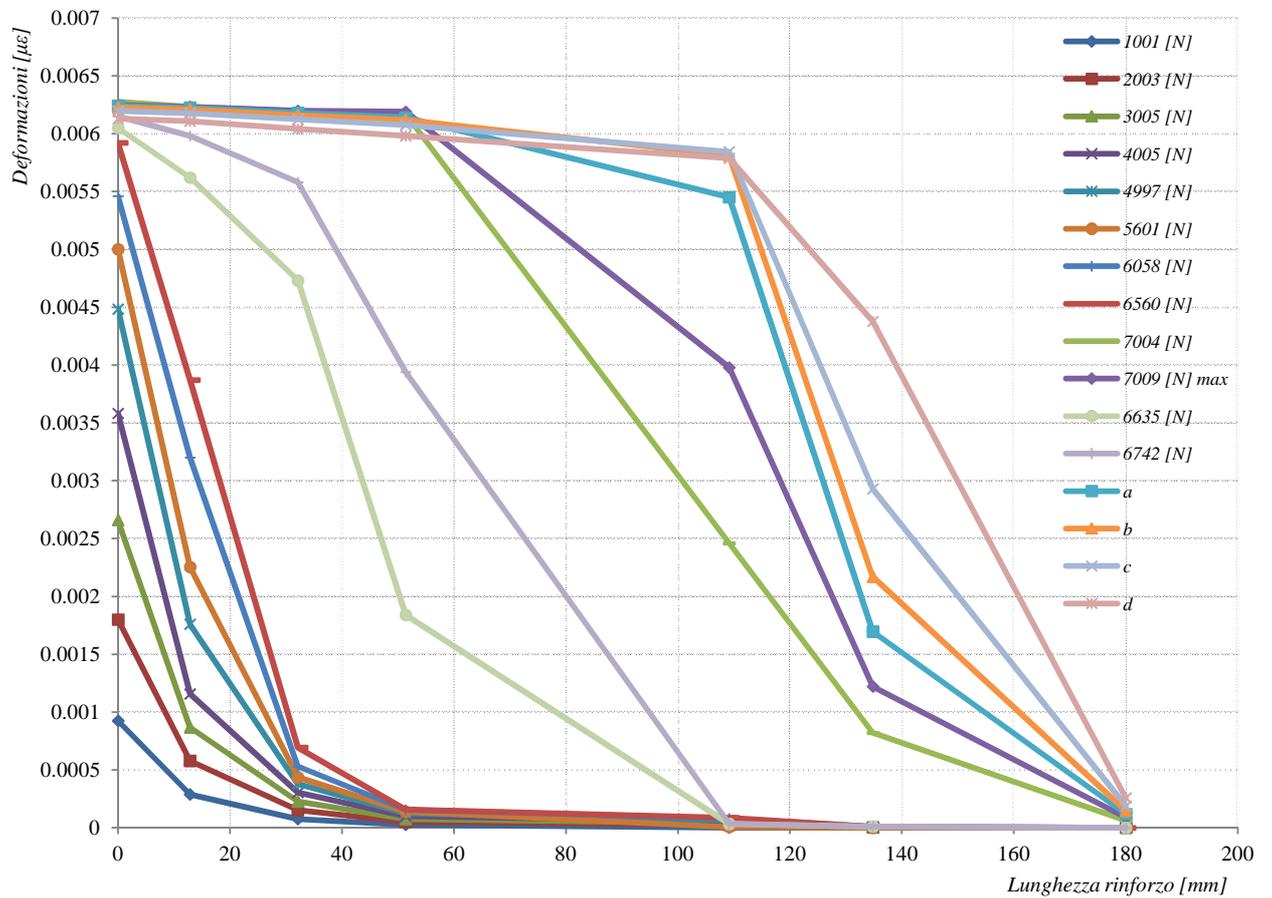


Figura 2.8.27- Deformazioni modello numerico.

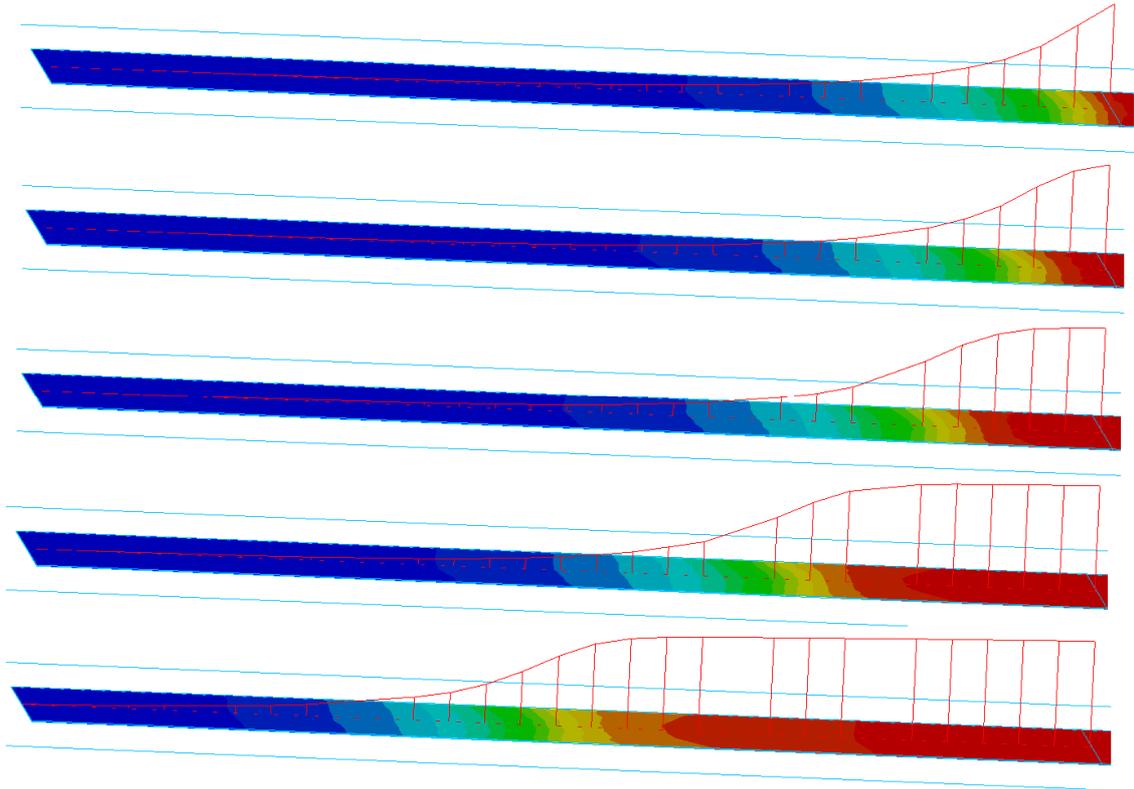


Figura 2.8.28- Deformazioni modello numerico.

Come si può notare dalla *figura 2.8.27*, la deformazione sulla lamina cresce sino a quando non si raggiunge la tensione di picco nell'interfaccia, oltre quel valore si può ben vedere il ramo plastico.

È stato quindi possibile effettuare un confronto di andamento delle deformazioni sulla lamina, tra i risultati sperimentali e quelli derivanti dal modello numerico; viene riportata di seguito la *figura 2.8.27*, nella quale per maggiore chiarezza di confronto, vengono riportati soltanto alcuni livelli di carico, e non tutti quelli considerati nelle *figure 2.8.25* e *2.8.27*.

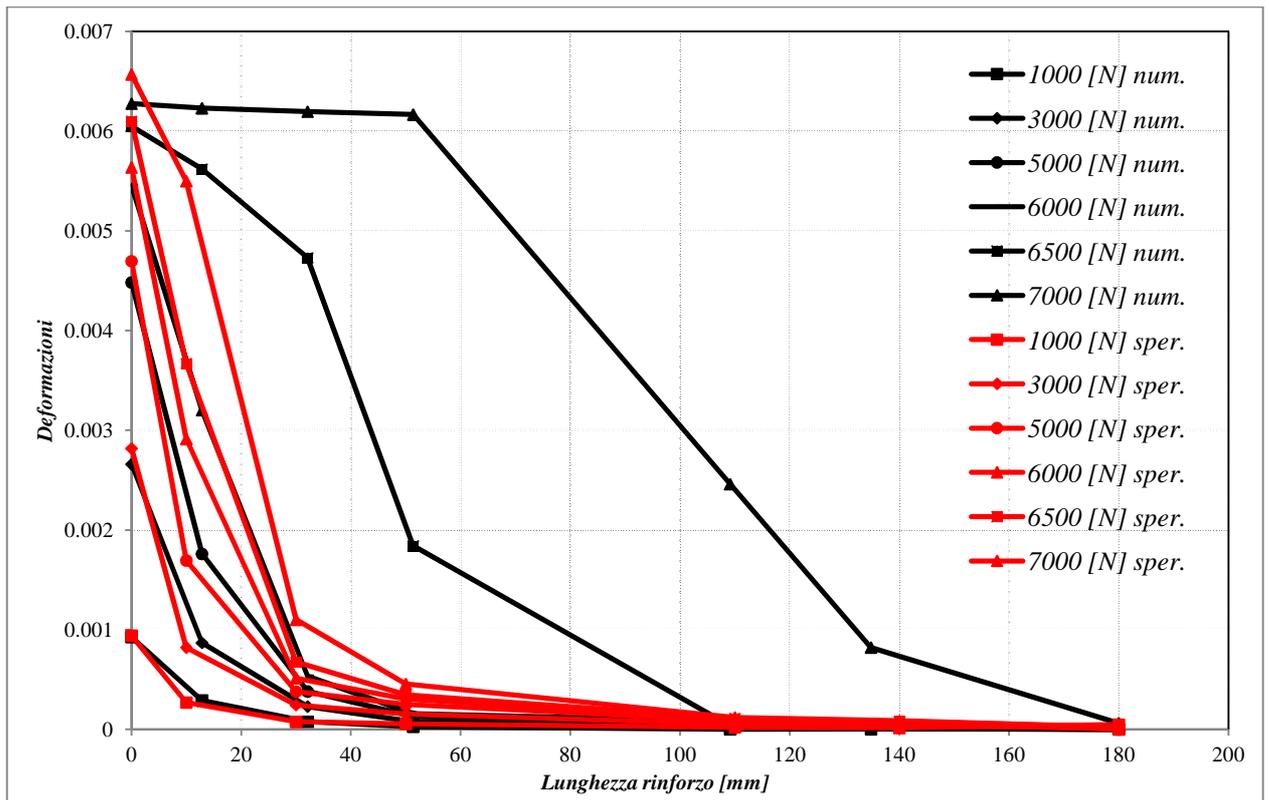


Figura 2.8.28- Confronto deformazioni sperimentali e numeriche

Come si può vedere sia dai grafici singoli delle deformazioni per il modello sperimentale e numerico, sia dal grafico del confronto, c'è una tendenza di riduzione notevole della deformazione intorno ai 30mm e successivamente anche sui 50mm, per arrivare praticamente ad annullarsi in prossimità di 100mm dall'inizio del rinforzo.

Una volta aver avuto la certezza che il modello funzionasse correttamente, dal punto di vista numerico, il passo successivo è stato quello di calibrare la legge di interfaccia, infatti come detto già precedentemente, la legge bond-slip inserita inizialmente per l'interfaccia era una legge lineare, costituita da soli tre punti, solo in questo momento è stato possibile inserire la vera e propria legge, scritta al *paragrafo 2.5*.

Quindi quello che si è fatto è, lasciando invariate il resto delle proprietà dei materiali, andare a valutare i giusti parametri da inserire nella formula che viene riproposta sotto:

$$\tau(s_p) = \tau_{\max} \cdot \frac{s_p}{s} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s_p}{s}\right)^n}$$

in cui:

τ_{\max} rappresenta il valore massimo della tensione di interfaccia

\bar{s} indica il valore di scorrimento corrispondente alla tensione tangenziale τ_{\max}

n è un parametro che definisce il ramo di softening.

Al variare di τ_{\max} , \bar{s} , ed n , si sono valutati i diversi comportamenti della legge, ed il diverso comportamento del modello, fino a giungere dopo numerosi tentativi al giusto settaggio della stessa.

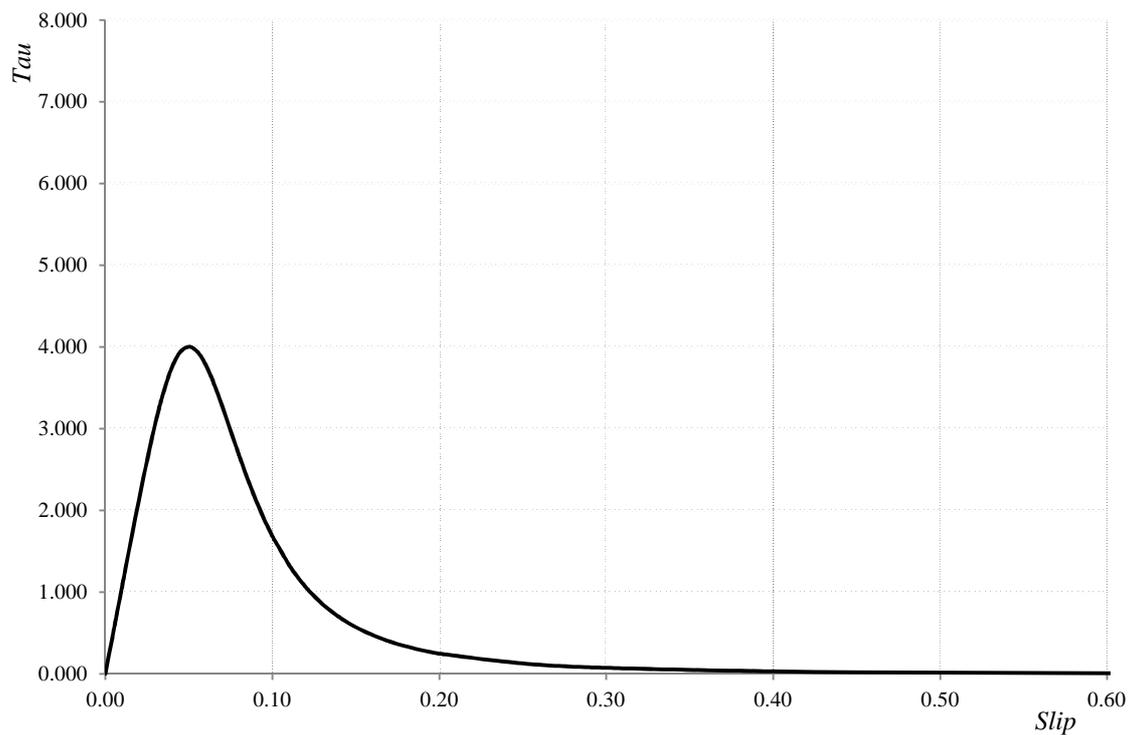


Figura 2.8.26- Legge interfaccia (modello numerico).

Viene riportata inoltre la curva bond-slip calibrata sperimentalmente (figura 2.8.29).

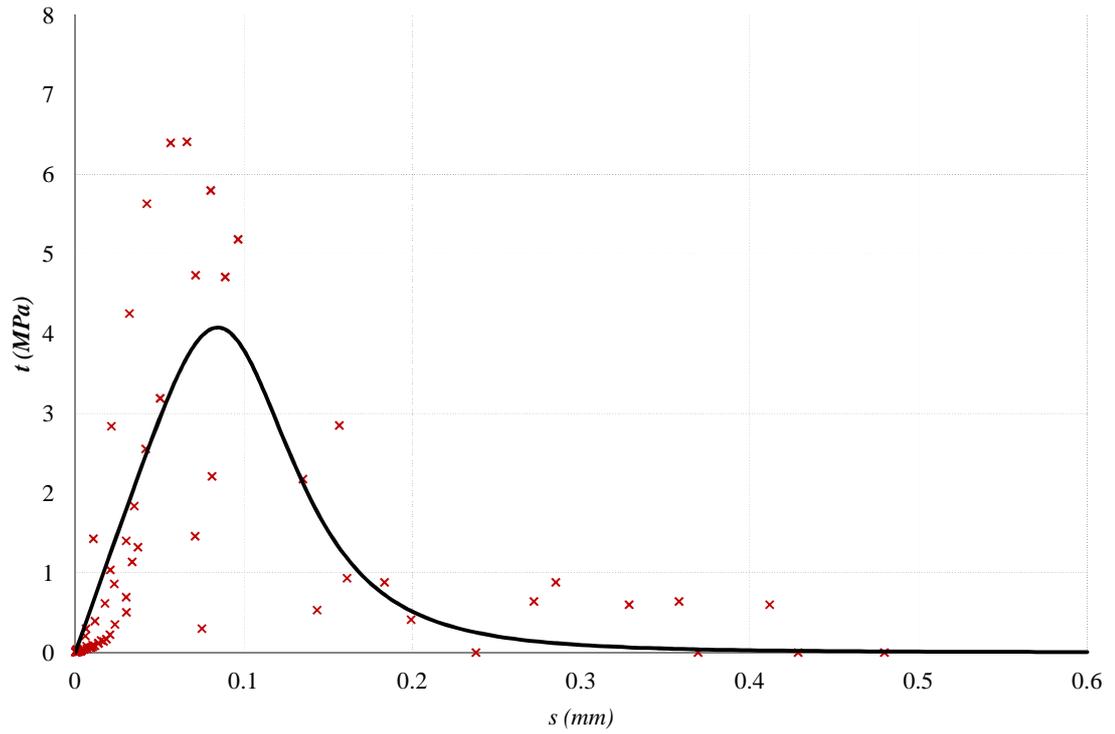


Figura 2.8.29- Legge interfaccia (sperimentale).

È possibile quindi vedere come la curva del modello numerico risulti essere molto aderente a quella calibrata nel modello sperimentale (figura 2.8.30).

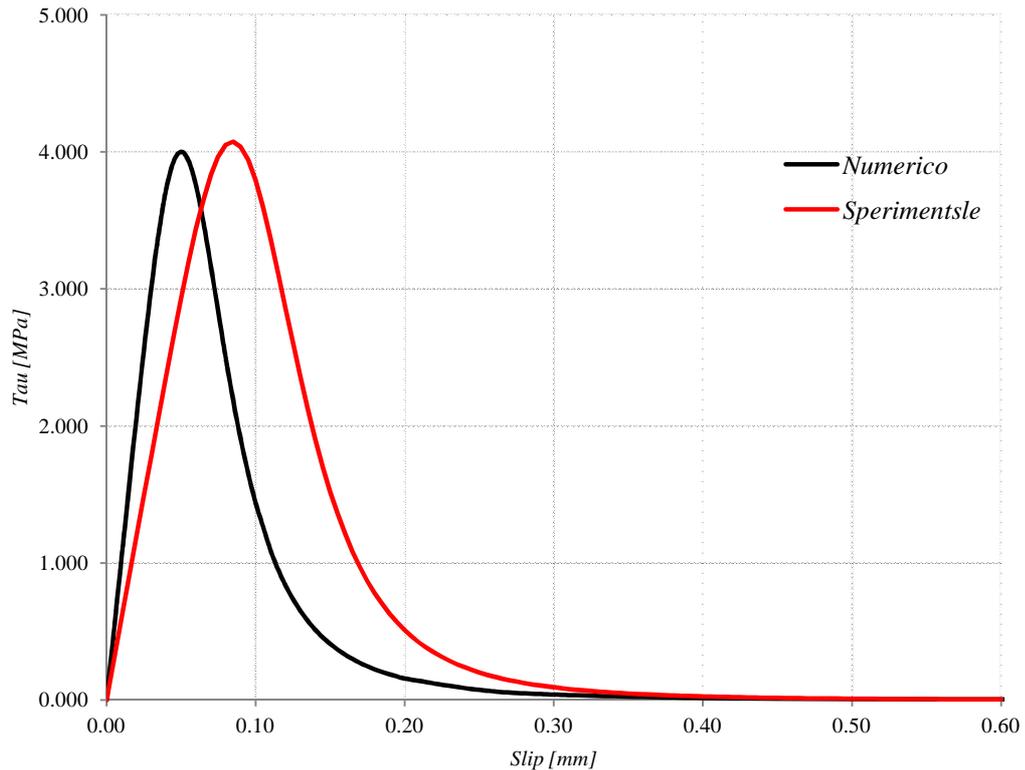


Figura 2.8.30- Legge interfaccia (confronto numerico-sperimentale).

Come si vede dalla figura sopra, le due leggi di interfaccia, sono molto simili, nel complesso, tranne che per lo slip corrispondente alla tau di picco, che nel caso del modello numerico risulta essere 0.05 mm mentre nel modello sperimentale 0.085 mm .

Come conseguenza di ciò la legge di interfaccia numerica, e quindi il legame di interfaccia mattone lamina risulta essere leggermente più rigido, tuttavia come si è visto in precedenza nei due grafici forza – allungamento, la forza di picco raggiunta dal complesso mattone FRP, risulta essere praticamente la stessa, cosa che comporta quindi avere uguale area sottesa da queste due curve ovvero uguale *Energia di Frattura*.

3 MODELLO B : MURETTO - FRP

In questo capitolo verrà illustrato il secondo modello che è stato sviluppato, ovvero quello mattone/malta-FRP, in cui a livello numerico si ha un aumento dei gradi di libertà.

In una prima parte si è soffermati sulla creazione della geometria del modello, successivamente si è passati alla discretizzazione e quindi applicazione del vincolamento e dei carichi applicati ed infine si è effettuata l'analisi non lineare del modello ponendo particolare attenzione a risultati quali forza ricavate a seguito dello spostamento impresso, deformazioni della fibra e tensioni tangenziali lungo l'interfaccia mattone FRP.

Un aspetto che ha riguardato parte del tempo dell'analisi di questo modello di calcolo è stato quello del giusto inserimento oltre che dei parametri meccanici dei diversi materiali, e quindi anche dei legami costitutivi, il problema dell'interfaccia mattone malta, che risulta essere assai più complesso di ciò che si poteva immaginare, in quanto anche a livello sperimentale non era stata molto chiara l'interpretazione dei risultati.

3.1 *Proprietà dei materiali*

Il punto di partenza del nostro modello è stato quello di riprendere in riferimento le geometrie, le caratteristiche dei materiali ed i risultati delle prove effettuate presso il laboratorio Lisg in via Terracini da Alessandro Bellini, per poter effettuare un confronto tra i risultati sperimentali ed il modello numerico.

Viene mostrato di seguito un riassunto della prova e dei risultati ottenuti, in modo tale da rendere più chiaro il confronto che successivamente verrà svolto.

I materiali utilizzati durante questa prova e le rispettive caratteristiche geometriche e meccaniche, sono i medesimi utilizzati per il primo modello, quindi si fa riferimento al paragrafo 2.1 per ulteriore chiarezza.

Per quanto riguarda il modulo elastico del mattone è stata utilizzata una formula secondo cui il valore varia tra 300 e 400 volte la resistenza a compressione dello stesso, non avendo a disposizione ne prove, ne dati certi sul suo reale valore.

Unica aggiunta dal punto di vista dei materiali rispetto alle prove effettuate per il mattone singolo con la lamina fibrorinforzata, è stata l'utilizzo della malta per l'unione dei diversi mattoni a formare un muretto.

Vengono quindi di seguito riportate le sue caratteristiche.

Per la realizzazione dei letti di malta è stata utilizzata la stessa tipologia per tutti i campioni, ovvero si è fatto uso di malta Tassullo T30 V.

Si tratta di una malta a base di calce idraulica naturale ed inerti selezionati con granulometria massima di 4 mm, dotata di resistenza medio-alta e di un basso contenuto di sali idrosolubili.

Altra caratteristica di questa malta è che risulta a ritiro controllato.

I dati tecnici (forniti dal produttore) vengono riportati in seguito:

- *Granulometria (UNI EN 1015-1)*: da 0 a 4 mm
- *Acqua d'impasto*: ca. 0.16 l/kg (ca. 5 l/sacco)
- *Peso specifico (UNI EN 1015/10)*: 1750 ÷ 1850 kg/m³
- *Resistenza a compressione (UNI EN 1015-11)*: Classe CS III (3.5 ÷ 7.5 N/mm²)
- *Resistenza alla diffusione del vapore (UNI 9233)*: $\mu = 12$

- pH: > 10.5

- Classe di resistenza al fuoco: A1

La determinazione della resistenza a compressione della malta Tassullo T30V, impiegata per la realizzazione dei muretti, è stata effettuata testando due cubetti con lato 100 mm realizzati al termine della realizzazione dei campioni di muratura.



Figura 3.1.1 – Modalità di rottura dei cubetti.

<i>Campione</i>	<i>Lunghezza (mm)</i>	<i>Larghezza(mm)</i>	<i>Altezza (mm)</i>	<i>Carico max (kg)</i>	<i>Resistenza a compressione [Mpa]</i>
BCM1	99	99	100	4410	4.414
BCM2	99	100	100	3880	3.845

Tabella 3.1.1 – Prova di resistenza a compressione.

Per completare il quadro relativo alla caratterizzazione dei materiali impiegati, sono state condotte prove di trazione indiretta su due cilindri di malta realizzati al termine della costruzione dei muretti.



Figura 3.1.2 – Prova brasiliana su un cilindro di malta

<i>Campione</i>	<i>Diametro d (mm)</i>	<i>Lunghezza L (mm)</i>	<i>Carico max F (kg)</i>	<i>Resistenza a trazione (MPa)</i>
MB1	95	225	4100	1.198
MB2	95	225	3100	0.906

Tabella 3.1.2 – Prova di resistenza a compressione

Per quanto riguarda il modulo elastico della malta, si è fatto riferimento a valori ottenuti da ricerche bibliografiche effettuate, selezionando come valore utilizzabile 15000MPa . La prova a cui si fa riferimento in questa parte della tesi è la prova denominata M3A1a, eseguita il 29/06/2011, è stata la prima condotta in ordine temporale su campioni di muratura rinforzati con GFRP.

Nella prova in oggetto è stato utilizzato un setup a 7 estensimetri e 2 LVDT.

Vengono riportate di seguito alcuni passi effettuati per la realizzazione del provino muretto, svolti da Alessandro Bellini presso il laboratorio dei materiali, in modo da rendere più chiara la successiva modellazione numerica.

La preparazione dei muretti ha richiesto fasi in parte diverse e comunque più articolate rispetto alla preparazione dei mattoni.

Innanzitutto è stato necessario provvedere alla costruzione di un sistema che consentisse di avere una adeguata verticalità durante la realizzazione del muretto.

La regolarità dei campioni è infatti un requisito essenziale per poi avere una collocazione più semplice degli stessi all'interno del setup di prova.

Visto che si tratta di campioni di muratura, costruiti utilizzando mattoni anche di recupero e quindi generalmente diversi tra loro, chiaramente non si potrà mai ottenere un muretto

perfettamente regolare, ma il mantenimento della regolarità almeno su una delle facce garantisce un posizionamento più agevole del provino nell'apparecchiatura di prova.

Terminate le fasi preparatorie quali Spazzolatura dell'eccesso di sabbia presente sulla superficie, Idropulitura della superficie, Bagnatura dei mattoni, Sgocciolatura dei mattoni, per la costruzione del muretto sono stati seguiti i seguenti passi fondamentali:

1) *Applicazione* accurata di un adeguato quantitativo di *malta* sulla faccia del mattone sottostante e sulla faccia di quello soprastante per garantire una perfetta aderenza superficiale (*figure 3.1.3 e 3.1.4*);



Figura 3.1.3 - Fase di applicazione della malta sulla faccia del mattone ancora da posizionare.



Figura 3.1.4 - Fase di applicazione della malta sul mattone inferiore e superiore terminata.

2) *Collocazione del mattone* nella sua corretta posizione grazie all'utilizzo della parete in legno posteriore, con pulitura e recupero dell'eventuale eccesso di malta;



Figura 3.1.5 - Collocazione del mattone e recupero della malta eccedente.

3) *Realizzazione dell'intera fila* di sei mattoni cercando di ottenere la maggiore omogeneità possibile nella realizzazione dei corsi di malta e una adeguata verticalità nelle superfici di appoggio che andranno poi disposte nell'apparecchiatura di prova;

4) *Finitura dei corsi di malta.*

Per quanto riguarda lo spessore dei corsi di malta, si è adottato uno spessore di un centimetro su tutte le tipologie.

Per specificare, la prova è stata possibile grazie al fatto che un singolo complesso mattone-malta, è stato suddiviso in due sotto muretti, di dimensioni più ridotte in modo da poter effettuare prove doppie sui singoli campioni (*figura 3.1.6-3.1.7*).

La fase di taglio dei muretti è stata eseguita grazie all'aiuto dei tecnici del LISG (Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica), impiegando un apposito macchinario dotato di sega circolare.

I muretti soggetti al taglio sono stati dodici su un totale di sedici campioni, anche se in questa tesi viene preso come riferimento un singolo muretto.

Il taglio è avvenuto a metà del lato lungo del mattone, ottenendo, a partire da un muretto, due campioni tra loro speculari (*figura 3.1.6*), dotati comunque di dimensioni sufficienti per il rinforzo da testare.

L'area di incollaggio ha le stesse dimensioni di quella utilizzata nei mattoni: 50 mm (come la larghezza del rinforzo) per 200mm di lunghezza.

Questa scelta è stata indispensabile per poter poi confrontare i risultati delle prove sui mattoni con quelli delle prove sui muretti, a parità di tipologia di mattone e di finitura superficiale.

Diversamente dal caso dei mattoni, però, nei muretti è stata variata la lunghezza della parte non incollata nella zona anteriore del campione: nel caso dei mattoni, infatti, tale lunghezza risultava obbligata a causa delle limitazioni dimensionali del provino, mentre qui le dimensioni maggiori del campione hanno consentito di spingersi fino al valore di 100mm.

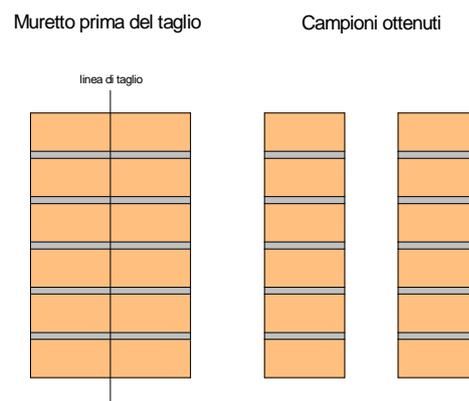


Figura 3.1.6 – Taglio muretto.



Figura 3.1.7 – Muretti ottenuti dopo il taglio.

Per capire l'impostazione della prova, viene riportata la *figura 3.1.8*, in cui si vede il setup di prova.

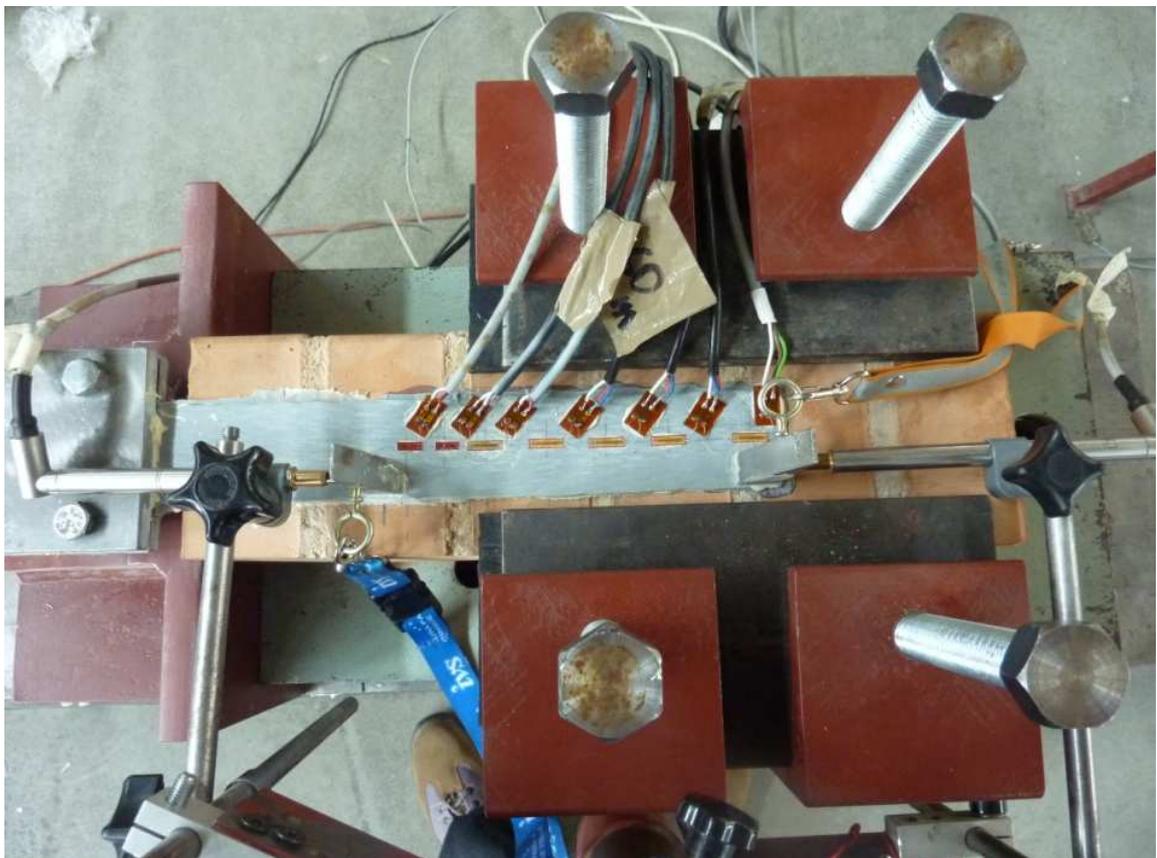


Figura 3.1.8 – Setup di prova.

3.2 Modellazione della geometria

Come già detto precedentemente per quanto riguarda il primo modello, la creazione di un appropriato modello geometrico risulta essere il primo ed il principale step per la realizzazione di un modello di calcolo agli elementi finiti in Midas Fea, per questo motivo occorre creare le giuste basi per poter discretizzare nel miglior modo possibile il modello geometrico creato.

Nelle figure sottostanti, così come fatto anche per il primo modello vengono riportate delle figure scheletriche che rappresentano nel migliore dei modi la geometria da inizializzare in Midas Fea.

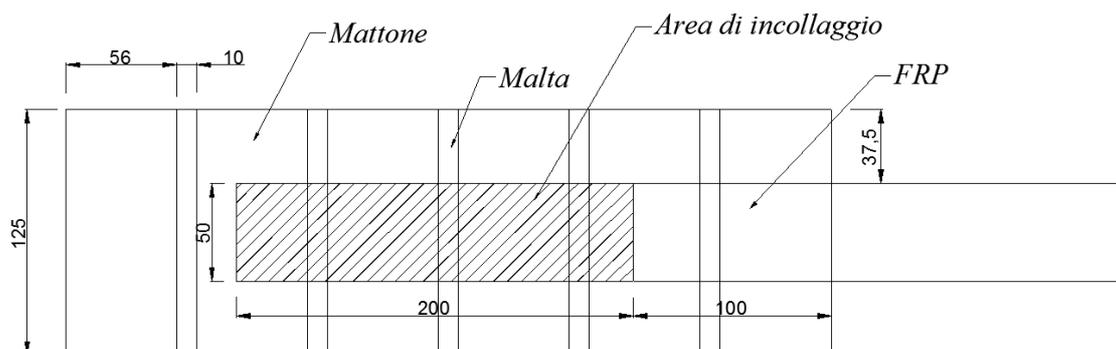


Figura 3.2.1 – Modello B : pianta geometria.

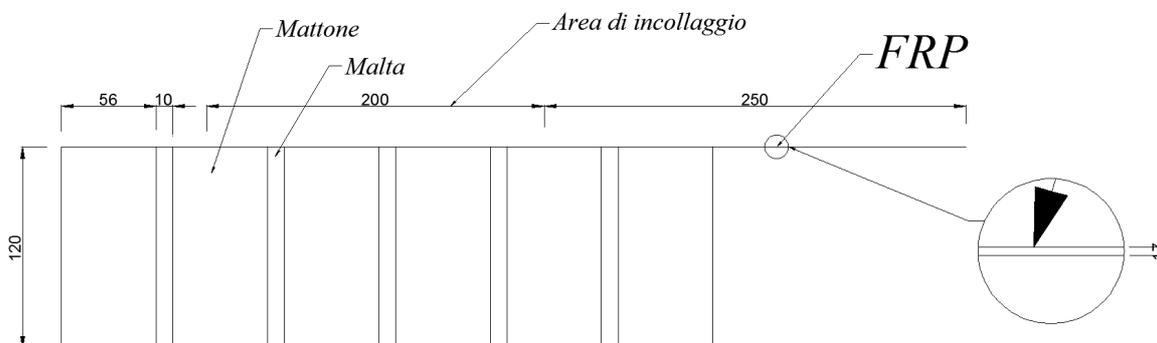


Figura 3.2.2 – Modello B : sezione con particolare dello spessore della lamina.

All' inizio di questo lavoro di tesi, si è detto come il lavoro svolto fosse stato suddiviso in diversi step, e quindi proprio per questo motivo, che nel passare da un gradino all' altro si fa esperienza degli errori fatti precedentemente, e si raccolgono i risultati prodotti nello step prima.

Proprio per questo motivo, per questo modello, ovviamente, sono riprese le stesse proprietà meccaniche del modello precedente, e gli stessi legami costitutivi, facendo però particolare attenzione al legame sia a trazione che a compressione della malta.

Lo stesso lo si è fatto anche dal punto di vista geometrico e dal punto di vista della modellazione.

Tutto ciò per dire come anche in questo caso è ritornato in gioco il problema dell' unione dei due pezzi di FRP (*figura 3.2.3,(B = zona di incolaggio)*), ed è stato risolto come in precedenza.

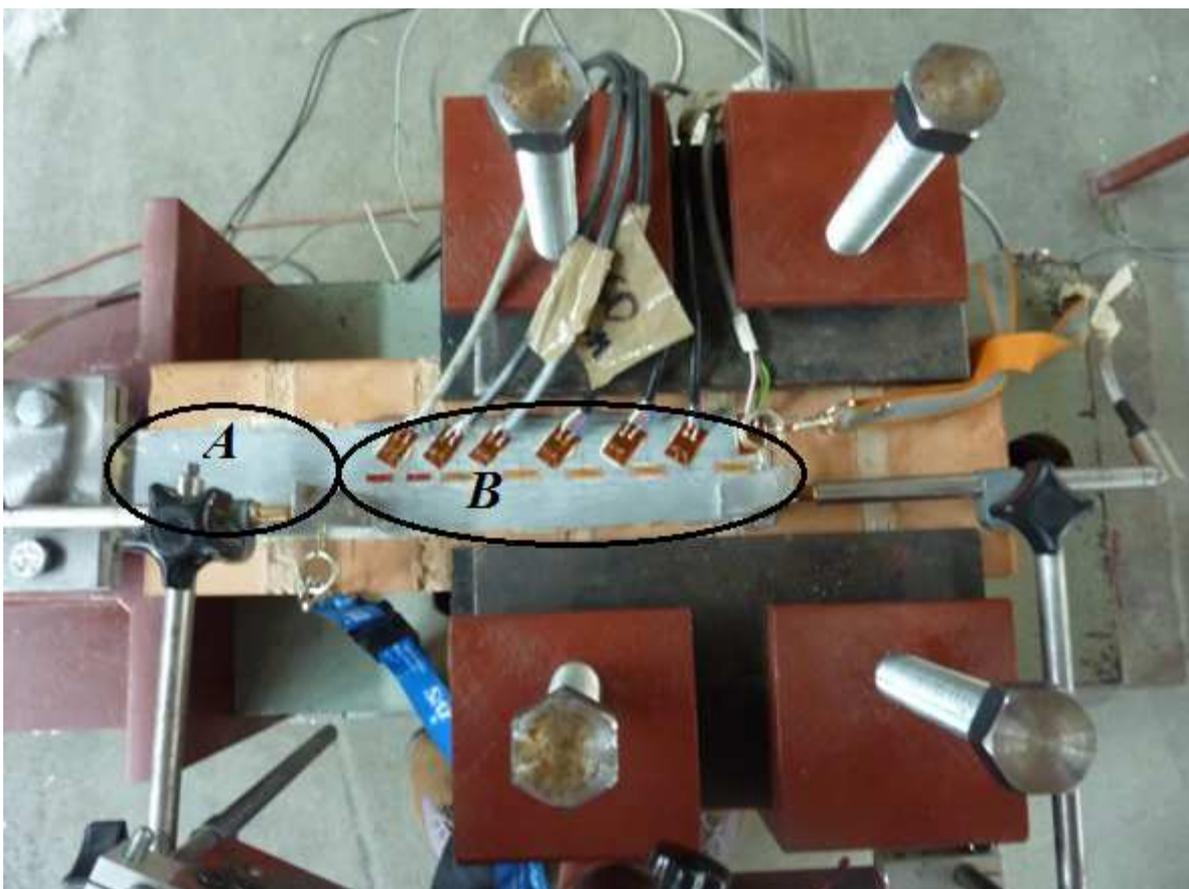


Figura 3.2.3 – Unione lamina.

La prima cosa che è stata fatta in Midas Fea è stata quella di creare le varie entità geometriche, quindi come detto anche per il modello A, sono stati creati i diversi Box, seguendo il comando *Geometry > Primitive Feature > Box* (tasto rapido ), il quale permette di realizzare elementi geometrici parallelepipedo, come mostrato nella figura sottostante inserendo le diverse lunghezze ed in particolare il vertice di base, ovvero il punto corrispondente allo $0,0,0$ (x,y,z) relativo del mio elemento geometrico.

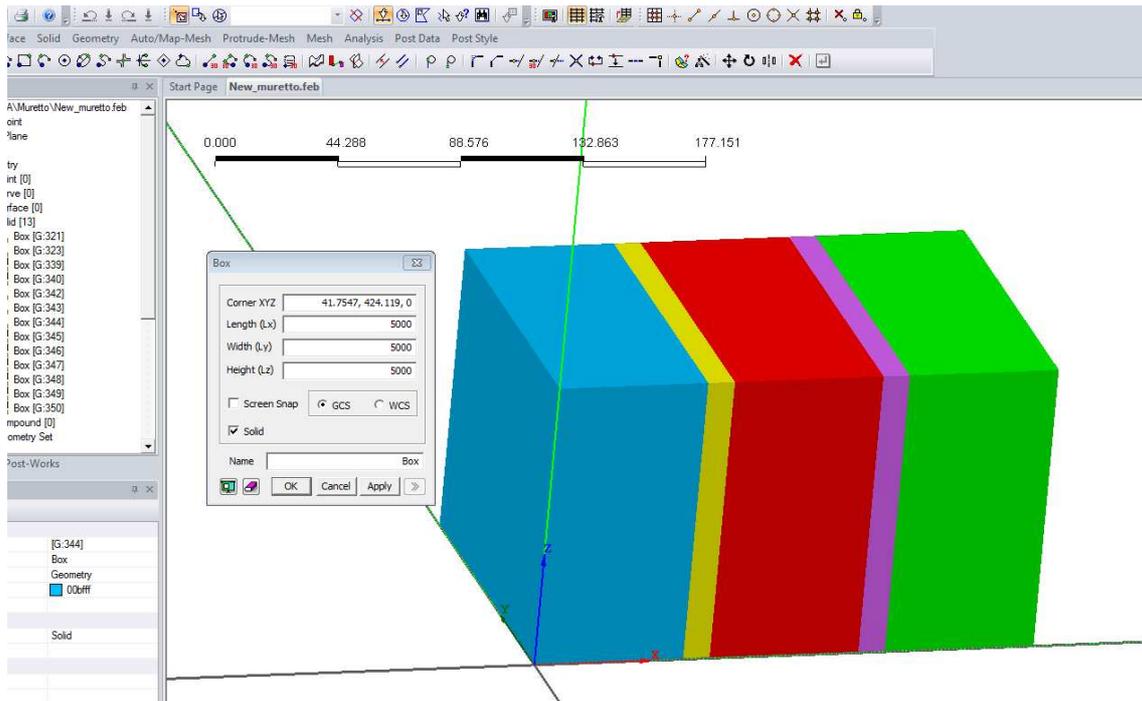


Figura 3.2.4 – Modello B : Box1, Box2, Box3, Box4,Box5.

Nella figura sopra vengono riportati a titolo di esempio soltanto 5 elementi *Solid, Box*, in realtà per la generazione del modello è stato necessario creare 6 *Box* per rappresentare i mattoni, 5 per rappresentare la malta tra mattone e mattone, e 2 *Box* per creare la lamina, quindi in totale sono stati creati 13 *Box*.

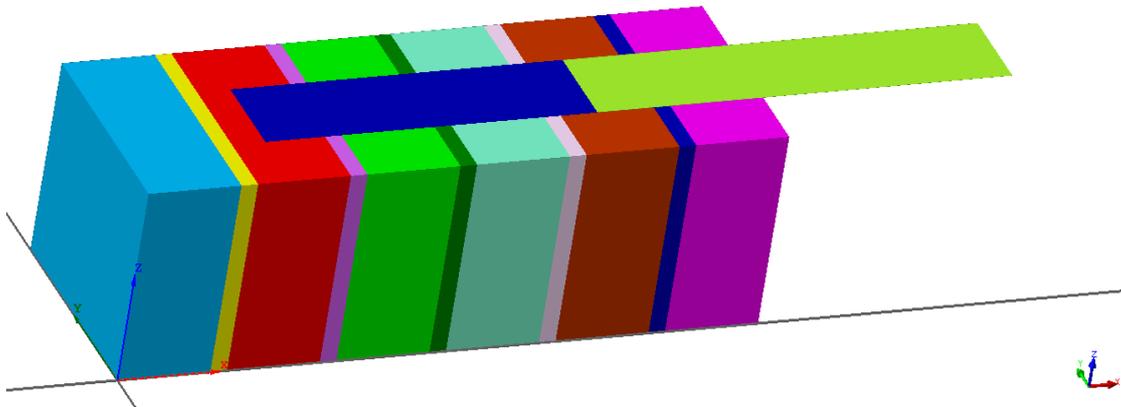


Figura 3.2.5 – Modello B : geometria completa

Bisogna sottolineare un' aspetto di fondamentale importanza per quanto riguarda la geometria del modello numerico, ovvero il fatto che è stato necessario suddividere in due parallelepipedi distinti l' FRP, come mostrato in *figura 3.2.5*, in quanto risultava necessario per poter individuare al meglio l' interfaccia tra mattone e FRP.

Ulteriore aspetto di fondamentale importanza dal punto di vista geometrico è stato quello della creazione dei nodi in comune, come già mostrato nella prima parte della tesi; l' ulteriore difficoltà in questo caso è stata quella di creare nodi in comune non solo tra mattone, malta, FRP, ma anche tra mattone e malta stessa, nel primo caso per creare l' interfaccia bond – slip, nel secondo per avere continuità tra i due elementi.

Va sottolineato come questa opzione sia possibile inserirla grazie al tasto *Geometry > Boolean Operation > Cut*, in cui bisogna selezionare il Boolean Master e il Boolean Tool(s), ovvero l'elemento master da tagliare e la rispettiva forma del taglio.

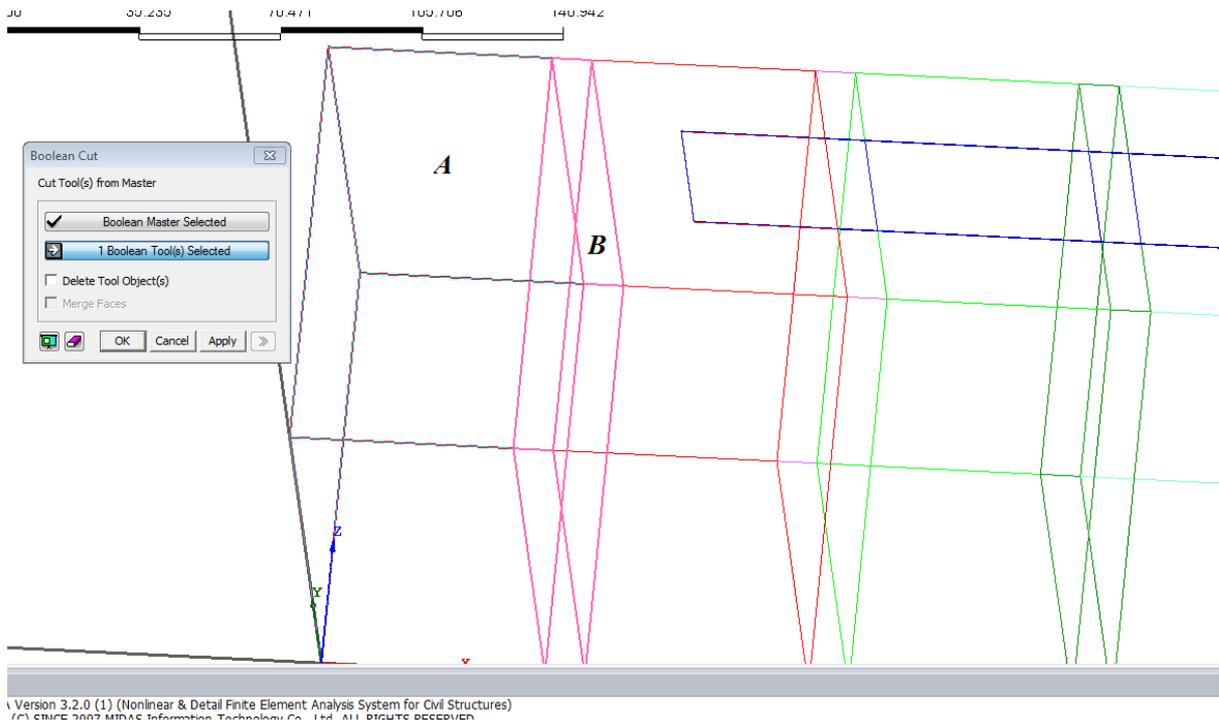


Figura 3.2.6 – Boolean operation : cut.

In particolare viene mostrato nella figura 3.2.6, l'operazione di *boolean cut* tra il primo mattone (A) ed il primo elemento di malta (B), infatti come si può notare sono entrambi selezionati.

Come detto in precedenza, questa operazione sarà ripetuta per ogni singolo mattone e elemento di malta, e per ogni elemento in generale e per la lamina.

Bisogna mostrare particolare attenzione a non selezionare il tasto *Delete Tool Object(s)* come mostrato in *figura 3.2.7*, in quanto eliminerebbe gli oggetti selezionati.

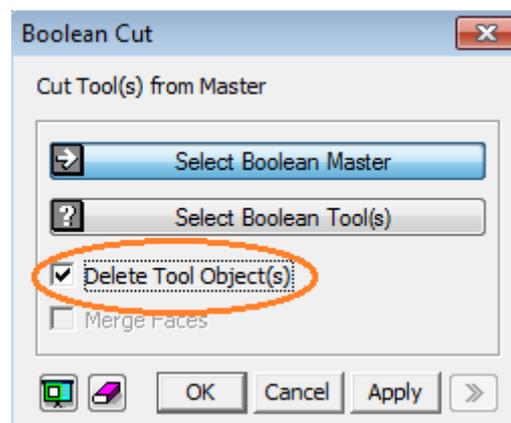


Figura 3.2.7 – Delete Tool Object(s).

3.3 Modellazione delle proprietà meccaniche

In questo paragrafo si mostrerà come sono state inserite e modellate le proprietà dei diversi materiali utilizzati: mattone, malta ed FRP..

Le modalità di inserimento delle caratteristiche meccaniche, e le caratteristiche meccaniche stesse, sono le medesime del modello precedente, a differenza delle proprietà della malta.

Le proprietà quindi del materiale possono essere definite attraverso il comando *Analysis* > *Material* > *Create* > *Isotropic*, in cui si apre una schermata riportata in *figura 3.3.1*.

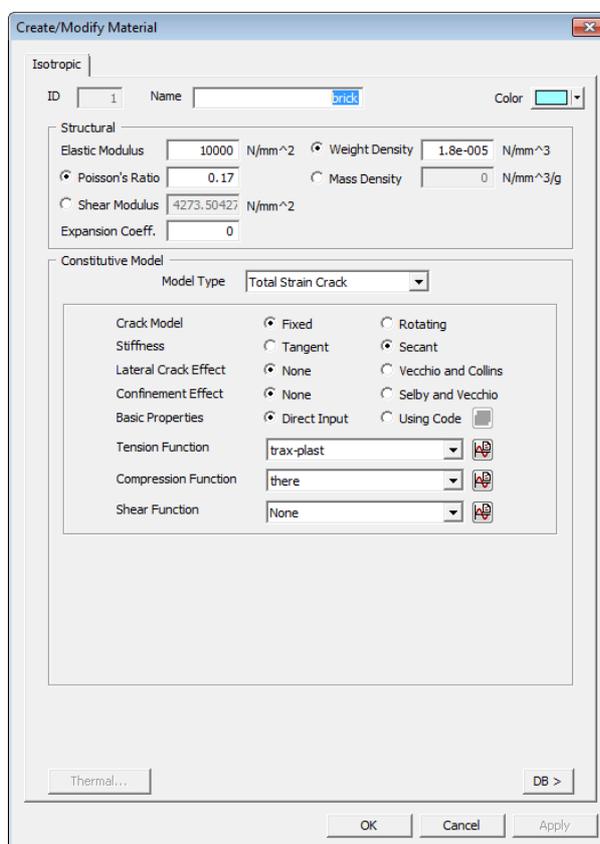


Figura 3.3.1 – Create Material.

Vengono riportate successivamente, soltanto per maggior ordine di esposizione, nuovamente le principali caratteristiche dei materiali.

➤ **MATTONE**

- *Modulo elastico = 10000 MPa;*
- *Coefficiente di Poisson = 0.17;*
- *Weight density = 1.8 e-005.*

- ***Comportamento a trazione: (figura 3.3.2).***

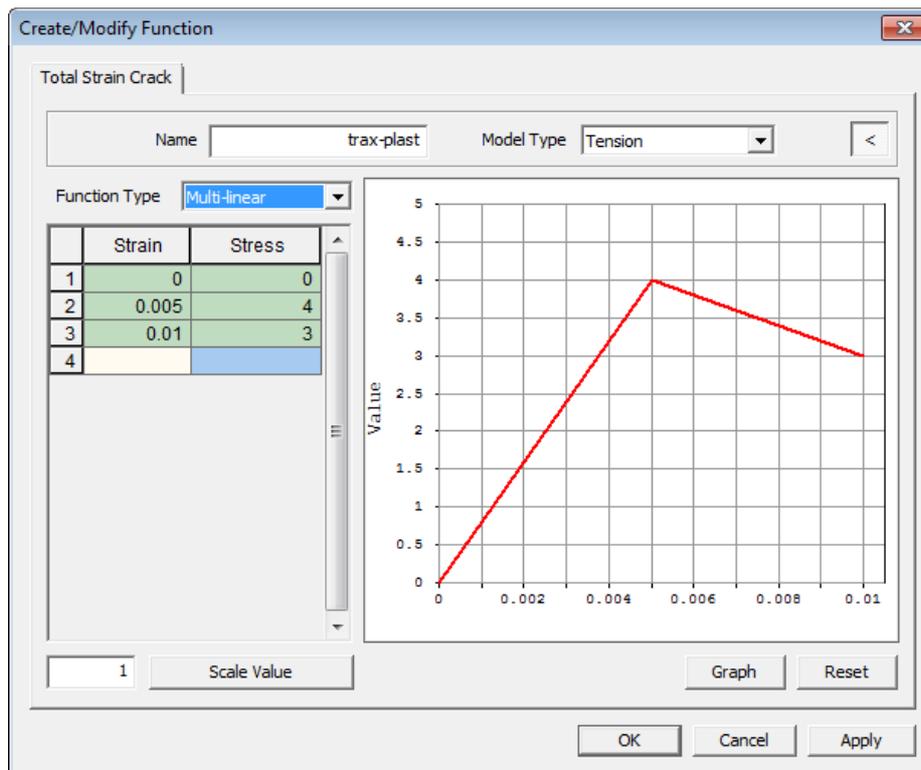


Figura 3.3.2 – Legame a trazione del mattone.

- ***Comportamento a compressione: (figura 3.3.3)***

Per quanto riguarda il comportamento in compressione del mattone è stato inserito un comportamento a parabola, caratterizzato da una tensione di picco a compressione pari a *40MPa (figura 3.3.3).*

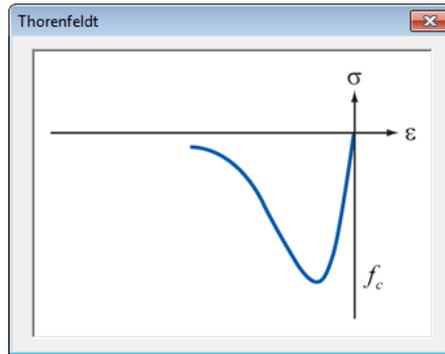


Figura 3.3.3 – Legame a compressione del mattone.

➤ **LAMINA**

- Modulo elastico = 132000 MPa;
- Coefficiente di Poisson = 0.1;
- Weight density = 2.54e-005.

- **Modello costitutivo:** (figura 3.3.4).

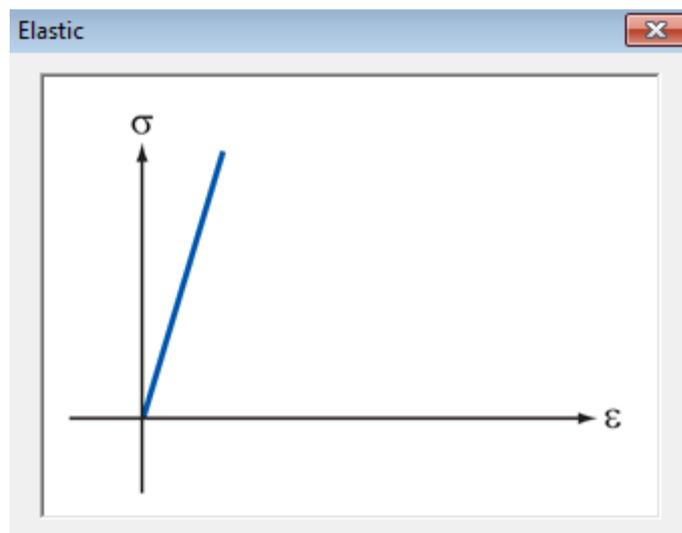


Figura 3.3.4 – Legame elastico FRP.

➤ **MALTA**

- Modulo elastico = 15000 MPa;
- Coefficiente di Poisson = 0.14;
- Weight density = 1.8e-005.

- **Comportamento a trazione:** (figura 3.3.5).

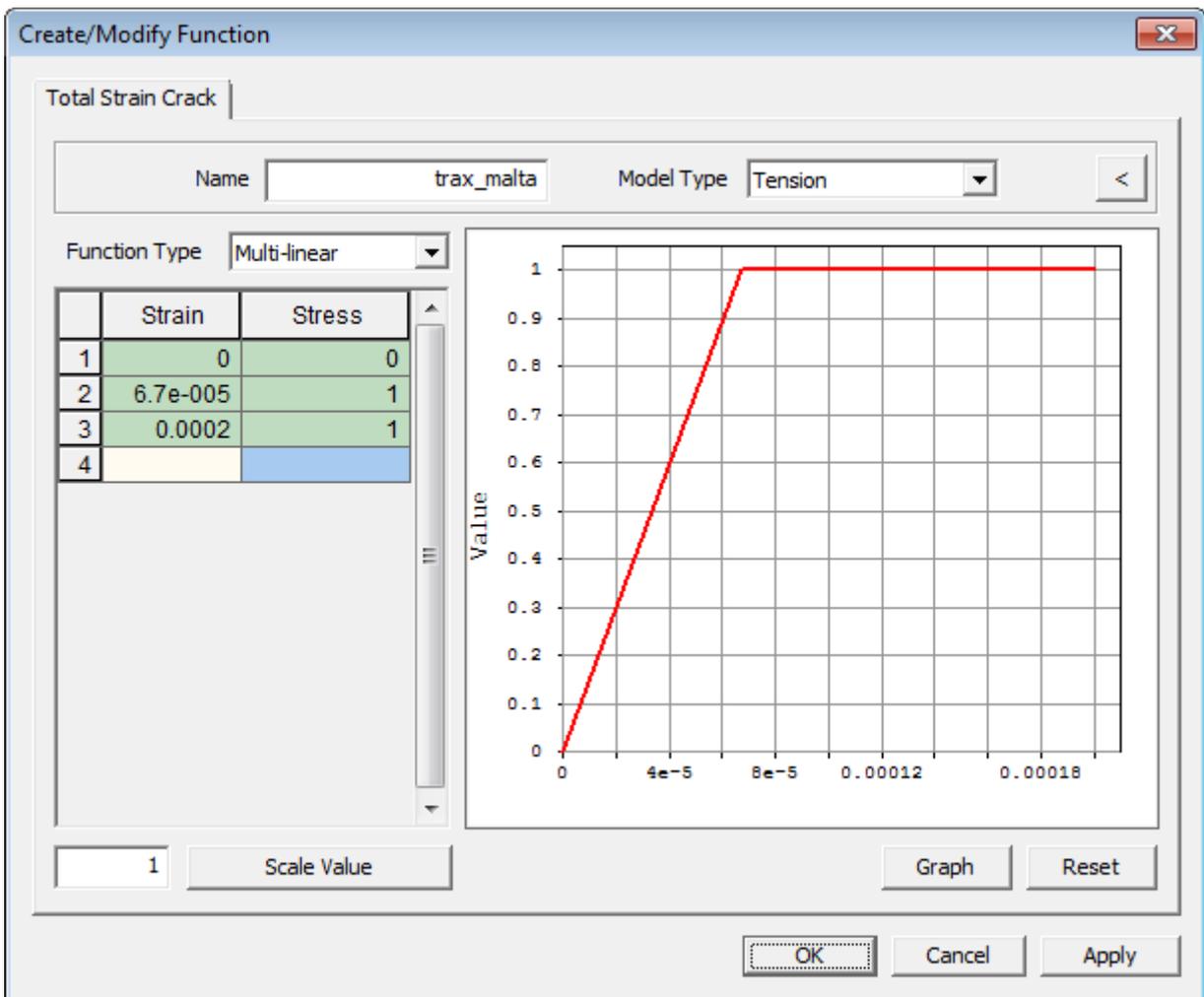


Figura 3.3.5 – Legame a trazione della malta

- *Comportamento a compressione: (figura 3.3.6)*

Per quanto riguarda il comportamento in compressione del mattone è stato inserito un comportamento elasto-plastico così come a trazione, caratterizzato da una tensione di picco a compressione pari a 4MPa (figura 3.3.6).

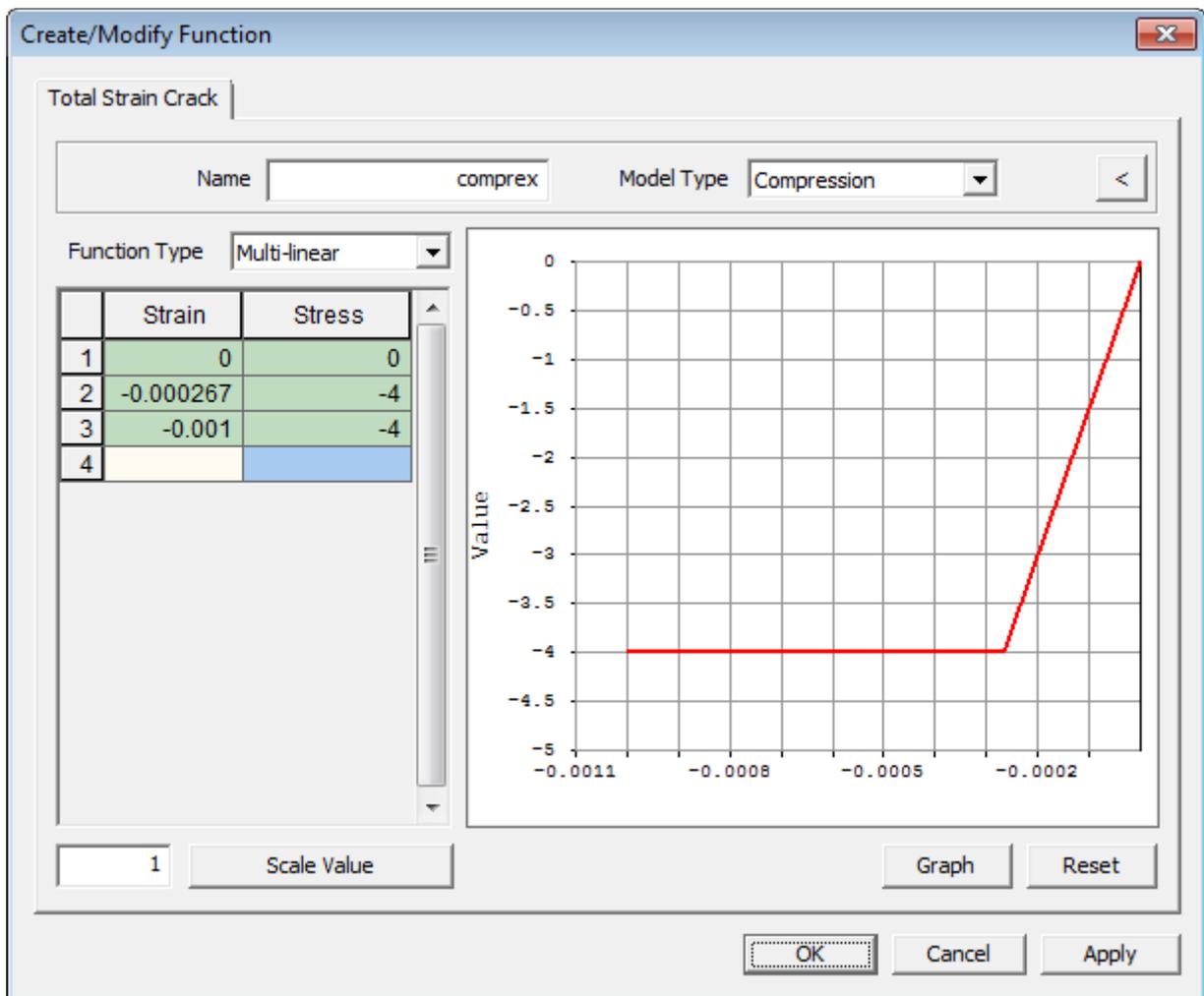


Figura 3.3.6 – Legame a compressione della malta.

3.4 Discretizzazione del modello geometrico

Dopo aver creato la geometria di base per il modello numerico in Midas Fea, si è passati alla discretizzazione del modello, quindi alla creazione della mesh più adatta a d analizzare ciò che accade nel modello.

Discretizzare un modello geometrico dal punto di vista di un codice numerico quale Midas Fea, significa realizzare, sulla geometria creata, tanti elementi tridimensionali, nel nostro caso, aventi numero di nodi a seconda della precisione da adottare, tali da coprire l'intera geometria; una volta creati questi elementi, si è soliti chiamare l'intera discretizzazione di un elemento come mesh; tale tipologia di mesh è realizzabile attraverso il comando *Mesh >*

Map Mesh > Solid (tasto rapido ).

Nel caso di *Unstructured Mesh*, metodologia che è stata utilizzata in questo caso così come nel caso precedente, i nodi interni presentano diversi valori di *valenza*; tale tipologia

di mesh è realizzabile attraverso il comando *Mesh > Auto Mesh > Solid* (tasto rapido .

L'utilizzo di *Structured Mesh*, genera una discretizzazione più efficiente del modello geometrico, ma il processo di realizzazione è limitato dalle condizioni di regolarità che il modello geometrico deve possedere.

Viene riportata di seguito una figura che mostra con più chiarezza la differenza tra le due mesh, Structured e Unstructured:

Anche per questo modello sono stati utilizzati gli stessi elementi *brick*, ed in particolare elementi tetraedrici del primo ordine, caratterizzati cioè da 4 nodi. L'utilizzo di elementi del secondo ordine comporta un vantaggio in termini di qualità della discretizzazione ma anche un aumento dell'onere computazionale a causa del maggior numero di gradi di libertà dell'intero sistema. Poiché il modello presenta un'elevata complessità geometrica, si è quindi preferito adottare elementi tetraedrici del primo ordine per limitare i tempi di analisi.

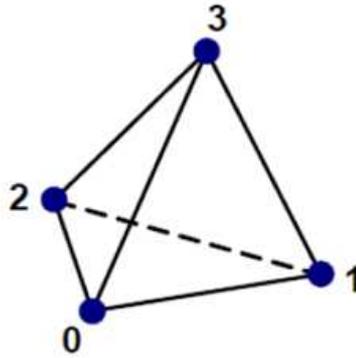


Figura 3.4.1 – Elementi tetraedrici del primo ordine.

Vengono ripresi in questa sezione, gli stessi parametri, e le stesse convenzioni utilizzate anche nel primo modello, ed esposte nel paragrafo 2.4, sia dal punto di vista dei sistemi di riferimento, sia dal punto di vista dei segni positivi delle componenti di tensione e deformazione.

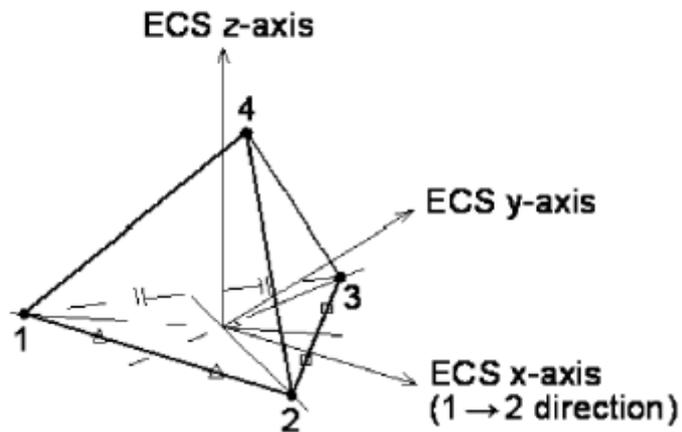


Figura 3.4.2 – Element Coordinate System per elementi tetraedrici.

In *Figura 3.4.3* è rappresentata la convenzione adottata sui segni di tensione e deformazione.

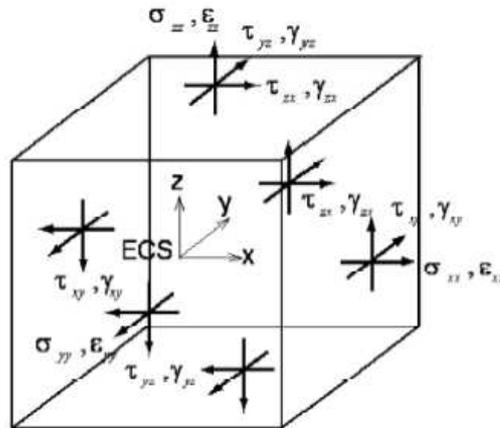


Figura 3.4.3 – Convenzione sui segni di tensione e deformazione.

Le coordinate x, y, z e gli spostamenti u, v, w del generico elemento nel sistema (x, y, z) sono definiti dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}
 x &= \sum_{i=1}^N N_i x_i & y &= \sum_{i=1}^N N_i y_i & z &= \sum_{i=1}^N N_i z_i \\
 u &= \sum_{i=1}^N N_i u_i & v &= \sum_{i=1}^N N_i v_i & w &= \sum_{i=1}^N N_i w_i
 \end{aligned}$$

dove N_i sono le cosiddette funzioni di forma.

Anche in questo caso, parlando di elementi tetraedrici del primo ordine le funzioni di forma sono le seguenti:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= 1 - \xi - \eta - \zeta \\
 N_2 &= \xi \\
 N_3 &= \eta \\
 N_4 &= \zeta
 \end{aligned}$$

La matrice \mathbf{B}_i definisce la relazione tra gli spostamenti nodali u_i e il vettore delle deformazioni $\boldsymbol{\epsilon}$:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \sum_{i=1}^N \mathbf{B}_i u_i$$

dove la matrice \mathbf{B}_i è definita dalle derivate delle funzioni di forma:

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Attraverso la matrice B_i è possibile definire la matrice di rigidezza dell'elemento:

$$K_{ij} = \int_{V_e} B_i^T D B_i dV$$

La discretizzazione di ogni singolo elemento è stata effettuata con la medesima metodologia ovvero Unstructured mesh, realizzabile con il comando *Mesh > Auto Mesh > Solid* (tasto rapido ) (figura 3.4.4).

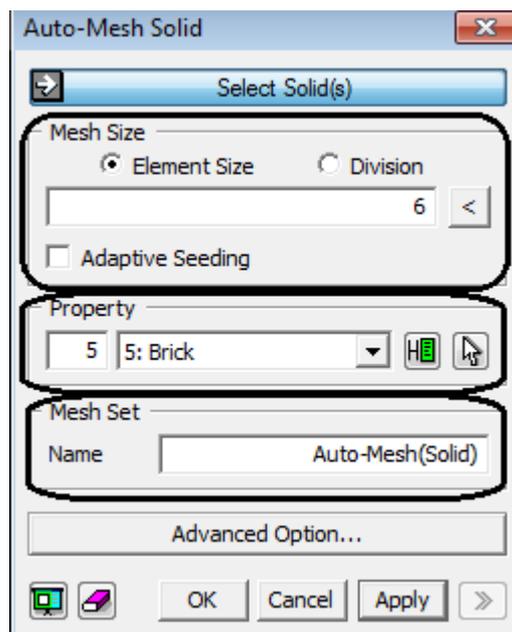


Figura 3.4.4 – Auto-Mesh Solid.

Come si può ben notare della schermata in *figura 3.4.4*, la discretizzazione si può realizzare identificando tre parametri :

- *Mesh size* : grandezza degli elementi tetraedrici;
- *Property*: proprietà dell' elemento da discretizzare;
- *Mesh Set*: nominare la mesh che si sta creando.

In realtà a differenza del primo modello numerico, come si poteva ben intuire già dalla geometria, in questo caso la discretizzazione, e quindi la creazione delle diverse mesh, risulta essere molto più complicata per diversi motivi.

Tra le prime cause che portano alla discretizzazione differente rispetto al caso precedente c'è sicuramente il fatto che ci siano diversi elementi collegati tra loro, e che quindi risultava indispensabile avere una mesh più fitta in corrispondenza dell'unione di questi elementi.

Senz'altro però, il problema fondamentale di una discretizzazione caratterizzata da molti più parametri rispetto al primo modello, è che durante la campagna sperimentale, i risultati delle prove effettuate su questi muretti, che ora saranno modellati, hanno mostrato come in corrispondenza della porzione di malta interfacciata con l'elemento lamina, ci fosse uno scavetto, ovvero una piccola asportazione di materiale (*figura 3.4.5 - figura 3.4.6*).



Figura 3.4.5 – Asportazione di una porzione di malta.

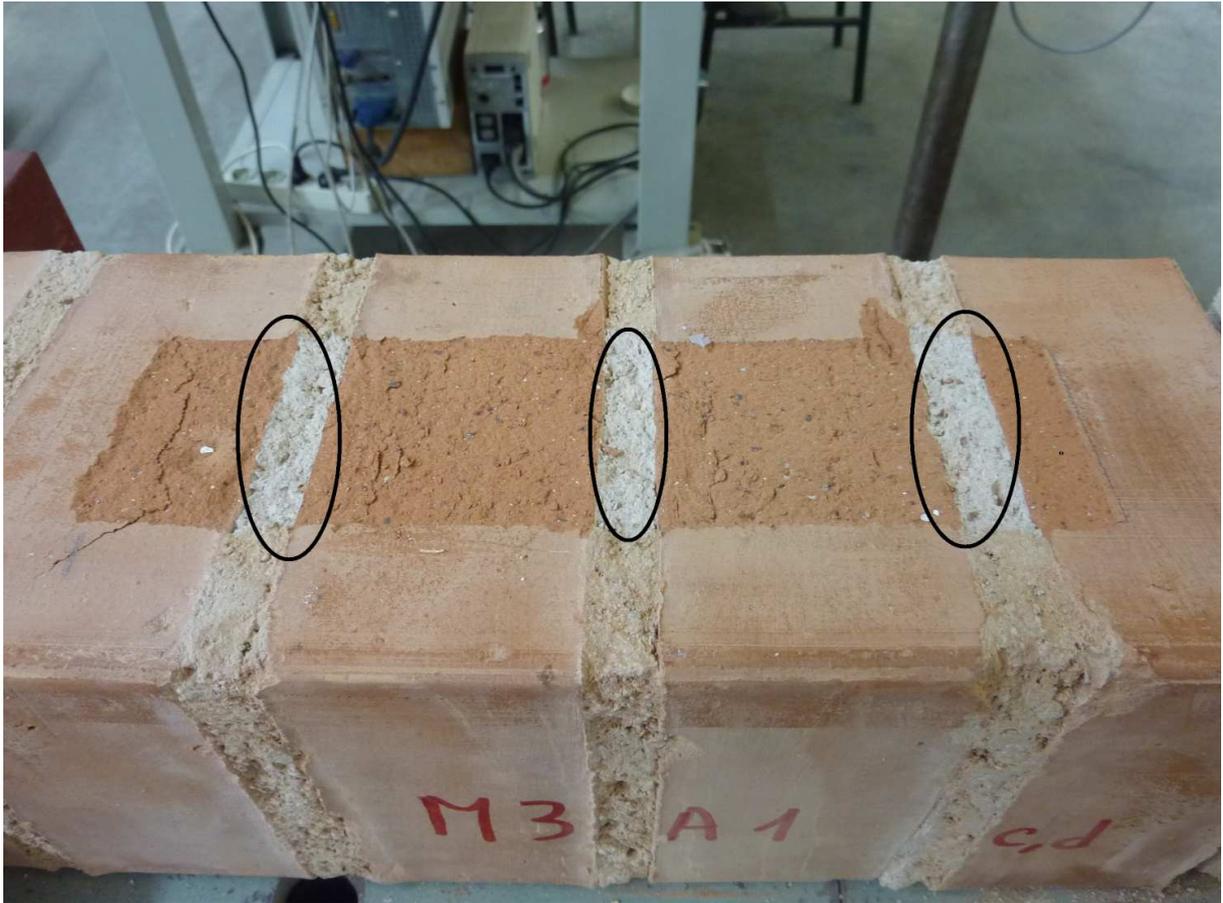


Figura 3.4.6 – Asportazione di una porzione di malta.

Si può ben notare da queste due figura quanto detto sopra, ed è proprio per questo motivo che in corrispondenza di questi punti nella geometria del modello numerico, è stato necessario effettuare un raffittimento considerevole della mesh.

Questa procedura è stata sviluppata grazie al comando *Mesh > Size Control > On Face* il quale, come si vede in *figura 3.4.7*, permette di creare una mesh più fitta, della dimensione desiderata, grazie all'opzione *Mesh Size > Element Size*, in corrispondenza di una faccia.

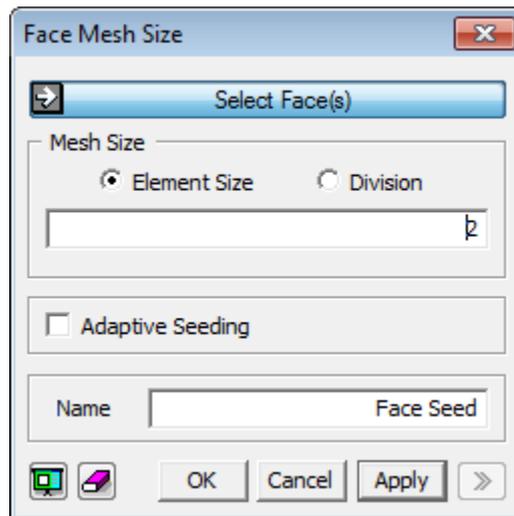


Figura 3.4.7 – Size Control > On Face.

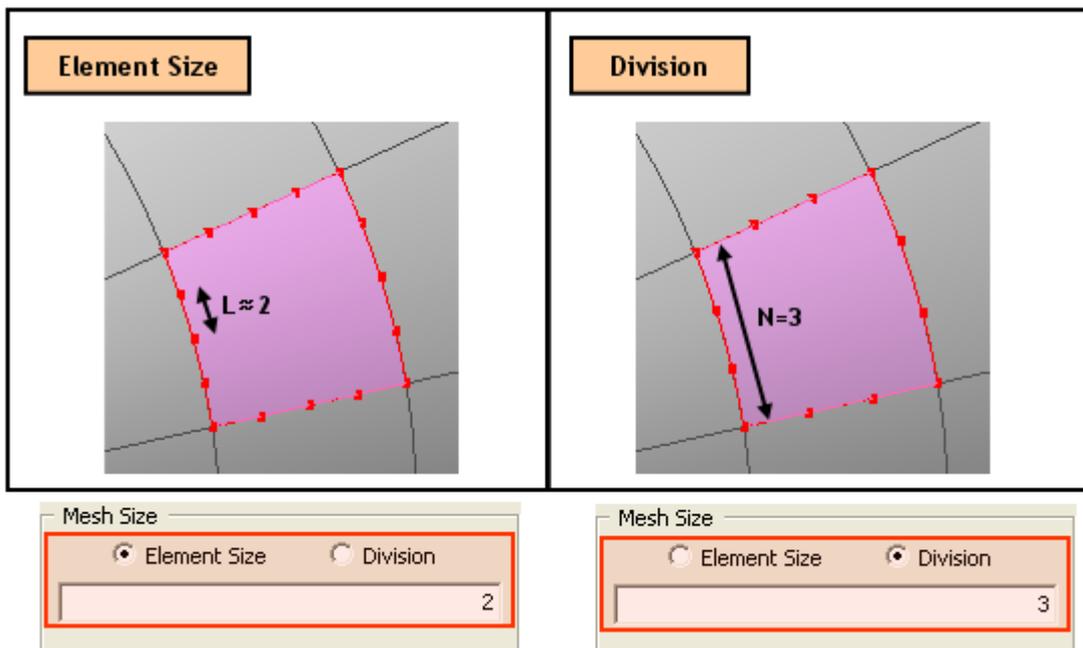


Figura 3.4.8 – Size Control : Element Size.

Va detto che questa procedura di raffittimento della mesh è possibile realizzarla non solo in corrispondenza di una faccia, ma anche in corrispondenza di altre porzioni di un elemento:

- Along Edge:

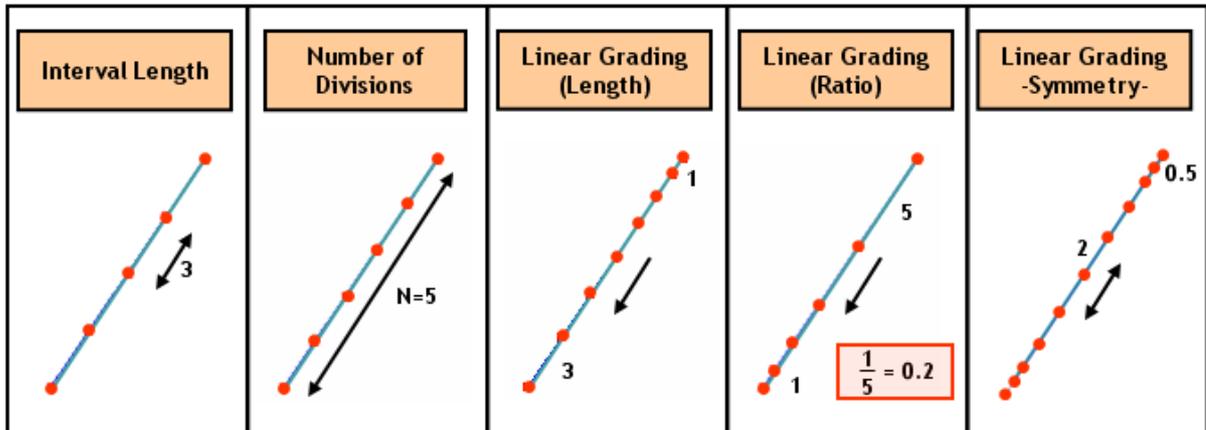


Figura 3.4.9 – Along Edge..

- On shape

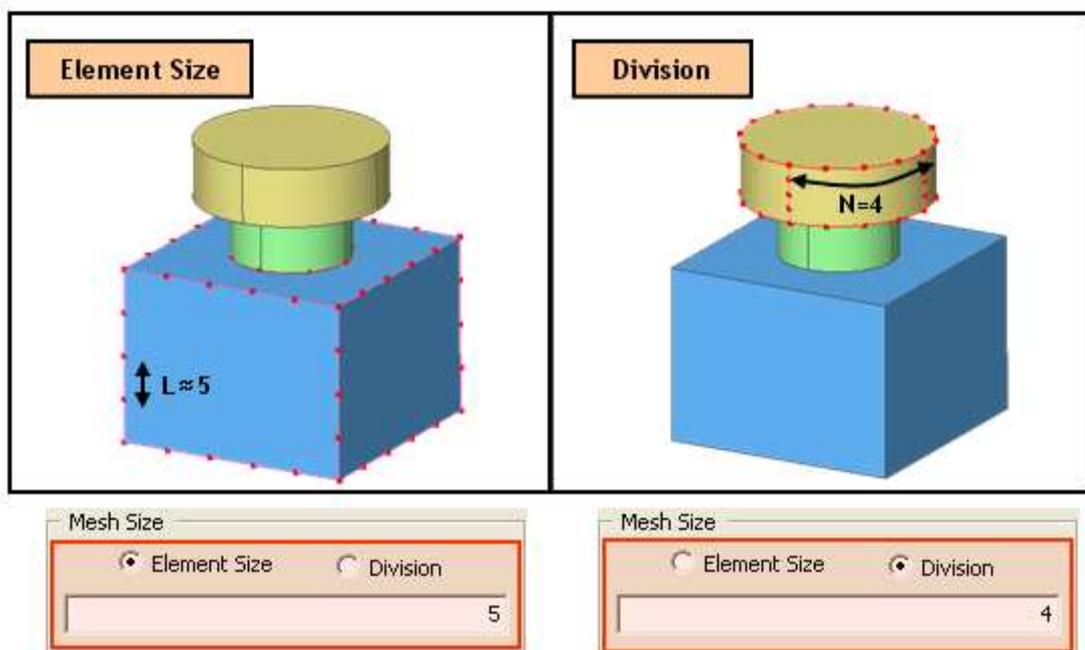


Figura 3.4.10 – On Shape.

Questi in linea di massima sono i procedimenti base per il raffittimento della mesh, nella realtà ci sarebbe altre opzioni che consentono la creazione di mesh più fitte, in base alle esigenze dell'utente, quindi a propria completa discrezione.

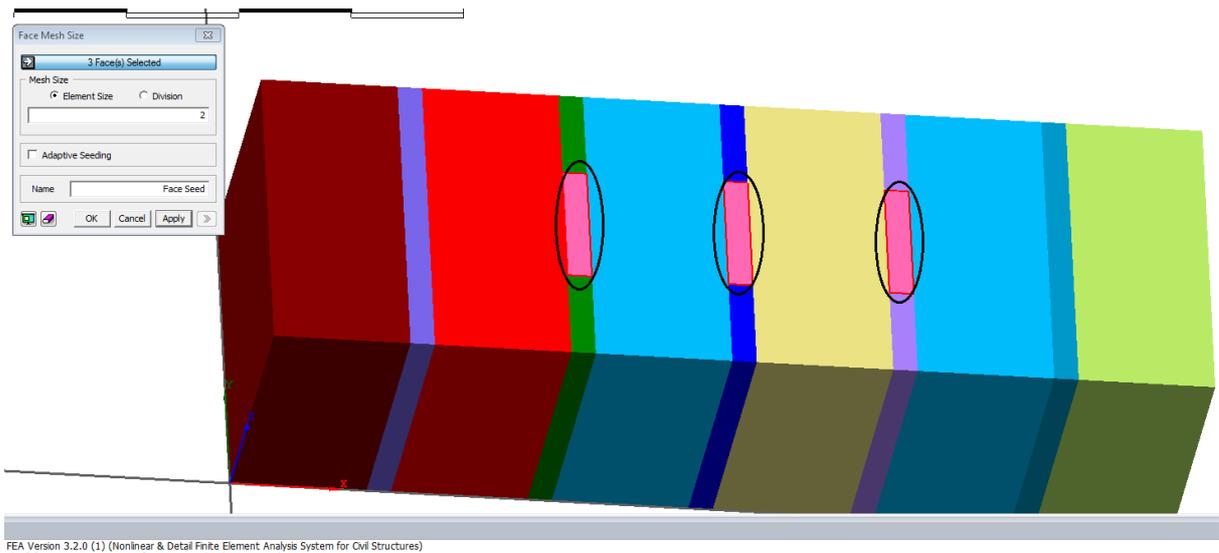


Figura 3.4.11 – Mesh fitta.

Come detto sopra quindi, è stata raffittita la zona di malta in corrispondenza dell'interfaccia con lamina, di conseguenza, poiché abbiamo applicato l'opzione *Boolean Cut*, anche per la malta, accadrà che, essendoci coincidenza di nodi, avremo uguale raffittimento sia sulla mesh dell'interfaccia, che sulla lamina posta al di sopra.

Ovviamente essendoci una mesh più fitta in corrispondenza di queste zone, accadrà che per ritornare alle zone in cui abbiamo una discretizzazione normale, ci sarò un diradamento della mesh.

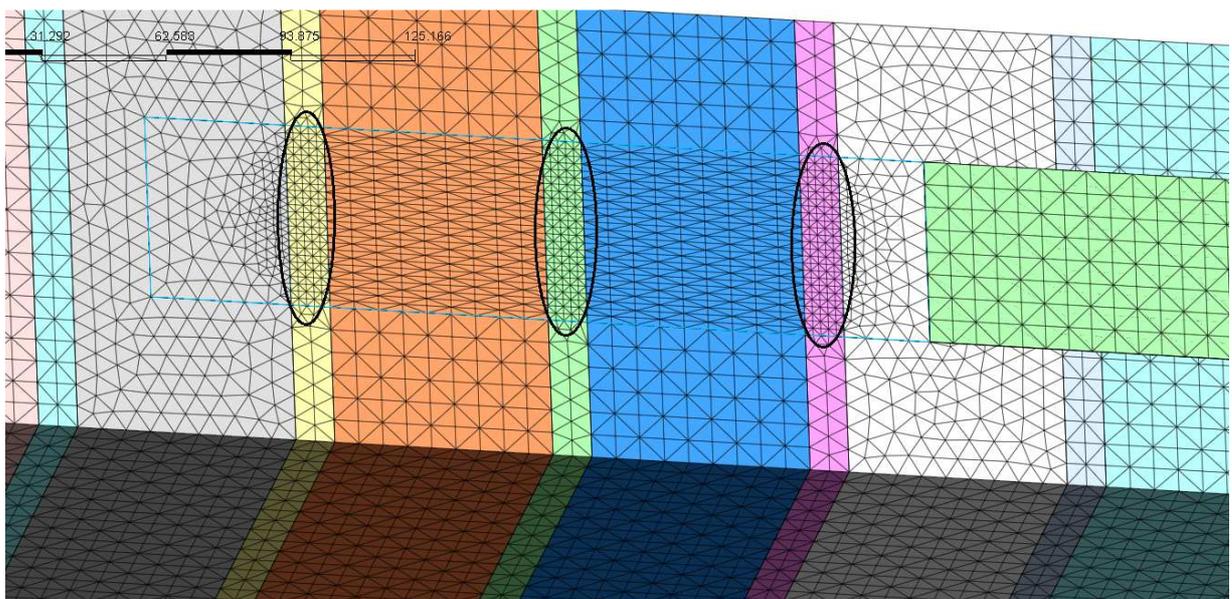


Figura 3.4.12 – Raffittimento della mesh.

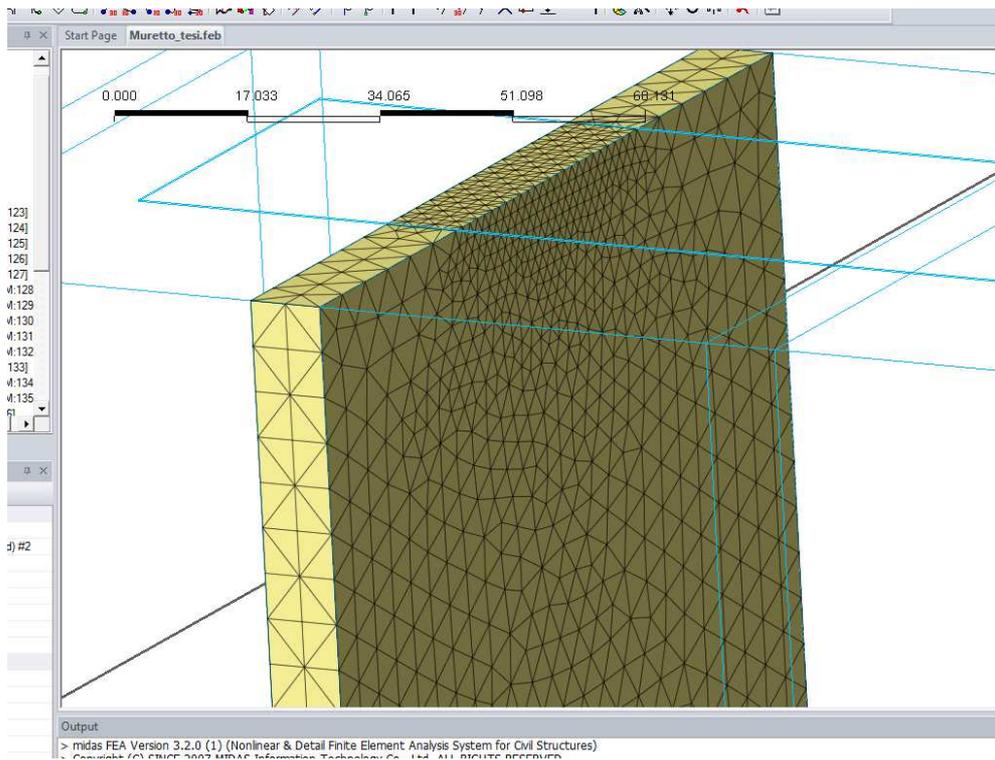


Figura 3.4.13 – *Diradamento mesh.*

Successivamente con l'avanzare del numero di analisi effettuate è stato necessario apportare delle modifiche alla discretizzazione di questo modello, poiché si è resa necessaria la suddivisione dell'interfaccia con la lamina, in due differenti interfacce con diverse proprietà e caratteristiche (*paragrafo 3.5*)(*figura 3.4.14*).

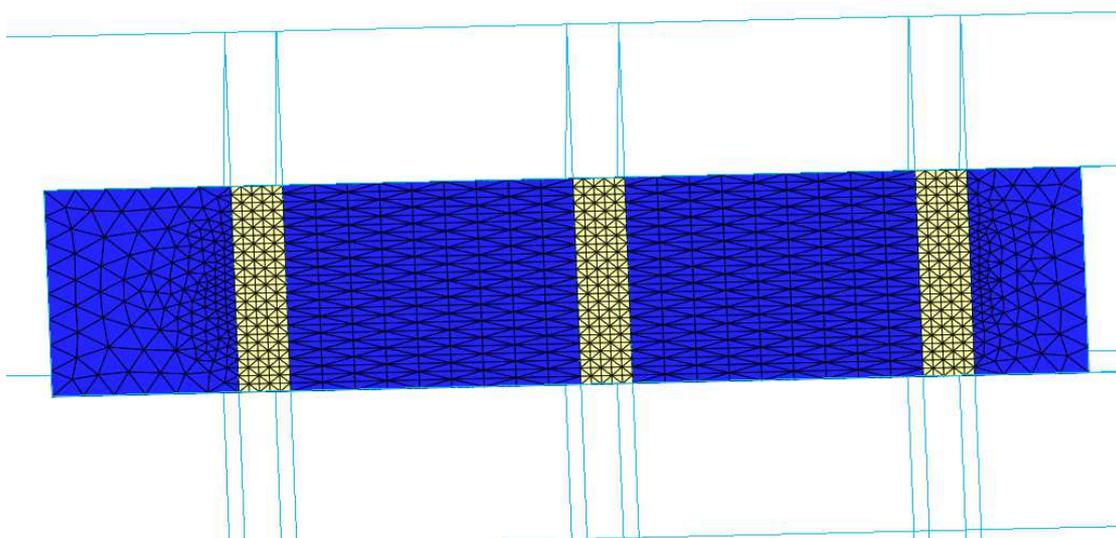


Figura 3.4.14 – *Doppia interfaccia.*

3.5 Interfaccia mattone/malta – FRP

Anche per questo secondo modello è stata dedicata una sezione a parte per la creazione dell' interfaccia mattone/malta – FRP.

In questa situazione, a differenza della precedente, l'interfaccia, come detto già nel *paragrafo 3.4*, non è soltanto in corrispondenza del mattone, ma anche della malta posta tra mattone e mattone, di conseguenza è stato necessario regolare nella giusta maniera i due comportamenti per derivarne uno complessivo.

Utilizzando il comando *Boolean cut*, è stato possibile creare l'elemento interfaccia, in quanto solo se i due elementi hanno nodi in comune è possibile effettuare questa operazione.

Così come è stato fatto per il mattone e l'FRP, si sono inserite anche per l'interfaccia le rispettive proprietà utilizzando sempre il comando *Analysis > Material > Create > Interface*, come riportato in *figura 3.5.1*.

La differenza sostanziale rispetto al modello precedente per quanto riguarda l'elemento interfaccia sta nel fatto, come detto già nel paragrafo precedente che in questo caso oltre ad avere due materiali diversi da interfacciare con la lamina, si sono create due diverse interfacce anche dal punto di vista dei materiali e quindi del legame bond-slip da inserire in ogni interfaccia.

- **Interfaccia mattone - FRP:** (figura 3.5.4)

Le proprietà adottate per questa interfaccia sono le stesse utilizzate anche nel precedente modello:

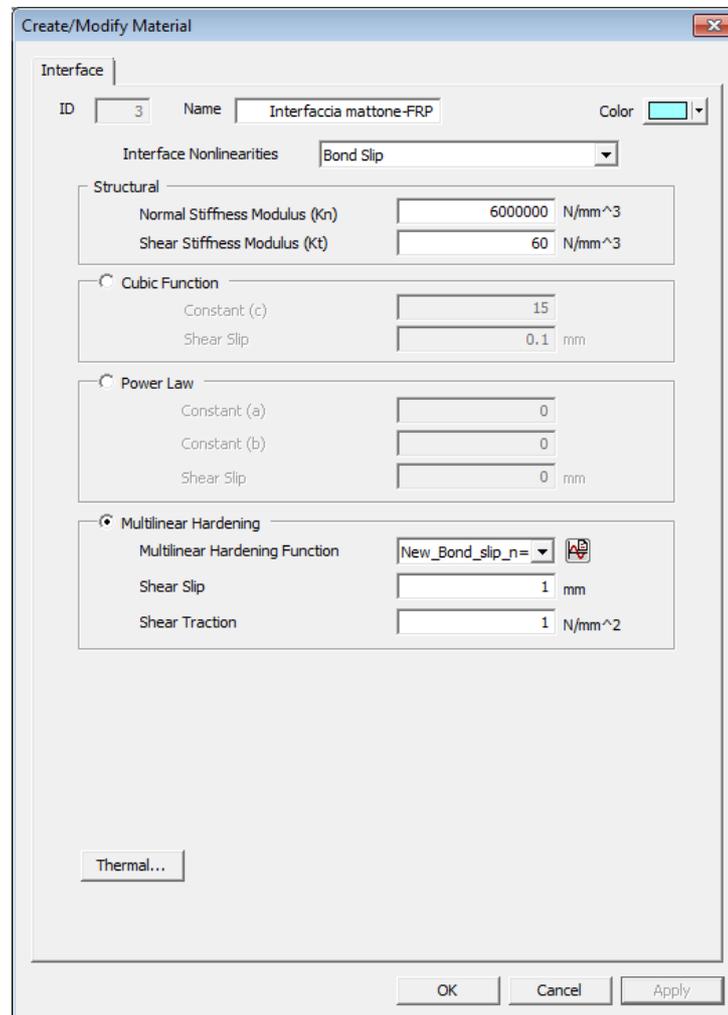
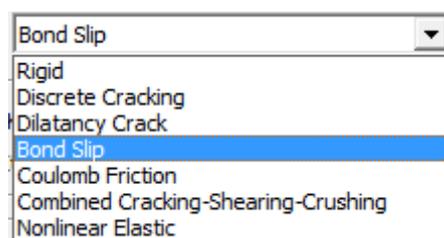


Figura 3.5.1 - Create Interface model.

Come legame di interfaccia, le possibile soluzioni erano:



Ovviamente è stata selezionata l'opzione *Bond Slip*, in quanto la legge che regola questa interazione è una legge di questo tipo.

I parametri da settare rimangono quelli presenti nella sezione *Structural*, ovvero *Normal Stiffness modulus (Kn)*, e *Shear Stiffness Modulus (Kt)*. Per poter inserire in maniera idonea questi parametri ci si deve rifare ad una regola pratica secondo cui come rigidità normale si utilizza un valore pari a 1000 volte il modulo elastico del mattone e come valore della rigidità di taglio un valore adeguato alla legge di interfaccia che si inserisce nella sezione successiva.

In un primo modello, è stata inserita una legge di interfaccia caratterizzata da tre punti, e solo successivamente, a modello efficacemente creato è stato possibile la stessa legge Tau-Slip, del primo modello, che successivamente verrà opportunamente calibrata.

$$\tau(s_p) = \tau_{\max} \cdot \frac{s_p}{s} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s_p}{s}\right)^n}$$

in cui:

τ_{\max} rappresenta il valore massimo della tensione di interfaccia

\bar{s} indica il valore di scorrimento corrispondente alla tensione tangenziale τ_{\max}

n è un parametro che definisce il ramo di softening.

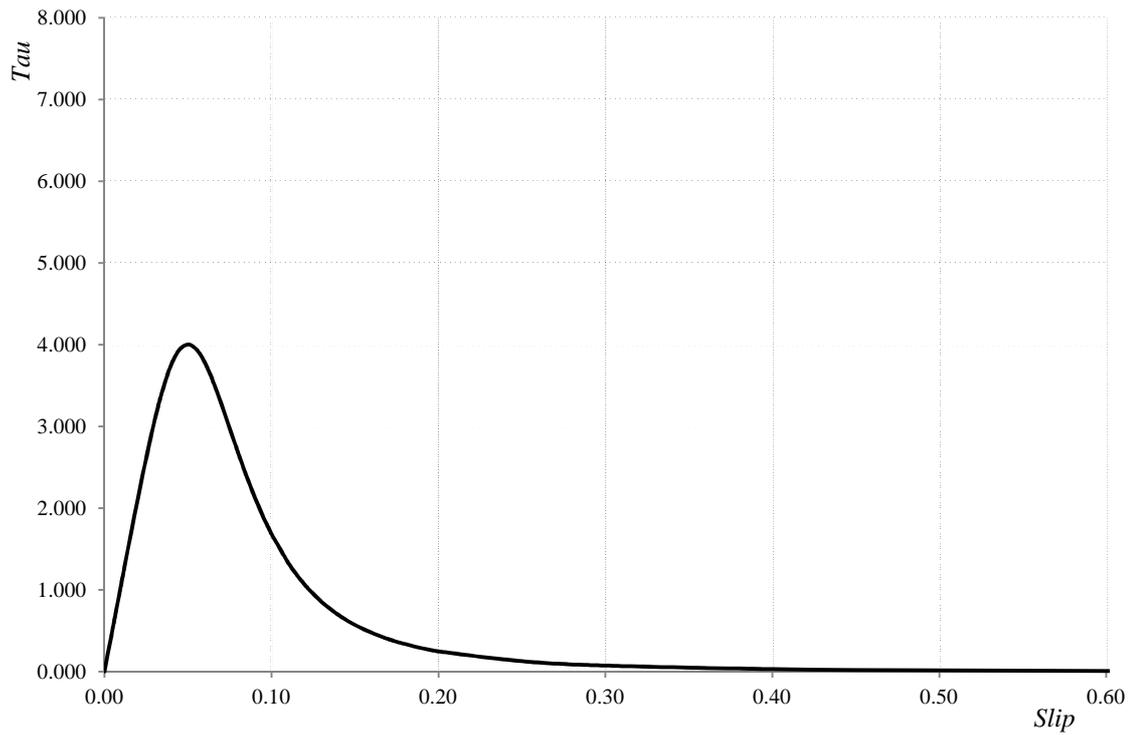


Figura 3.5.2 - Legge Bond - Slip.

Una volta settati i parametri riguardanti le proprietà meccaniche è stato possibile effettuare la discretizzazione dell'interfaccia, quindi si è creato un strato di elementi tetraedrici tra il mattone e la lamina, questa operazione è resa possibile grazie al comando *,Mesh > Element > Create Interface Element* (tasto rapido ).

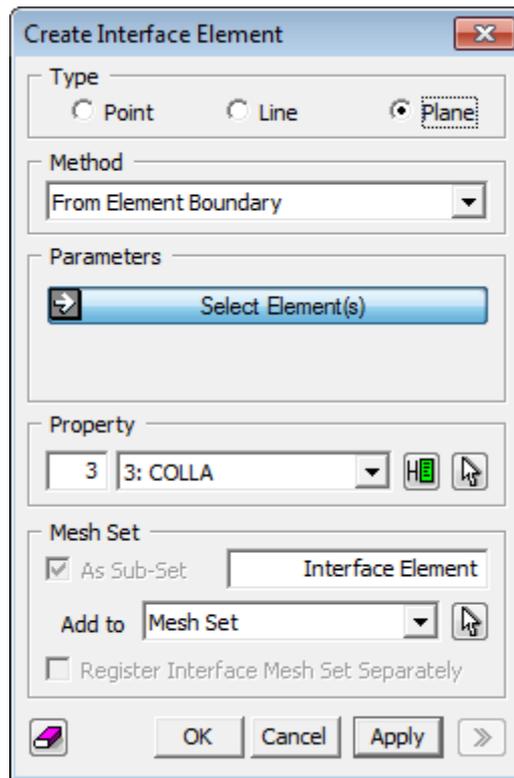


Figura 3.5.3 - Create Interface Element.

È possibile creare elementi di interfaccia in un punto , lungo una linea oppure lungo un piano, nel nostro caso poiché si sta effettuando un'analisi tridimensionale, si crea l'interfaccia su di un piano.

Nel caso trattato si è utilizzato il comando *From Element Boundary*.

Come detto all'inizio di questo capitolo, per questo modello sono stati ripresi tutti gli accorgimenti utilizzati nella prima parte del mio modello di base.

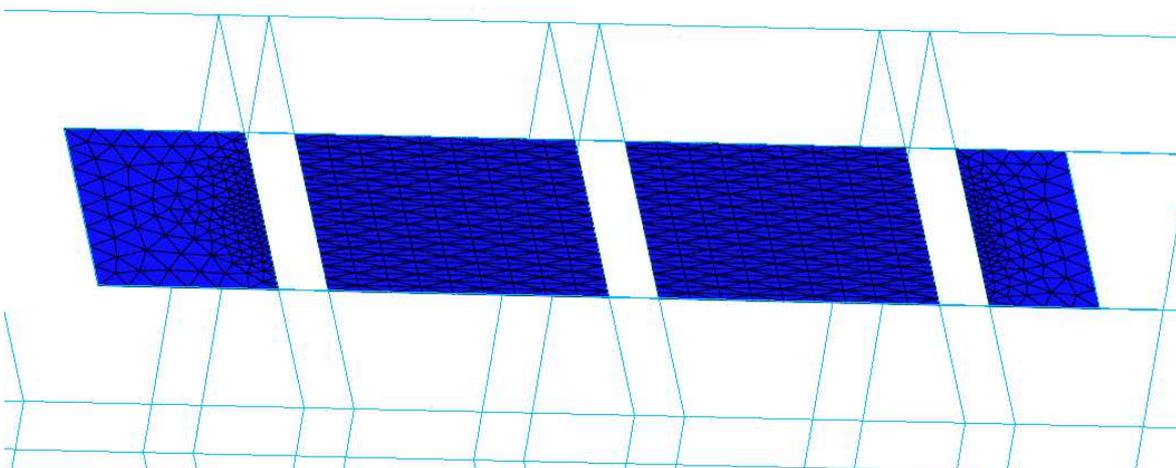


Figura 3.5.4 - Interfaccia mattone - lamina.

- **Interfaccia malta - FRP:** (figura 3.5.7)

Per questa interfaccia si è utilizzata la stessa legge *tau - slip* per la definizione del legame bond-slip dell'interfaccia, soltanto che si sono utilizzati parametri differenti.

È stata riportata di seguito la legge di interfaccia con i relativi parametri:

$$\tau(s_p) = \tau_{\max} \cdot \frac{s_p}{s} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s_p}{s}\right)^n}$$

in cui:

τ_{\max} rappresenta il valore massimo della tensione di interfaccia

\bar{s} indica il valore di scorrimento corrispondente alla tensione tangenziale τ_{\max}

n è un parametro che definisce il ramo di softening.

Nel caso della definizione del legame bond-slip da inserire per quanto riguarda la malta, sono state effettuate diverse analisi e diverse valutazioni sui risultati ottenuti da ciascuna analisi, il primo passo, più intuitivo è stato quello di applicare all'interfaccia malta-FRP, lo stesso legame che era stato utilizzato per il mattone, quindi quello mostrato in figura 3.5.2 con una tensione tangenziale di picco pari a $4MPa$, i risultati ottenuti da questa prima analisi hanno portato a dei risultati non aderenti alla realtà, soprattutto dal punto di vista del legame forza-spostamento, come è mostrato in figura 3.5.5.

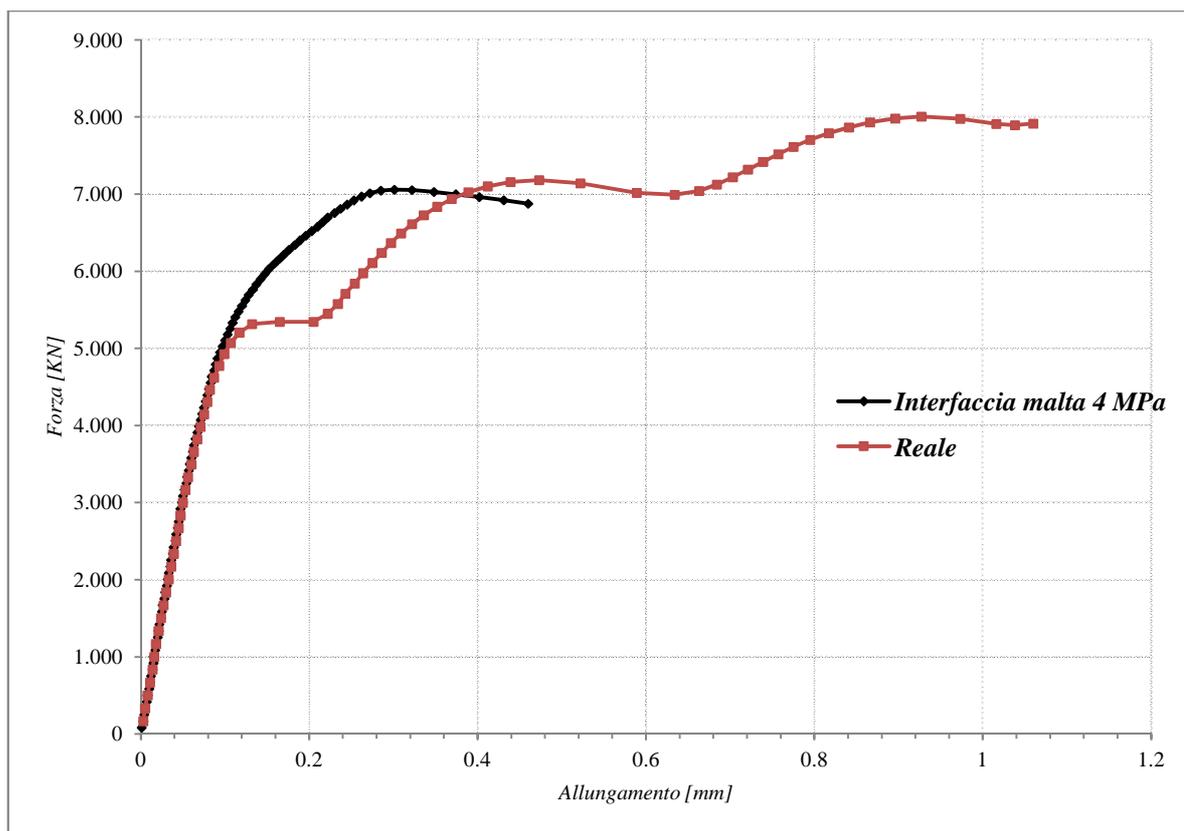


Figura 3.5.5 - F-u interfaccia malta/mattone – FRP uguali.

Il passo successivo quindi è stato quello di andare a valutare le tensioni tangenziali lungo l'interfaccia, e cercare di valutare un comportamento che rispecchiasse il vero ruolo della malta nel muretto.

Andando quindi a modificare questa interfaccia, si è arrivati alla soluzione, ovvero che la malta non fosse in grado di trasferire grandi sforzi, così come anche si era già capito dopo aver effettuato i modelli sperimentali, di conseguenza si è deciso di considerare la malta come un materiale che sostanzialmente non fosse in grado di trasferire sforzi considerevoli, tanto che il nuovo legame adottato dall'interfaccia, vedeva una tensione tangenziale di picco pari a $0,1 \text{ MPa}$.

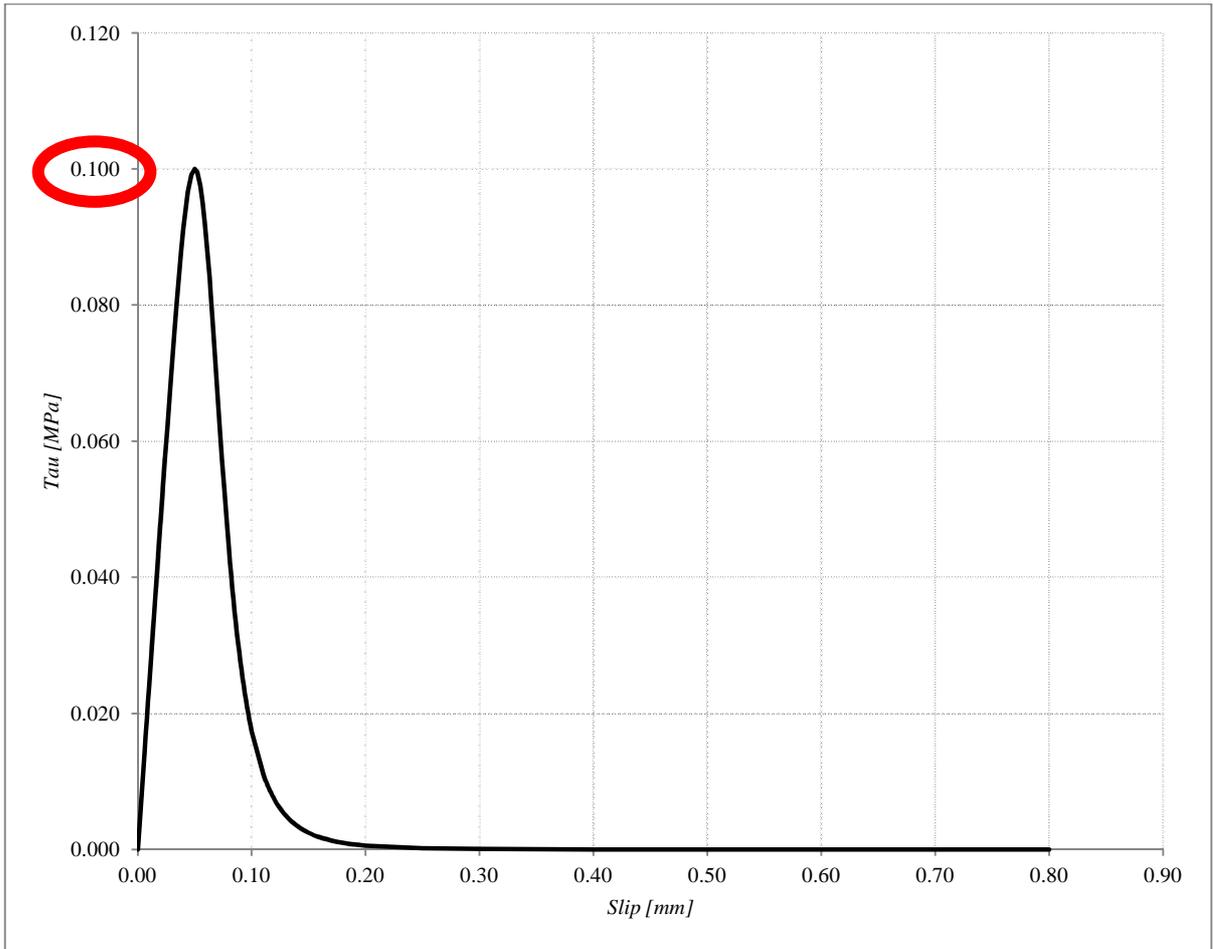


Figura 3.5.6 - Tau-slip malta - lamina.

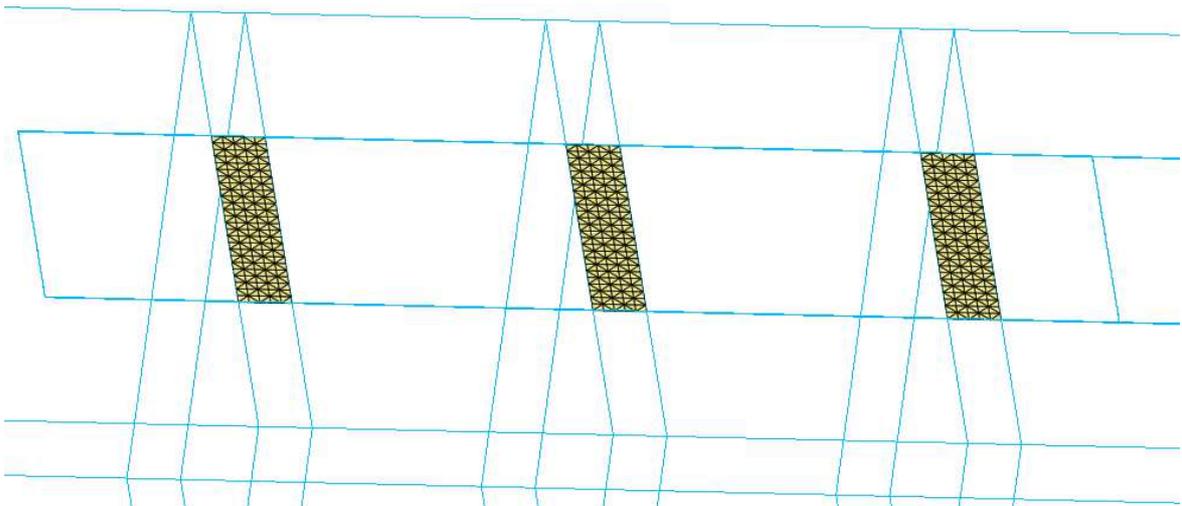


Figura 3.5.7 - Interfaccia malta - lamina.

Come passo finale per la rappresentazione dell'interfaccia malta-FRP, si è pensato, visto già lo scarso apporto dal punto di vista del trasferimento delle tensioni, di eliminare totalmente tale interfaccia, tale scelta ha comportato ovviamente una riduzione notevole dal punto di vista del costo computazionale dell'analisi, causa riduzione dei gradi di libertà del modello, tuttavia ciò è stato possibile dopo aver attentamente valutato il reale scarso contributo della malta, giustificato già dal fatto di aver inserito come tensione tangenziale di picco un valore pari a $0,1MPa$.

3.6 Vincolamento e condizioni di carico

3.6.1 Vincolamento

In questo paragrafo si fa riferimento al vincolamento che è stato inserito nel modello, quindi si andranno ad identificare i gradi di libertà delle diverse mesh create precedentemente; inoltre oltre alle condizioni di vincolo sono stati ovviamente applicati dei carichi al modello per poter valutare il comportamento non lineare.

Nella figura sottostante verranno sottolineati i diversi ritegni inseriti nel modello sperimentale, ovviamente nel trasferirli al modello numerico sono stati osservati diversi accorgimenti.

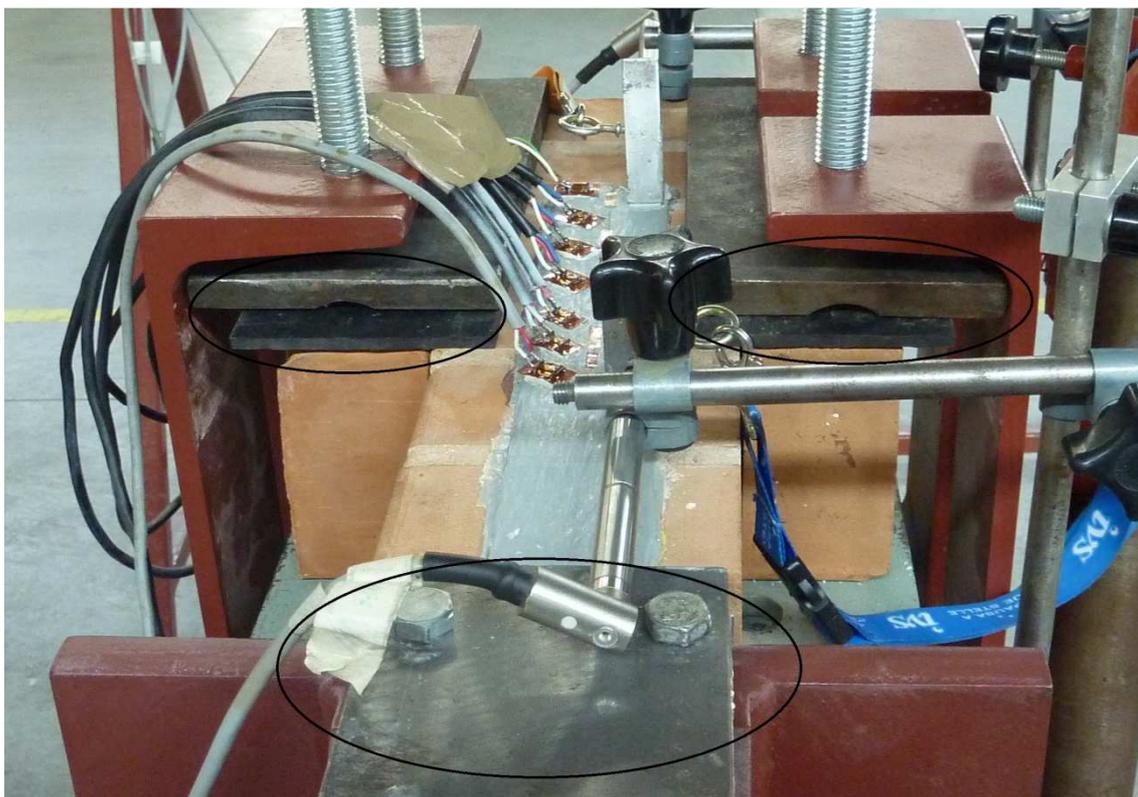


Figura 3.6.1.1 - Vincolamento.



Figura 3.6.1.2 - Particolare vincolamento anteriore e di base.

È quindi possibile vedere nelle *figure 3.6.1.1 e 3.6.1.2*, che il vincolamento è del tutto uguale a quello già effettuato nel modello A, con l'unica differenza che, applicando i vincoli in corrispondenza dei nodi della mesh, in questo caso avremo molti più nodi vincolati, a causa del considerevole aumento dei nodi del modello.

Quindi avremo i seguenti vincoli:

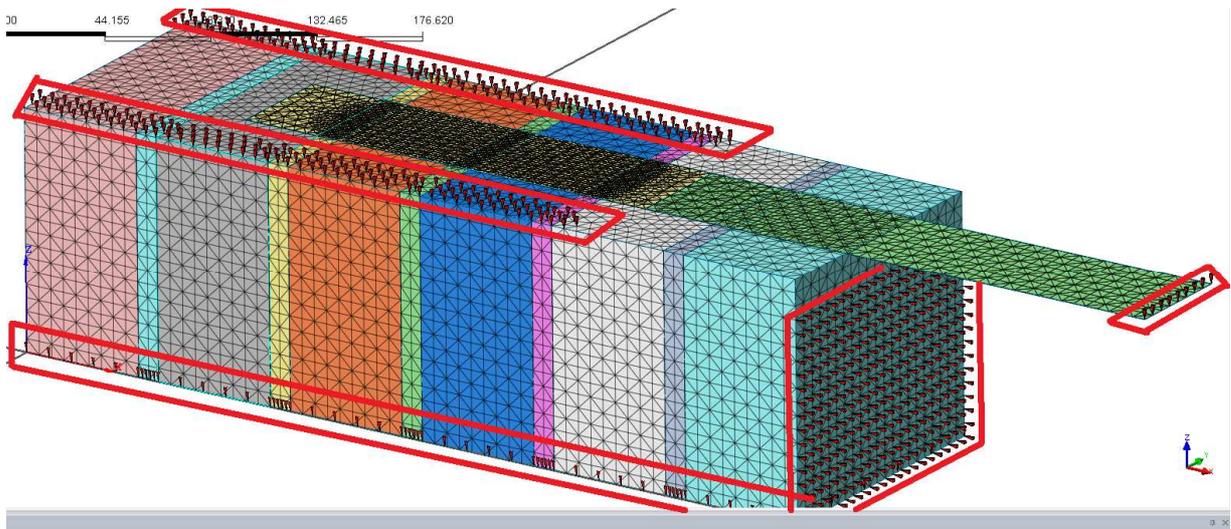


Figura 3.6.1.3 - Vincolamento modello B.

Un vincolo alla base per impedire le traslazioni lungo la direzione z , secondo il sistema di riferimento in *figura 3.6.1.4*, un vincolo in direzione delle traslazioni in x , due vincolamenti nella porzione superiore del muretto posti a partire dall'ascissa 0 fino ad arrivare in corrispondenza di circa 2cm prima della fine dell'interfaccia per impedire le traslazioni lungo la z , ed infine un vincolo in direzione z per evitare i movimenti dell'estremità della lamina.

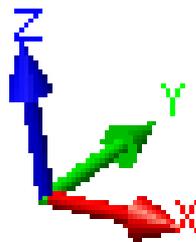


Figura 3.6.1.4 - Sistema di riferimento.

Seguendo quindi lo stesso percorso già mostrato in precedenza per il primo modello di calcolo, *Analysis > BC > Constraint* (tasto rapido ) , vengono applicati i vincoli al modello numerico.

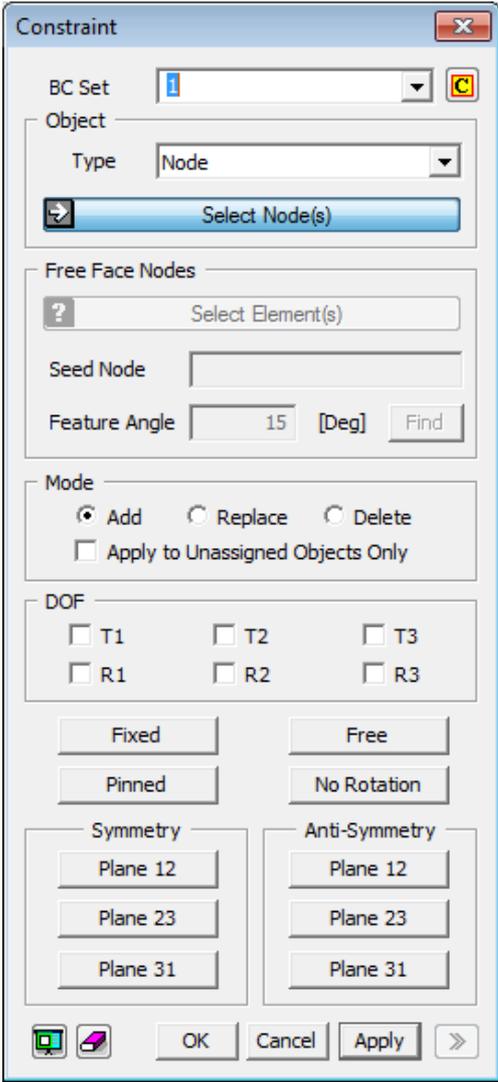


Figura 3.6.1.5 - Constraint.

3.6.2 Load Set

In questo paragrafo sono riportate tutte le indicazioni adottate per descrivere al meglio il carico applicato al modello.

Ovviamente, come per tutta la durata della tesi si è fatto riferimento alle indicazioni che sono state fornite dalla campagna sperimentale.

L' applicazione del carico dal punto di vista sperimentale segue lo stesso procedimento di quella del modello A, quindi con stesso carico applicato, stessa cella di carico, e stesso sistema di lettura dei risultati.

Anche dal punto di vista numerico, si seguono le stesse linee del primo modello, sia come carico applicato, che come modalità di applicazione del carico, quindi 2mm applicati per step di carico, in corrispondenza dell' estremità della lamina, in direzione x .

Si ricorda che il comando necessario all'applicazione del carico segue il seguente percorso *Analysis > Load > Displacement*.

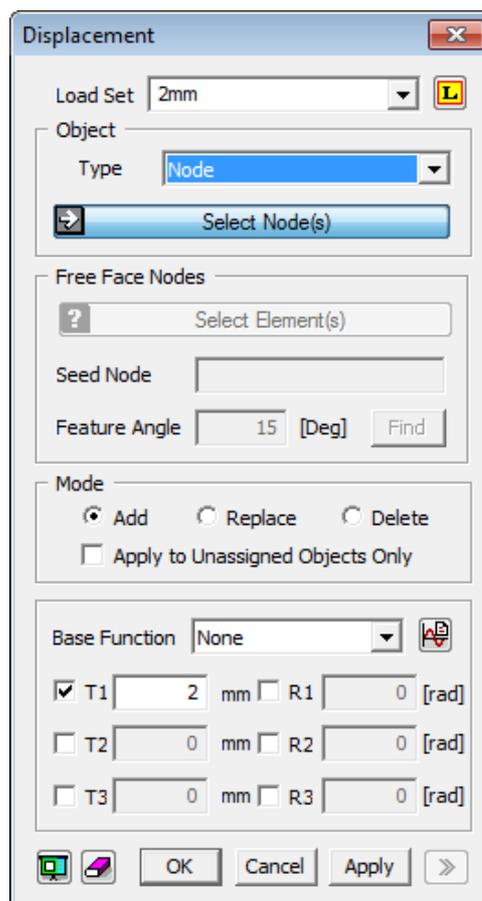


Figura 3.6.2.1- Load Set.

Come mostra la figura in alto, allo stesso modo dell'applicazione del vincolamento, bisogna scegliere se applicare il carico sui nodi o sulla superficie, nel nostro caso è stato applicati ai nodi sulla parte anteriore della lamina (*figura 3.6.2.2*).

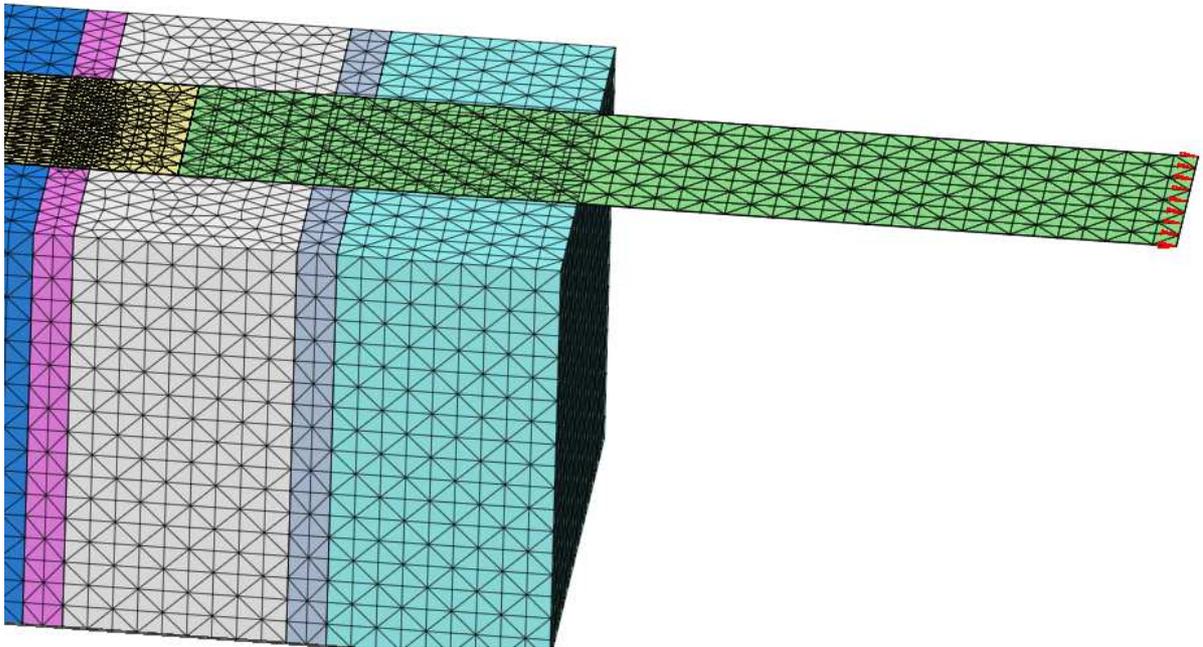


Figura 3.6.2.2- Load Set.

Così come per i vincoli anche per quanto riguarda il carico, viene ripresa la convenzione delle direzioni $1,2,3$ invece che x,y,z , e la notazione T , e R , quindi bisogna inserire i valori adatti nella casella giusta ricordando il segno $+$ o $-$ a seconda che i carichi siano applicati in direzione concorde o discorde alle tre direzioni.

Successivamente, dopo aver effettuato le prime analisi non lineari, è stato opportuno andare a modificare il valore dello spostamento applicato, in modo tale da spingere l'analisi oltre, e valutare ciò che succedeva, quindi come carico in definitiva si è assunto un valore pari a $4mm$, rimangono comunque invariate le modalità e le zone di applicazione dello stesso.

3.7 *Analisi non lineare*

Per quanto riguarda concetti puramente teorici riguardanti l'analisi non lineare si riporta al *paragrafo 2.7*, in cui sono indicate le principali differenze tra un'analisi non lineare ed una lineare, specificando in particolare le possibilità non linearità (*geometriche , del materiale*). In questo paragrafo saranno riportate quindi soltanto alcune indicazioni che potrebbe essere utile avere in più rispetto a quanto già detto nel *paragrafo 2.7*.

L'analisi attraverso il programma di calcolo Midas Fea è possibile seguendo il percorso *Analysis > Analysis Case > Add*, in cui è possibile aggiungere un caso di analisi (*Figura 3.7.1*).

In questa schermata è possibile come mostrato dal menù a tendina inserire diverse tipologie di analisi tra cui una *Linear Static, Linear Buckling* ecc.

Le analisi svolte durante questo lavoro di tesi sono tutte analisi non lineari statiche, quindi selezionato cliccando sull'opzione *Nonlinear Static*.

Un passo fondamentale risulta essere quello sotto indicato con *Add to or Modify*, in cui bisogna selezionare dalle caselle A quello che interessa sviluppare durante l'analisi, e trasferirlo nella sezione B, nel nostro caso quindi sono state selezionate tutte le mesh create, tutti i vincolamenti e tutti i carichi.

Ciò consente di creare un certo tipo di modello nella finestra principale di Midas Fea, ma allo stesso tempo di andare ad analizzare ad esempio solamente una porzione di esso, oppure è possibile applicare diversi carichi contemporaneamente, ma andare ad effettuare analisi del tutto separate per ogni carico.

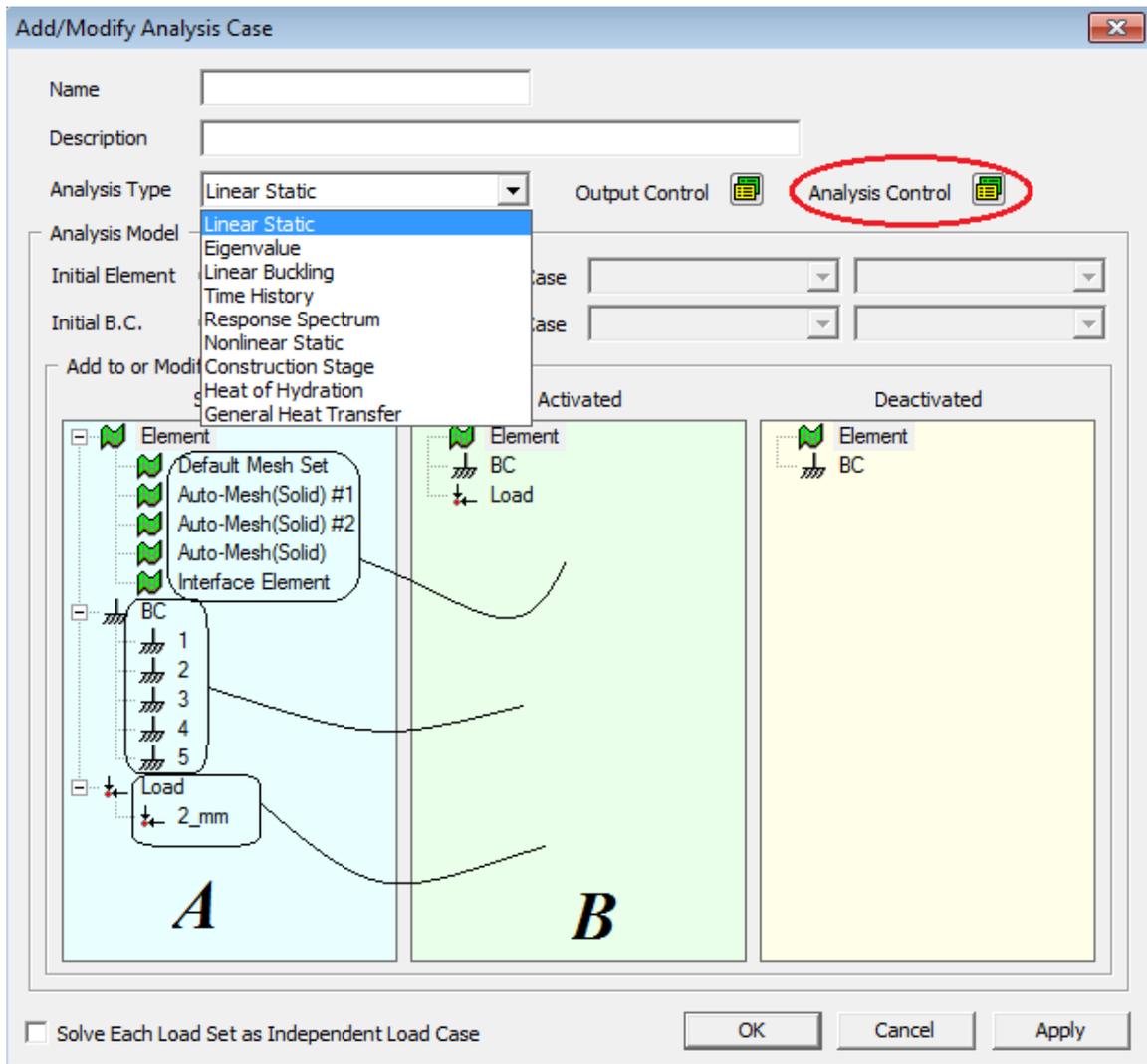


Figura 3.7.1- New Analysis Case.

Dopo che è stato deciso il tipo di analisi che si vuole effettuare, cliccando sul tasto *Analysis control*, si apre una schermata riportata in *figura 3.7.2* in cui è possibile settare i parametri dell'analisi da effettuare.

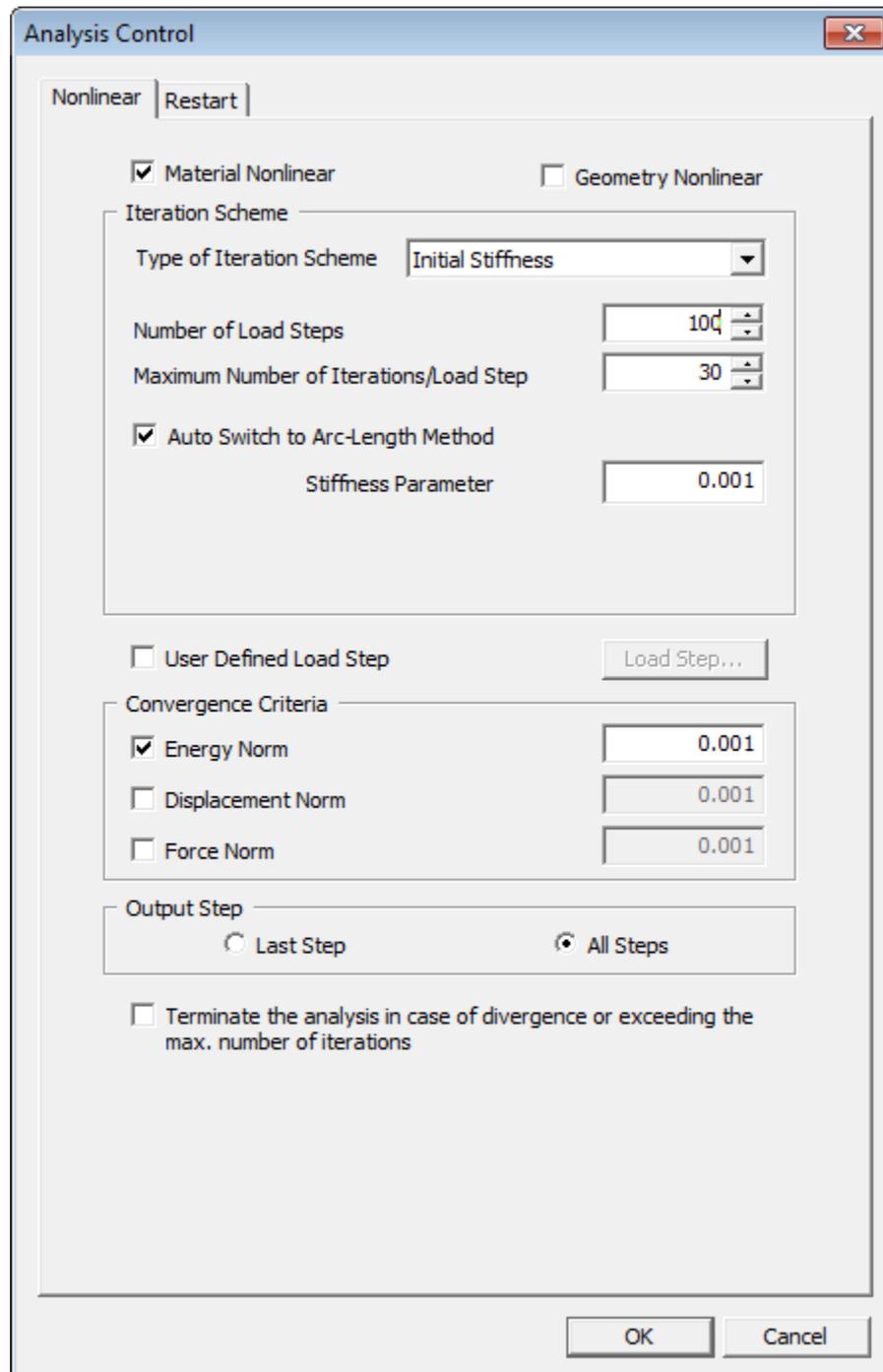


Figura 3.7.2 Analysis Control.

In particolare bisogna decidere se prendere in considerazione sia la non linearità geometrica che la non linearità del materiale (per semplicità di analisi è stata presa in considerazione soltanto la non linearità dei materiali), scegliere il tipo di metodo per l'analisi non lineare, che come spiegato in precedenza risulta essere il metodo *Initial Stiffness Method* con l' *Auto Switch* al metodo *Arc – Length*, inoltre bisogna decidere il numero step con cui applicare il carico (nel nostro caso 100), il numero massimo di

iterazioni per step (30), il parametro di rigidezza oltre cui il metodo passa dallo *Initial Stiffness* all' *Arc – Length*, ed infine scegliendo il criterio di convergenza si inserisce il parametro di convergenza.

Una volta settati tutti questi parametri è possibile effettuare l'analisi vera e propria del nostro modello *Analysis > Solve* (tasto rapido ).

È possibile come si vede in *figura 3.7.3*, seguire passo per passo l'analisi del modello, e quindi avere sotto controllo grazie alla finestra *Output*, il passo che si sta analizzando il numero di iterazione per passo, e il valore del criterio di convergenza scelto, nel nostro caso la *Energy norm*.

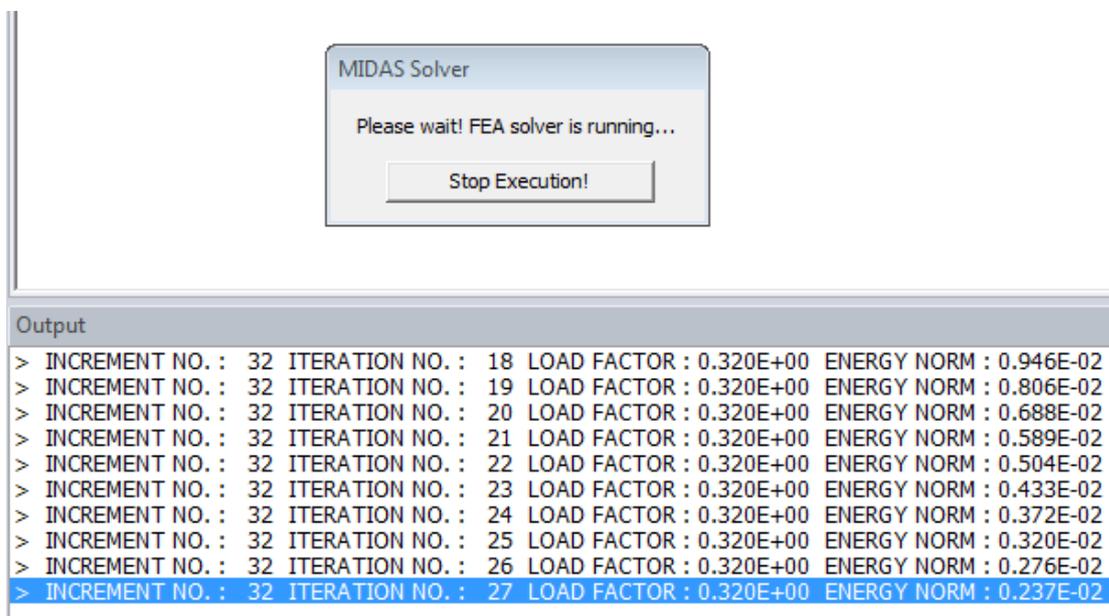


Figura 3.7.3- Output.

3.8 Elaborazione ed analisi dei risultati numerici

In questo paragrafo verranno mostrati tutti i risultati ottenuti effettuando l'analisi non lineare del modello B, mostrato in tutti i suoi dettagli nei precedenti paragrafi, in particolare verranno ripresi, come già è stato fatto de situazioni trattate nella tesi di Alessandro Bellini, nello specifico verranno confrontati i risultati ottenuti con il modello numerico sviluppato in questa tesi, con i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale intrapresa dallo stesso, presso il laboratorio Larm in via Terracini.

I risultati ottenuti attraverso l'analisi sono raccolti nella sezione *Post - Works*, in ordine di incrementi di carico; è possibile visualizzare i diversi risultati per le diverse caratteristiche tensionali e deformative (figura 3.8.1).

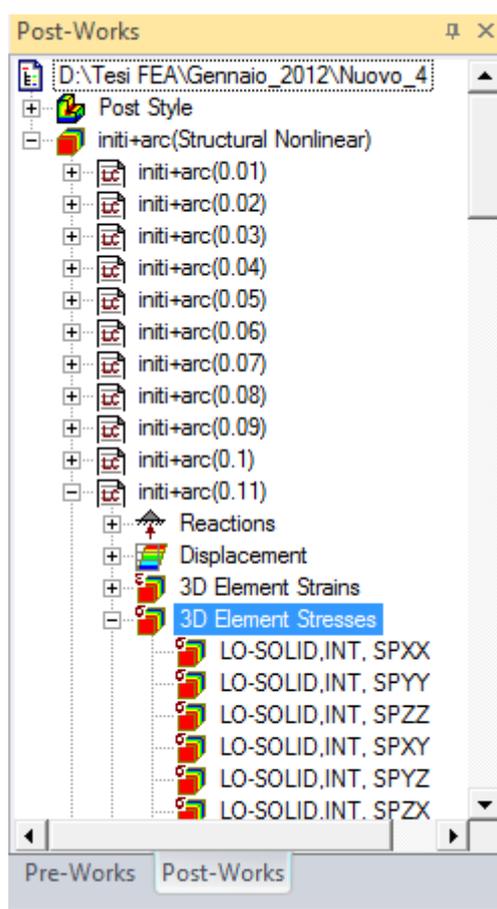


Figura 3.8.1 - Post-Works.

Uno dei primi parametri che è stato analizzato è la tensione σ_{xx} , in particolare la tensione in corrispondenza della lamina, dal punto di vista numerico, questo valore di tensione viene ricavato interrogando la schermata *Post-Works* mostrata in *figura 3.8.1*, alla voce *3D Element Stresses > LO-SOLID-SPXX*.

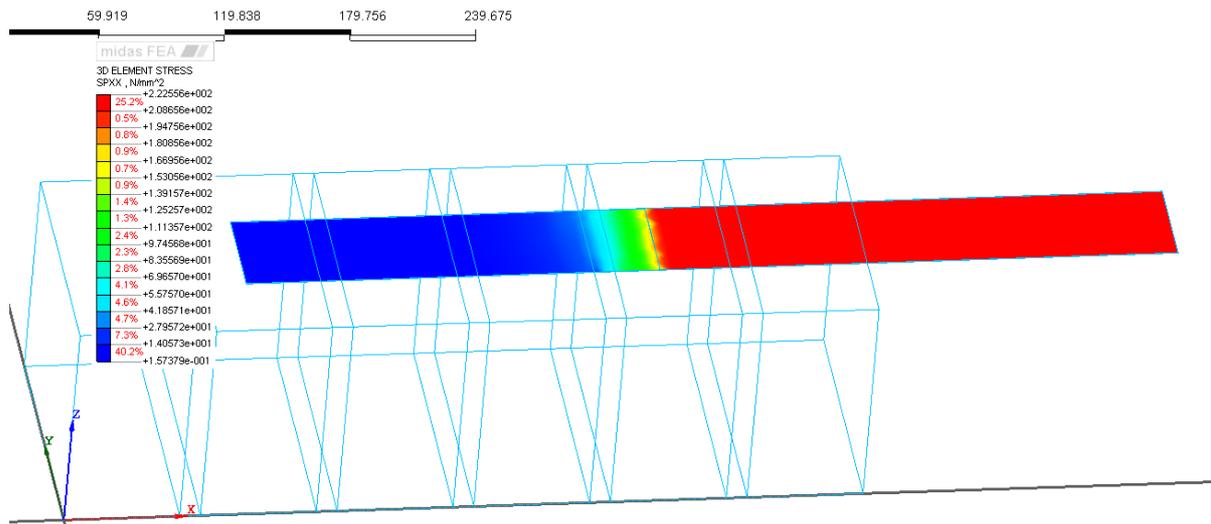


Figura 3.8.2 - LO-SOLID-SPXX.

Come si può ben vedere dalla figura, l'andamento delle tensioni, è conforme a quello che ci si aspettava, ovvero grandi valori di tensioni in corrispondenza dell'estremità della lamina fino al punto di inizio dell'interfaccia, in cui il valore delle tensioni decade, come si vede anche dalla *figura 3.8.3*, in quanto c'è un trasferimento di sforzo dalla lamina verso il mattone o la malta a seconda della posizione scelta.

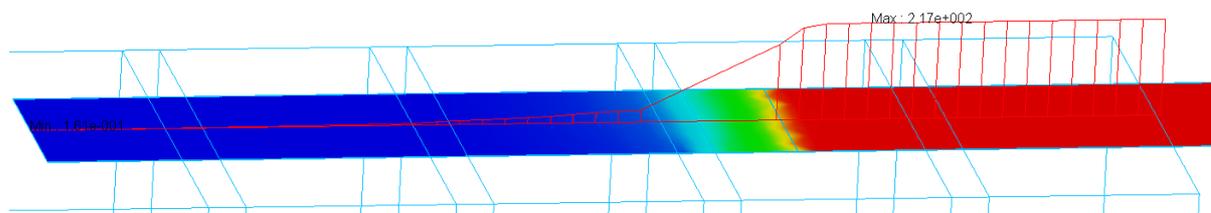


Figura 3.8.3 - LO-SOLID-SPXX, On Curve Diagram.

Lo stesso andamento tensionale, si era ottenuto con il primo modello numerico esposto al capitolo precedente, con l'unica differenza di avere valori differenti di tensione poiché si tratta di due modelli diversi.

Vengono riportate di seguito alcune figure, riguardanti tutte lo stesso passo di carico, che mostrano a seconda del livello di particolarità l'andamento delle tensioni SPXX, lungo il mattone, la malta, e in corrispondenza dell'interfaccia.

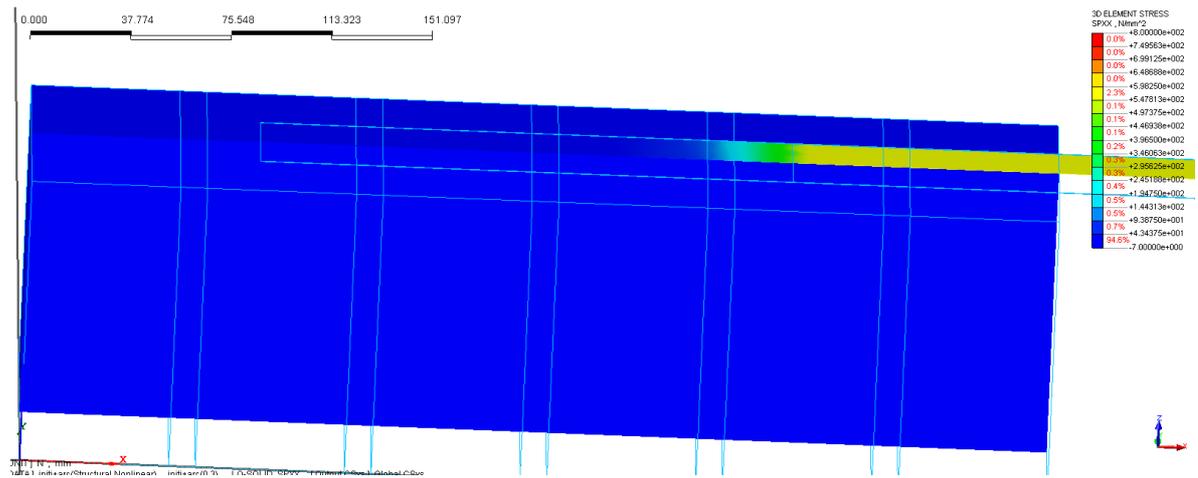


Figura 3.8.4 - LO-SOLID-SPXX.

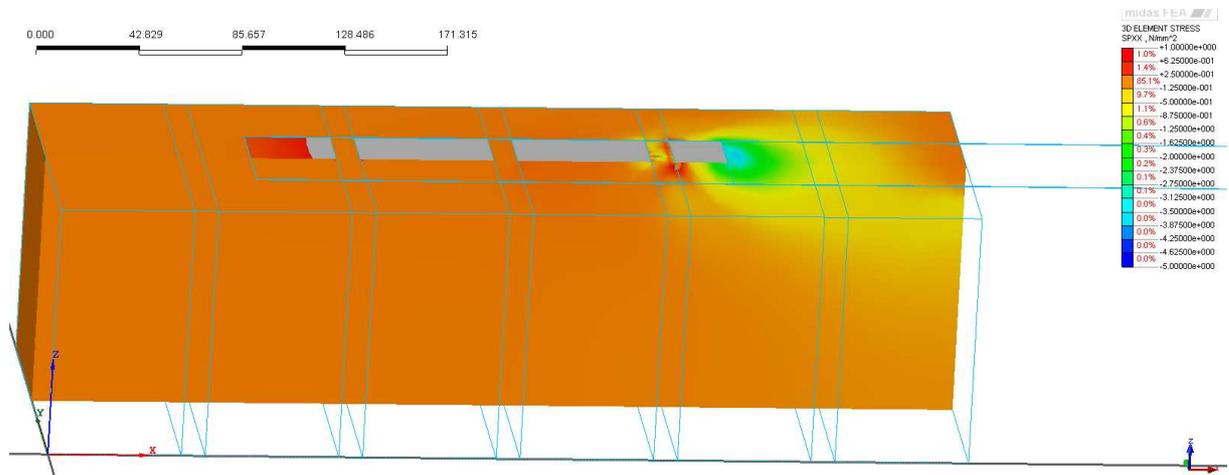


Figura 3.8.5 - LO-SOLID-SPXX.

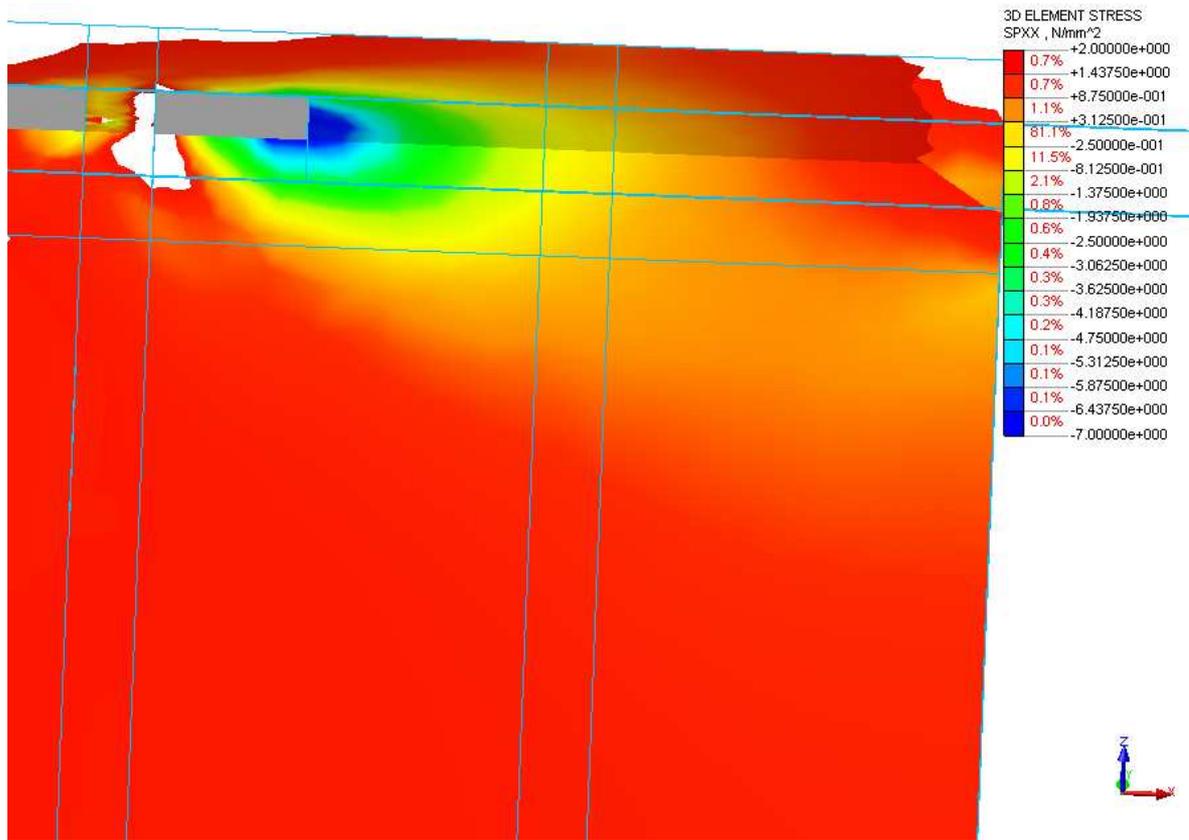


Figura 3.8.6 - Particolare tensioni SPXX.

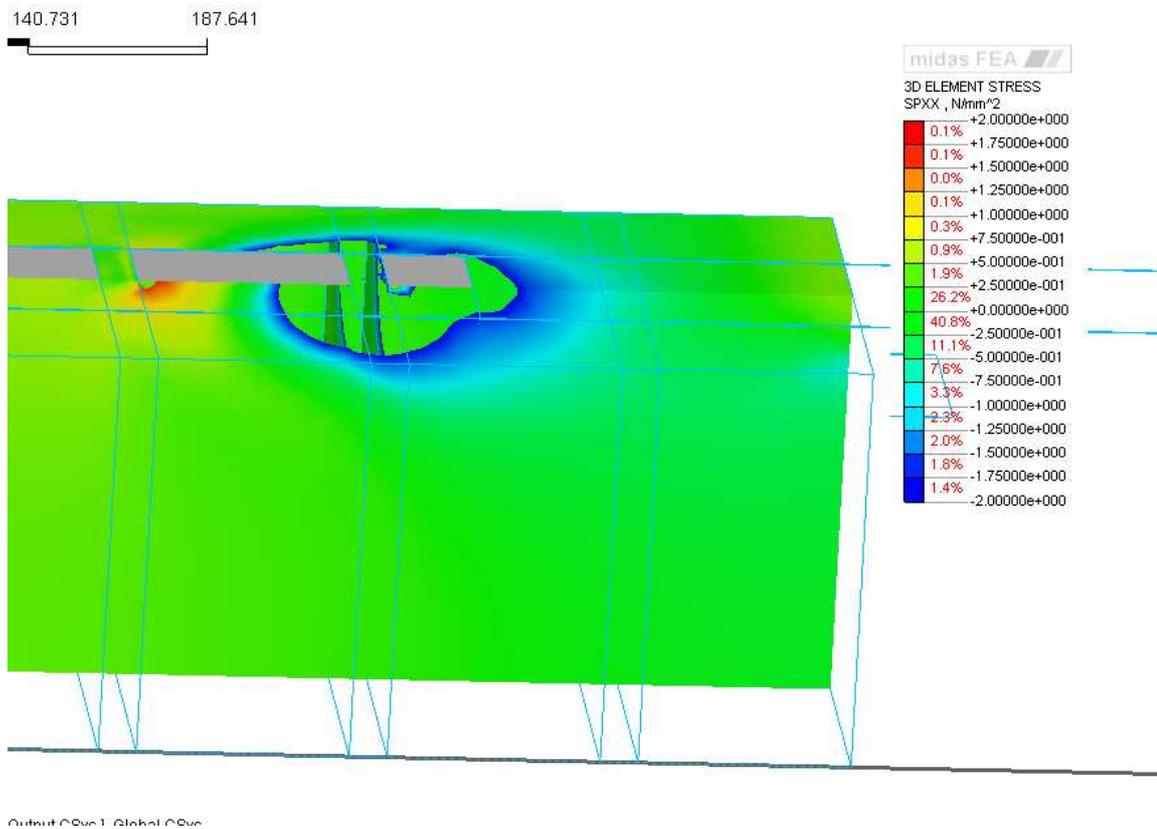


Figura 3.8.7 - Particolare tensioni SPXX.

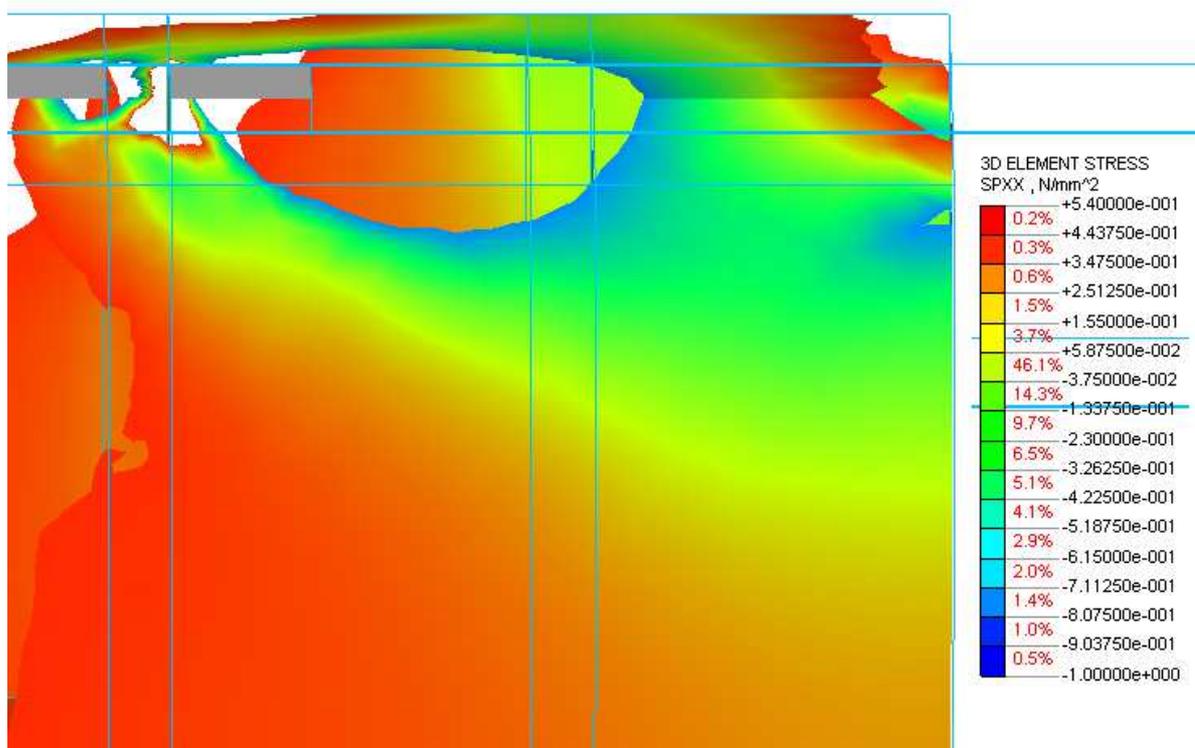


Figura 3.8.8 - Particolare tensioni SPXX.

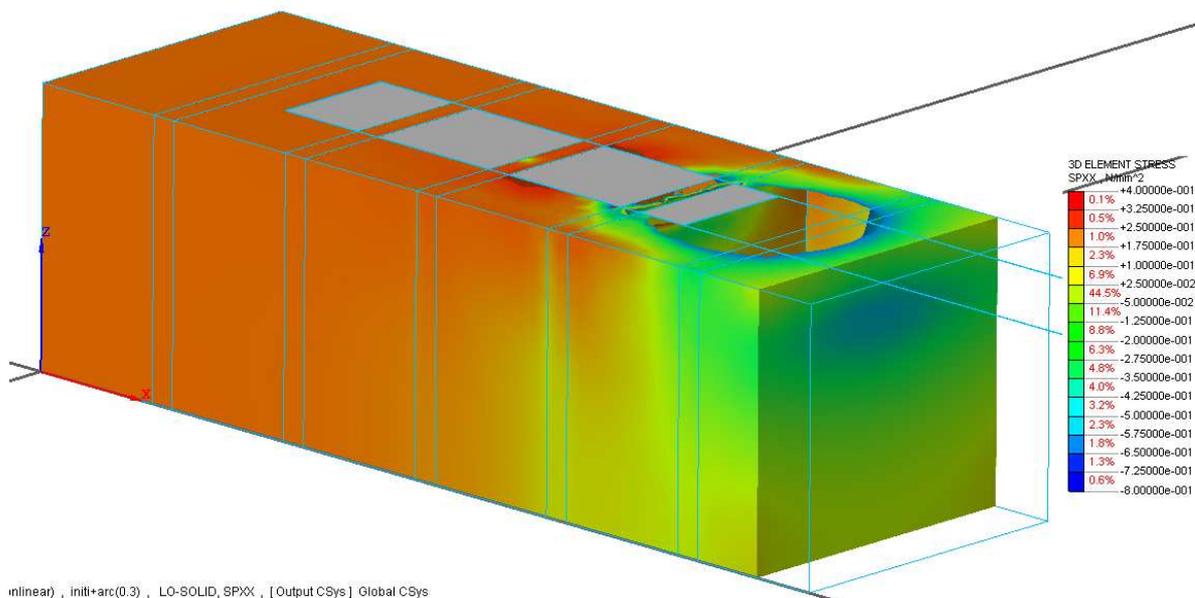


Figura 3.8.9 - Particolare tensioni SPXX.

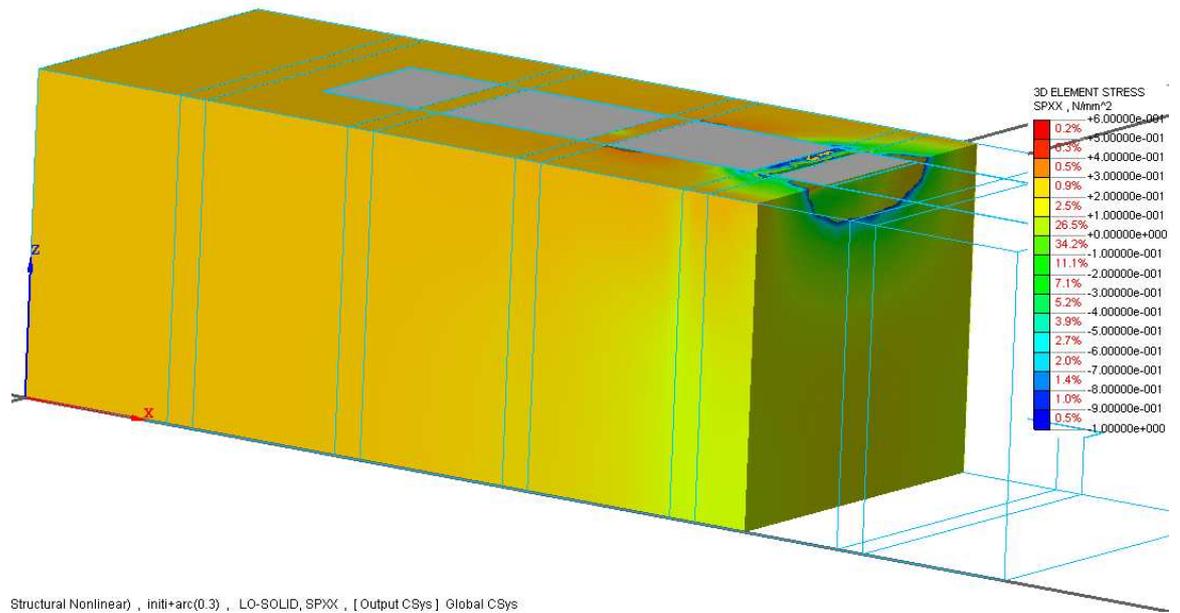


Figura 3.8.10 - Particolare tensioni SPXX.

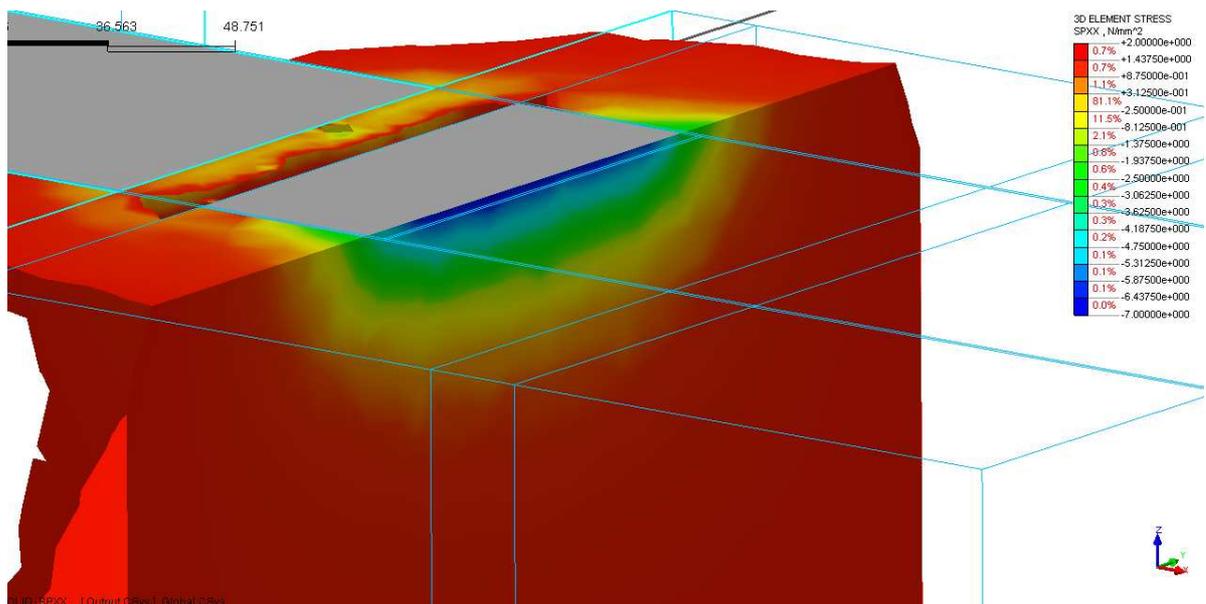


Figura 3.8.11 - Particolare tensioni SPXX.

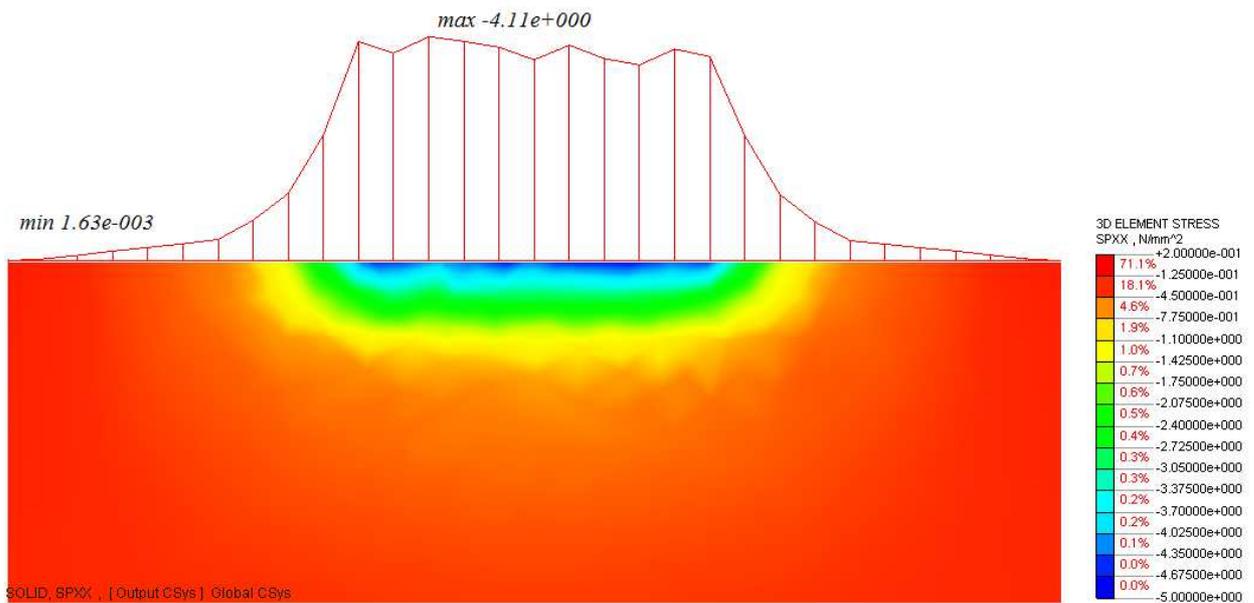


Figura 3.8.12 - Particolare tensioni SPXX.

Uno dei primi aspetti affrontati per il confronto dei risultati con il modello sperimentale, è quello della valutazione del diagramma *Forza – Allungamento*, in cui per forza si intende la forza risultante dai 4mm di carico che sono stati applicati lungo la faccia anteriore della lamina, mentre per allungamento si intende l’allungamento della lamina a partire dall’inizio dell’interfaccia, calcolabile come differenza di spostamento lungo x tra il punto A ed il punto B (figura 3.8.13).

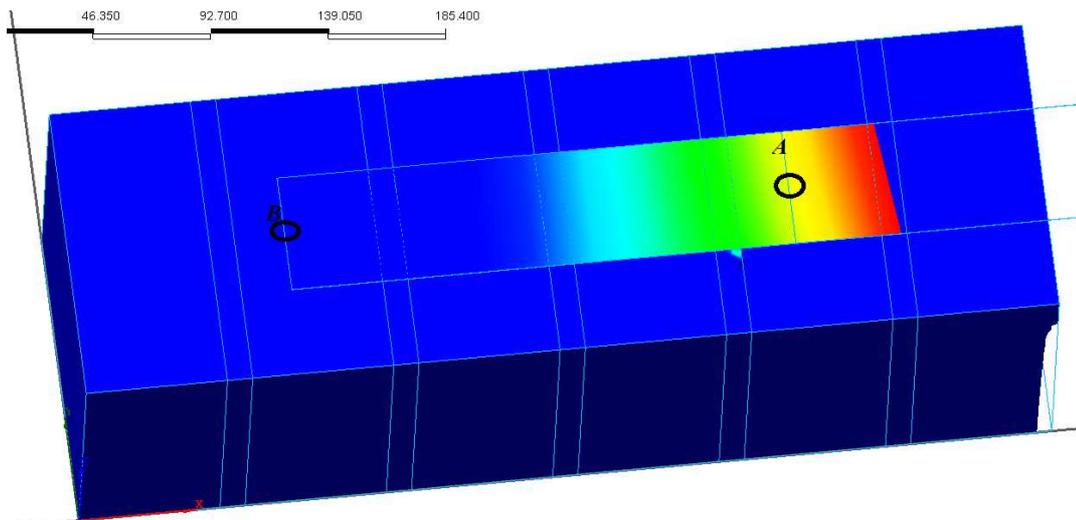


Figura 3.8.13- Allungamento.

Sono stati quindi estrapolati attraverso la funzione *Post > Extract Result*, i valori della forza in corrispondenza della faccia anteriore della lamina, per ogni step di carico, così come per il modello precedentemente esposto.

Uno schema riassuntivo dei dati necessari per la costruzione del diagramma Forza-Allungamento è riportato sotto, vengono riportati a titolo di esempio solamente i dati relativi ai primi 10 step di carico.

In particolare è doveroso dire come il valore della forza che viene riportato risulta ovviamente essere la somma di tutte le forze puntuali valutate all'estremità della lamina.

<i>Inizio FRP</i>	<i>Fine FRP</i>	<i>Allungamento [mm]</i>	<i>Forza [N]</i>
0.003	0	0.003	168.235
0.005	0	0.005	334.657
0.008	0	0.008	501.632
0.011	0	0.011	668.670
0.014	0	0.014	835.677
0.017	0.001	0.016	1.002.655
0.019	0.001	0.018	1.169.571
0.022	0.001	0.021	1.336.450
0.025	0.001	0.024	1.503.312
0.028	0.001	0.027	1.670.062
0.031	0.001	0.03	1.836.792
0.034	0.001	0.033	2.003.388
0.037	0.001	0.036	2.169.804
0.04	0.001	0.039	2.336.151
0.043	0.001	0.042	2.502.374

Tabella 3.8.1- Risultati analisi.

Ora avendo a disposizione sia i valori della forza che i valori dell'allungamento ad ogni step di carico è possibile creare il grafico attraverso un semplice foglio Excel.

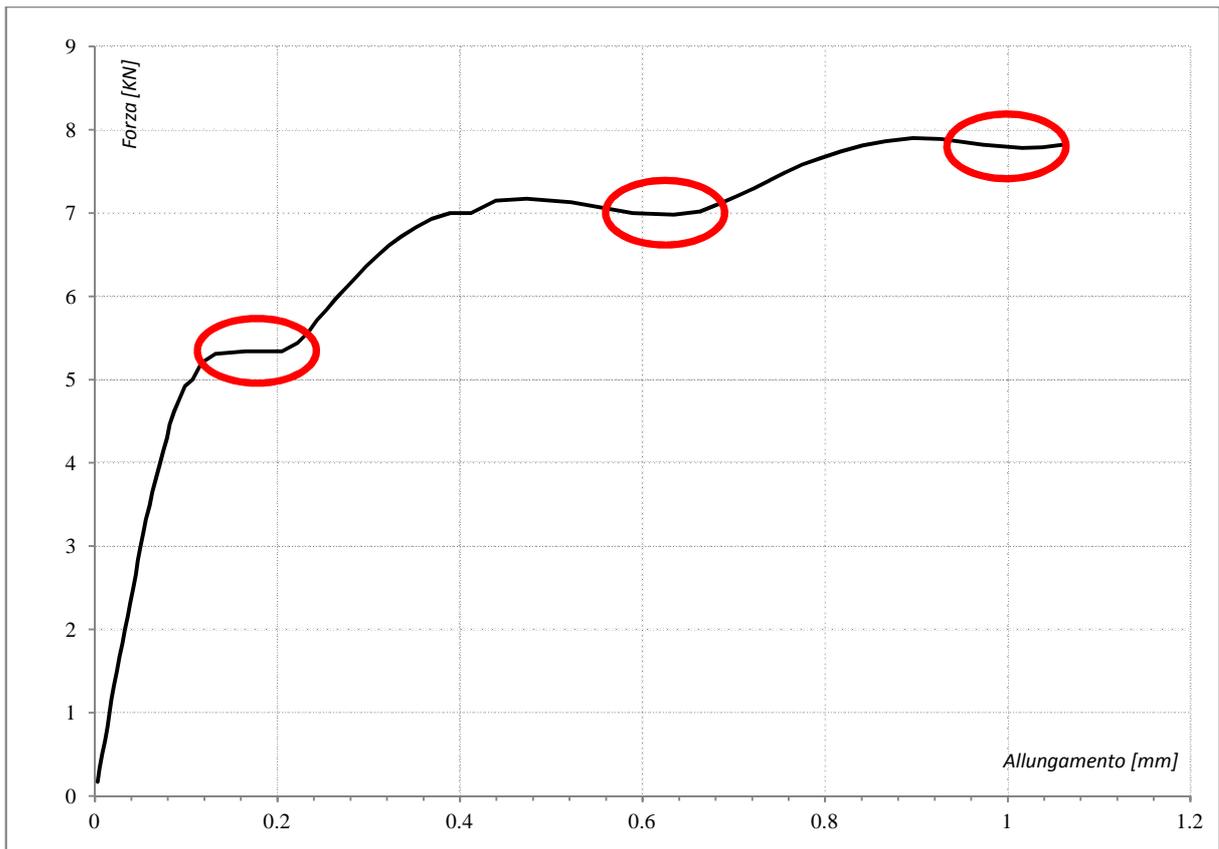


Figura 3.8.14 - *Diagramma Forza – Allungamento modello numerico.*

Come detto all'inizio di questo paragrafo, l'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di confrontare i risultati ottenuti con il modello numerico e quelli ottenuti con il modello sperimentale, quindi ora il passo successivo è quello di riprendere lo stesso diagramma forza allungamento che è stato ricavato durante le analisi sperimentali.

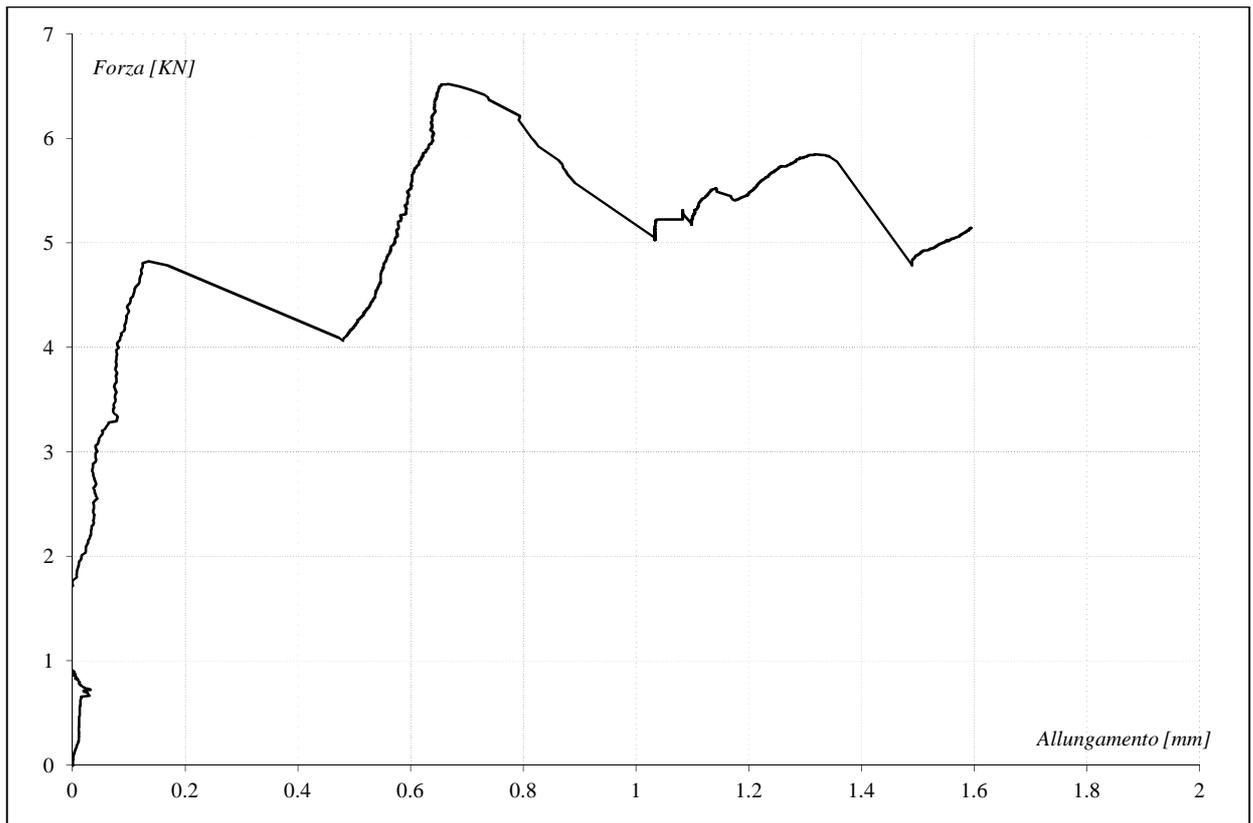


Figura 3.8.15 - Diagramma Forza – Allungamento modello sperimentale.

Viene quindi mostrata la *figura 3.8.16*, in cui è possibile avere un confronto diretto dei grafici $F-u$.

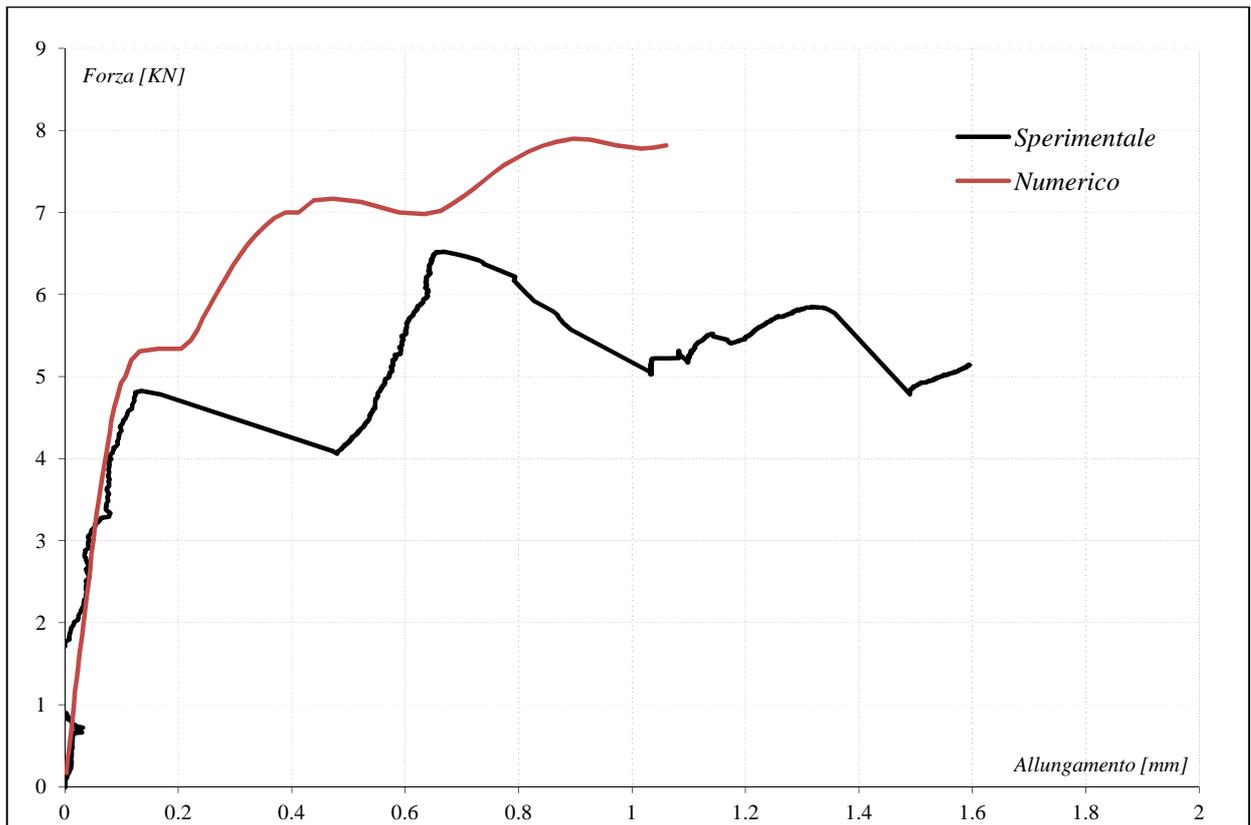


Figura 3.8.16 - Diagramma Forza – Allungamento confronto

Come si vede dalle *figura 3.8.14*, è possibile vedere in maniera chiara, come ci sia un salto proprio in corrispondenza dei letti di malta, così come anche era successo dal punto di vista sperimentale.

Questo aspetto del diverso comportamento sui letti di malta non è stato possibile vederlo nel *grafico 3.5.5*, che rappresentava sempre il diagramma *forza-spostamento*, ma con l'utilizzo di un uguale interfaccia sia per il mattone che per la malta, in questo caso invece è possibile vedere questo aspetto, quindi ciò rappresenta un ulteriore giustificazione al fatto di aver utilizzato come legame bond-slip per la malta quello caratterizzato da una tensione massima di picco pari a *0,1MPa*.

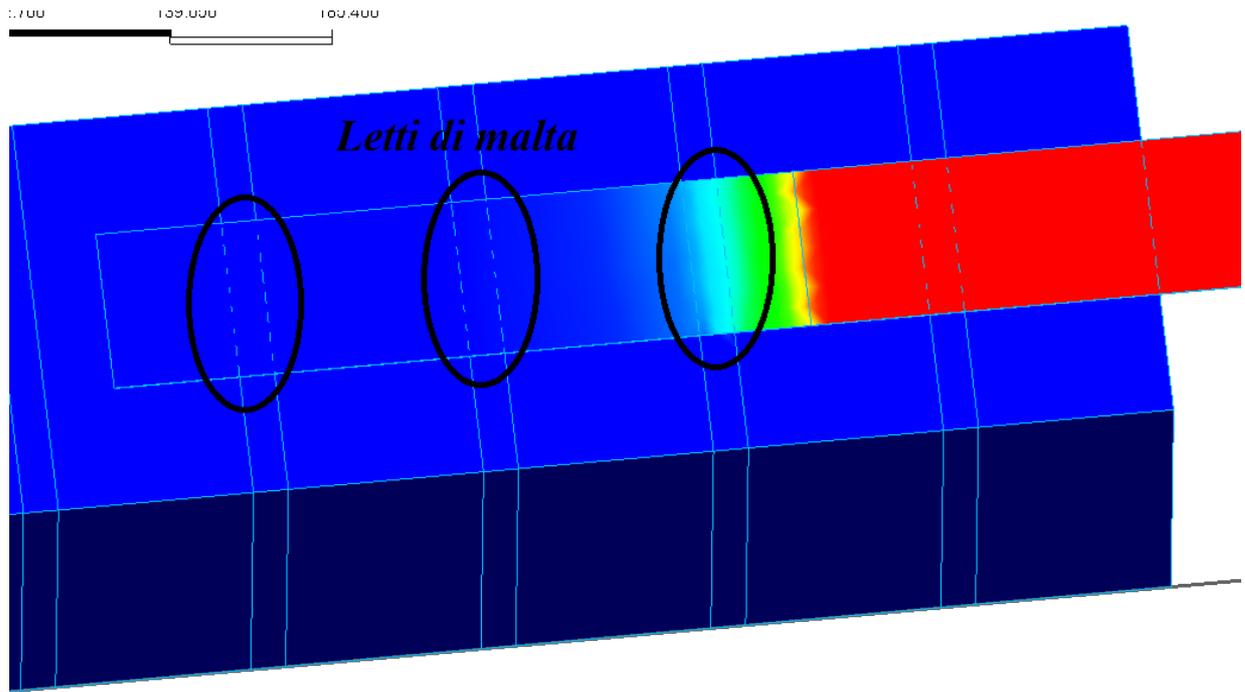


Figura 3.8.17 - Particolare letti di malta.

Dopo aver visto e confrontato i diagrammi $F-u$ del modello numerico e del modello sperimentale, è possibile andare a valutare quello che accade dal punto di vista delle tensioni tangenziali lungo l'interfaccia sia mattone-FRP che malta-FRP.

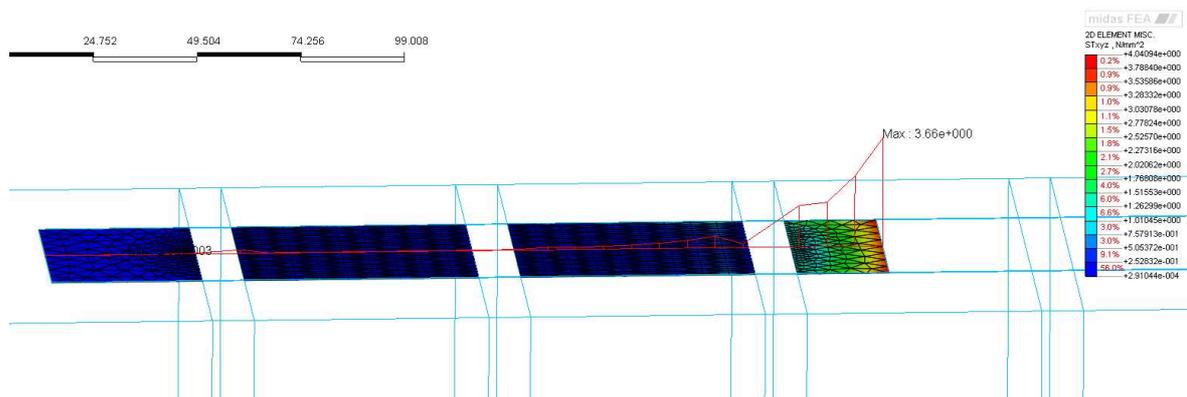


Figura 3.8.18 - Tensioni tangenziali lungo l'interfaccia.

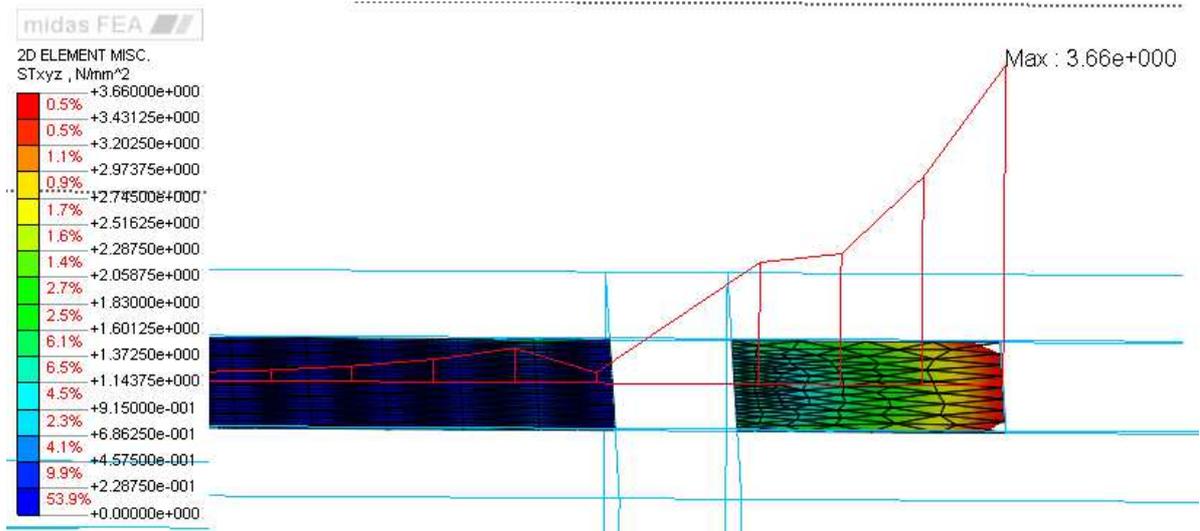


Figura 3.8.19 - Tensioni tangenziali lungo l'interfaccia (passoA).

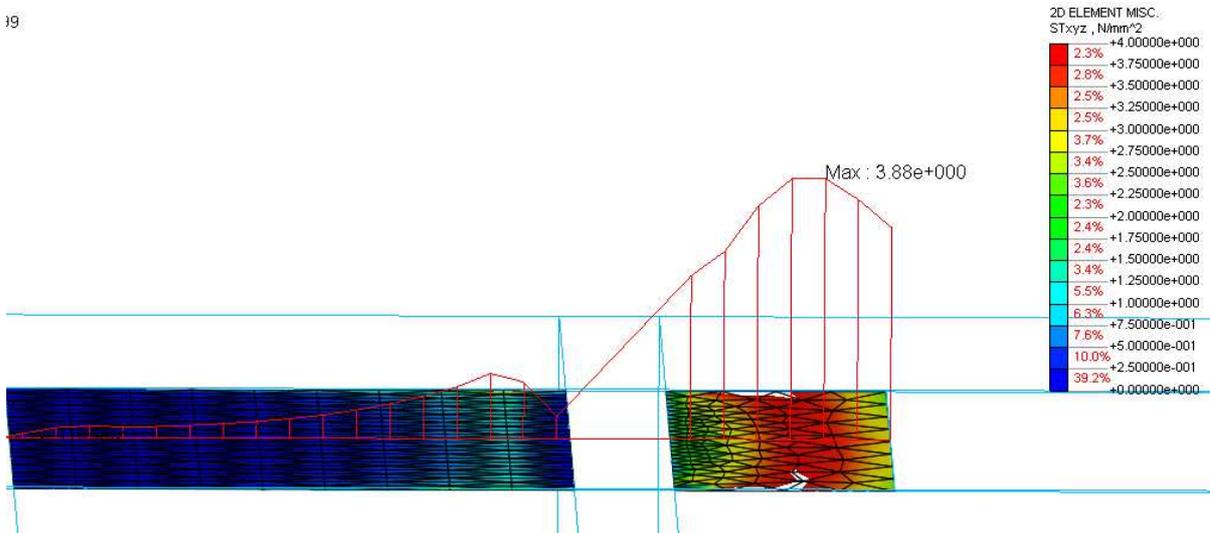


Figura 3.8.20 - Tensioni tangenziali lungo l'interfaccia (passoB).

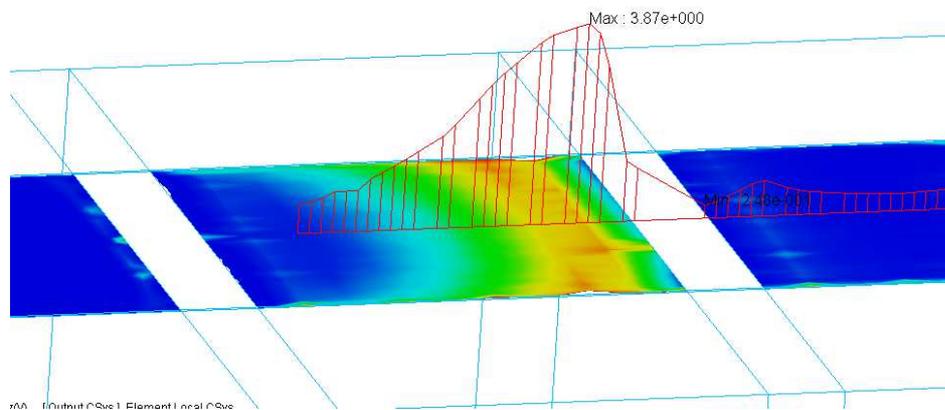


Figura 3.8.21 - Tensioni tangenziali lungo l'interfaccia (passoC).

Nelle *figure 3.8.19-3.8.20 e 3.8.21*, sono state mostrate le tensioni tangenziali lungo l'interfaccia, in particolare le figure si riferiscono a tre passi differenti di carico, rispettivamente, il passo A, si riferisce ad un passo in corrispondenza del quale non si è ancora raggiunto il picco delle tensioni tangenziali ($4MPa$) all'inizio della lamina, ragion per cui l'andamento è ancora quello parabolico.

La figura rappresentante il passo B, si riferisce ad un momento in cui il picco è stato raggiunto, e la tipica forma a campana si sta iniziando a trasferire lungo la lamina, infine il passo C, come mostrato anche in *figura 3.8.22* rappresenta un passo in corrispondenza del quale il picco si è trasferito lungo la seconda porzione di mattone, quindi tutto ciò che precede già è staccato.

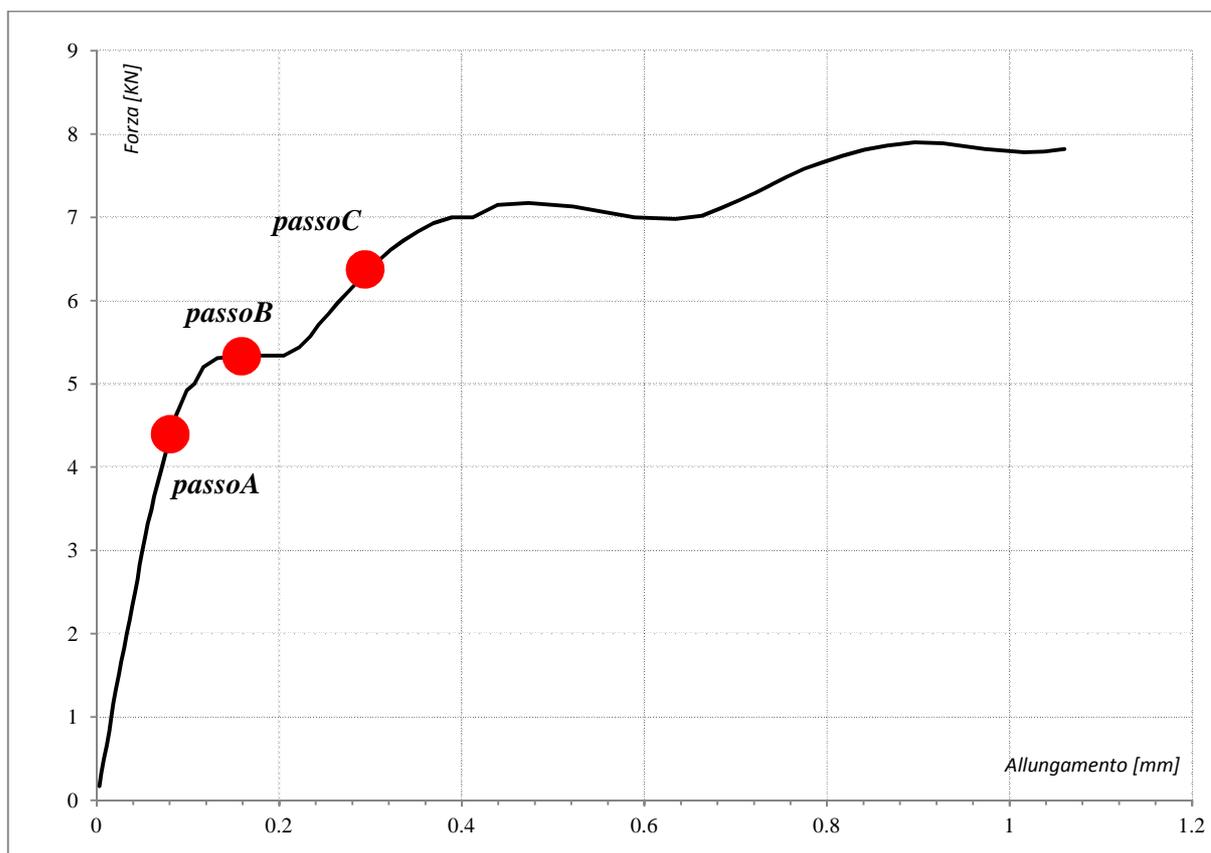


Figura 3.8.22 - PassoA,passoB,passoC.

Anche per questo modello, lungo l'interfaccia è possibile vedere come le tensioni tangenziali non siano costanti, ma presentino dei picchi in corrispondenza delle zone laterali, per il cosiddetto effetto di bordo (*figura 3.8.22*).

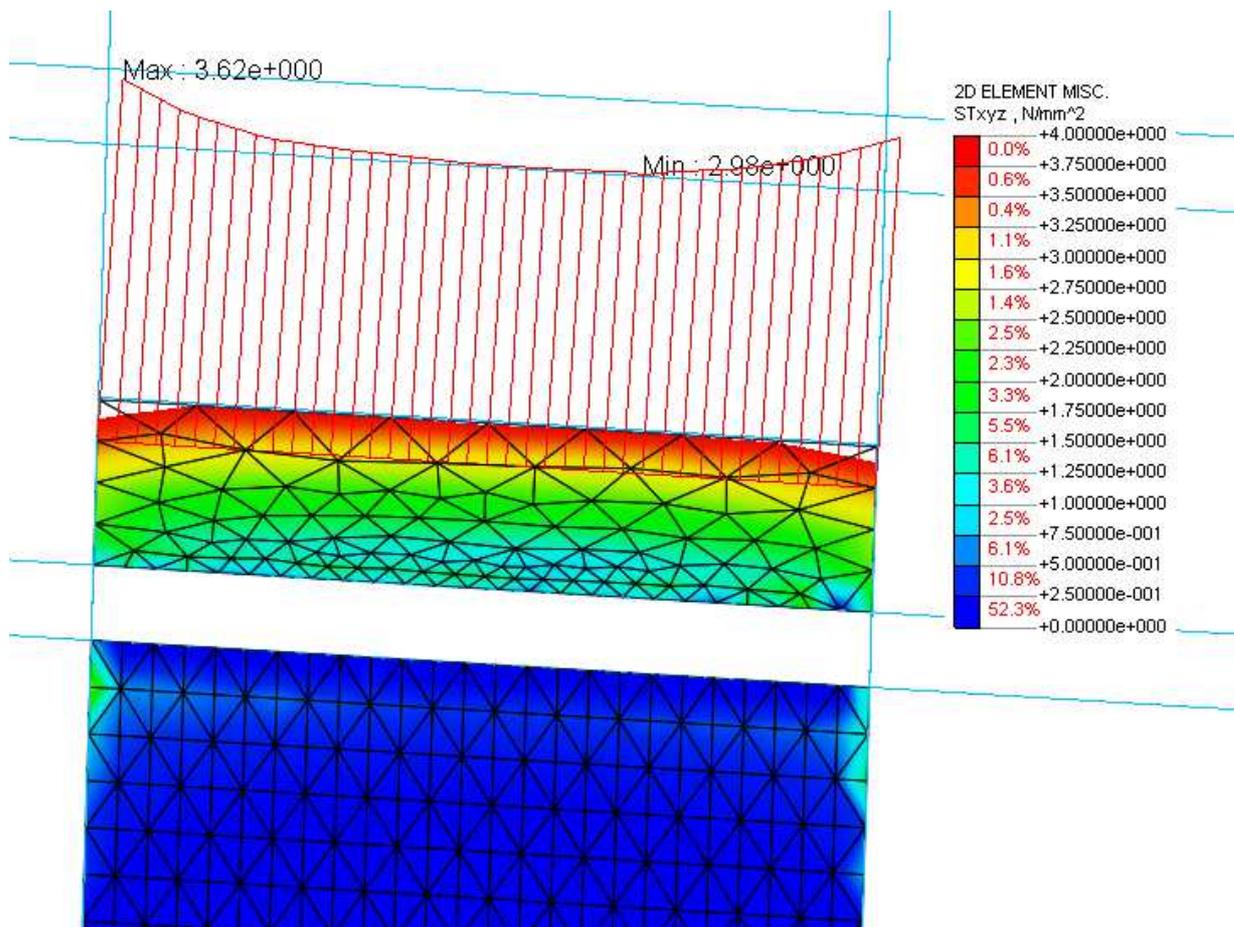


Figura 3.8.23- Diagramma tensioni tangenziali trasversali.

Dopo aver visto come variano le tensioni tangenziali lungo l'interfaccia, è stato valutato il comportamento delle deformazioni lungo la lamina, così come era stato fatto anche per il modello del mattone.

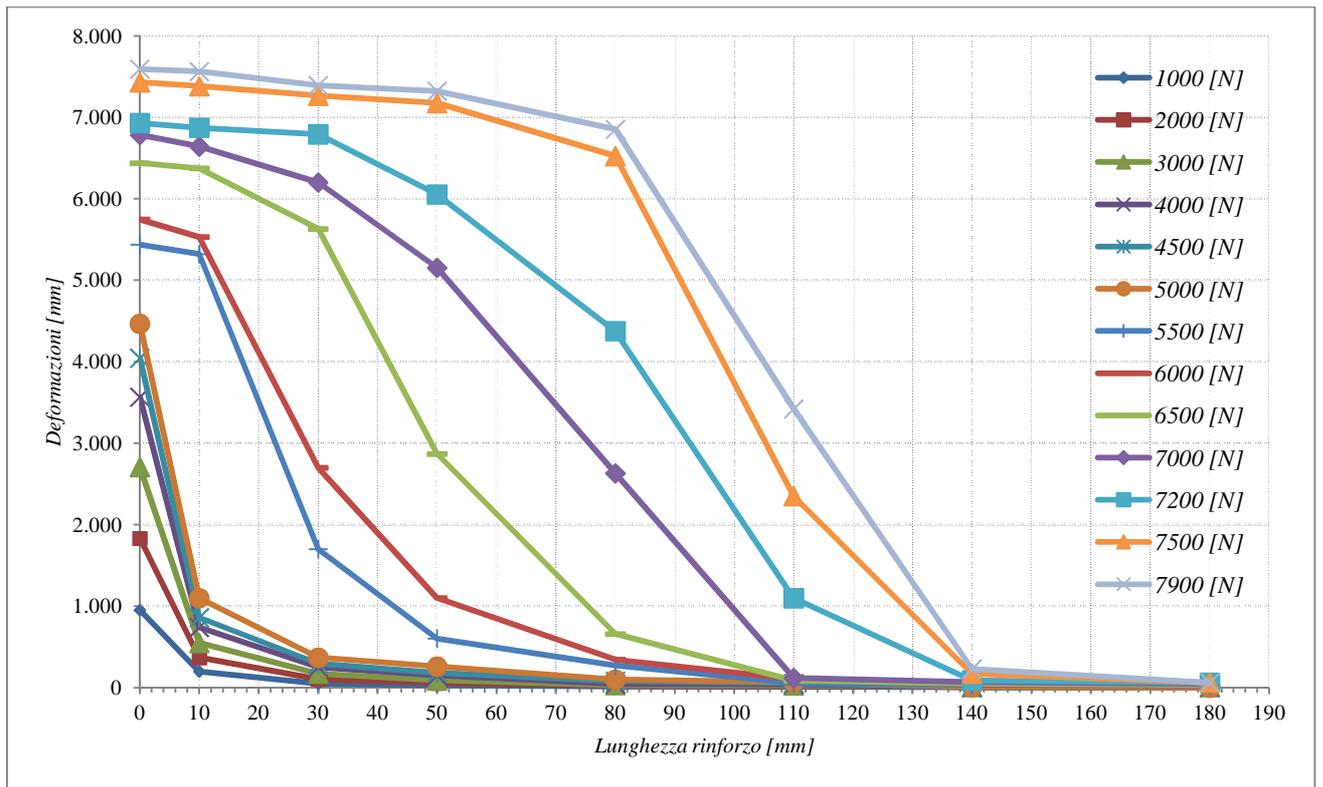


Figura 3.8.24 - Deformazioni lungo la lamina (modello numerico).

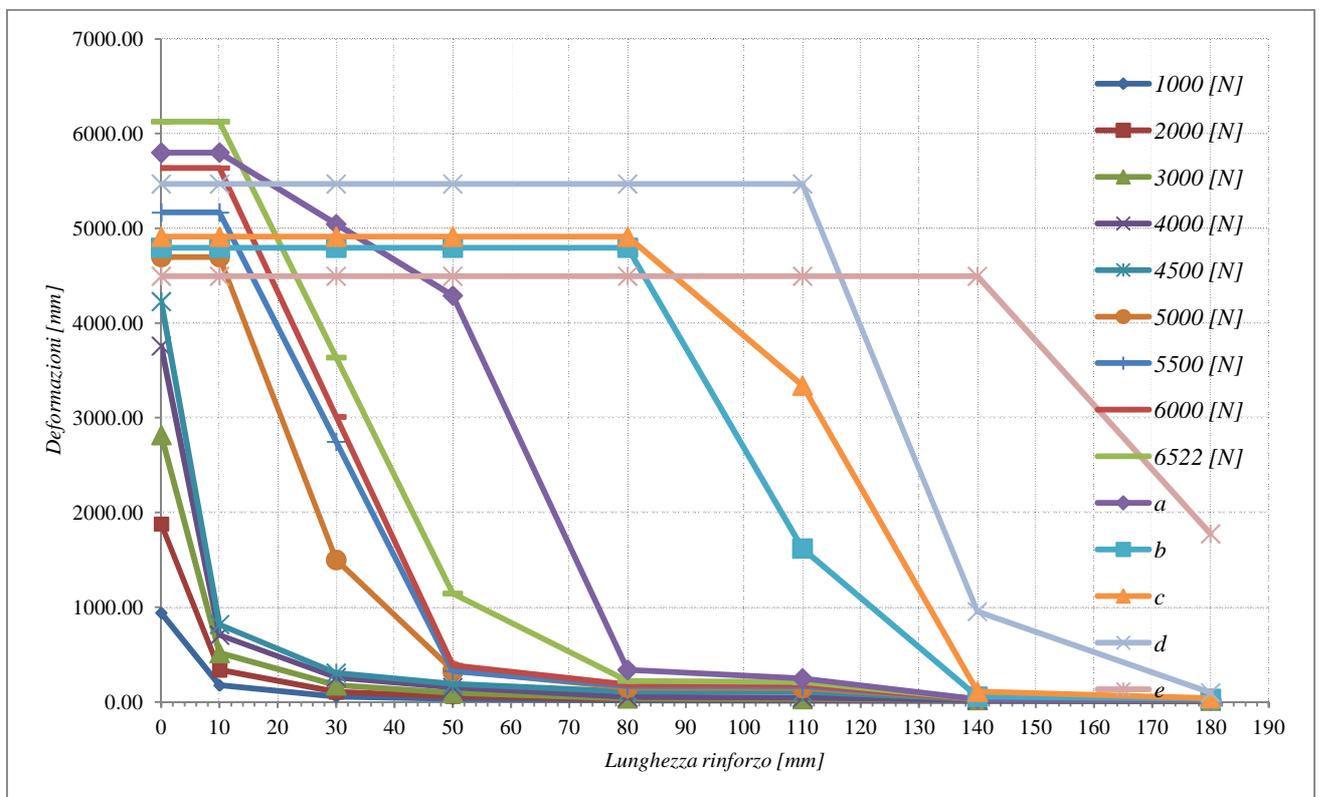


Figura 3.8.25 - Deformazioni lungo la lamina (modello sperimentale).

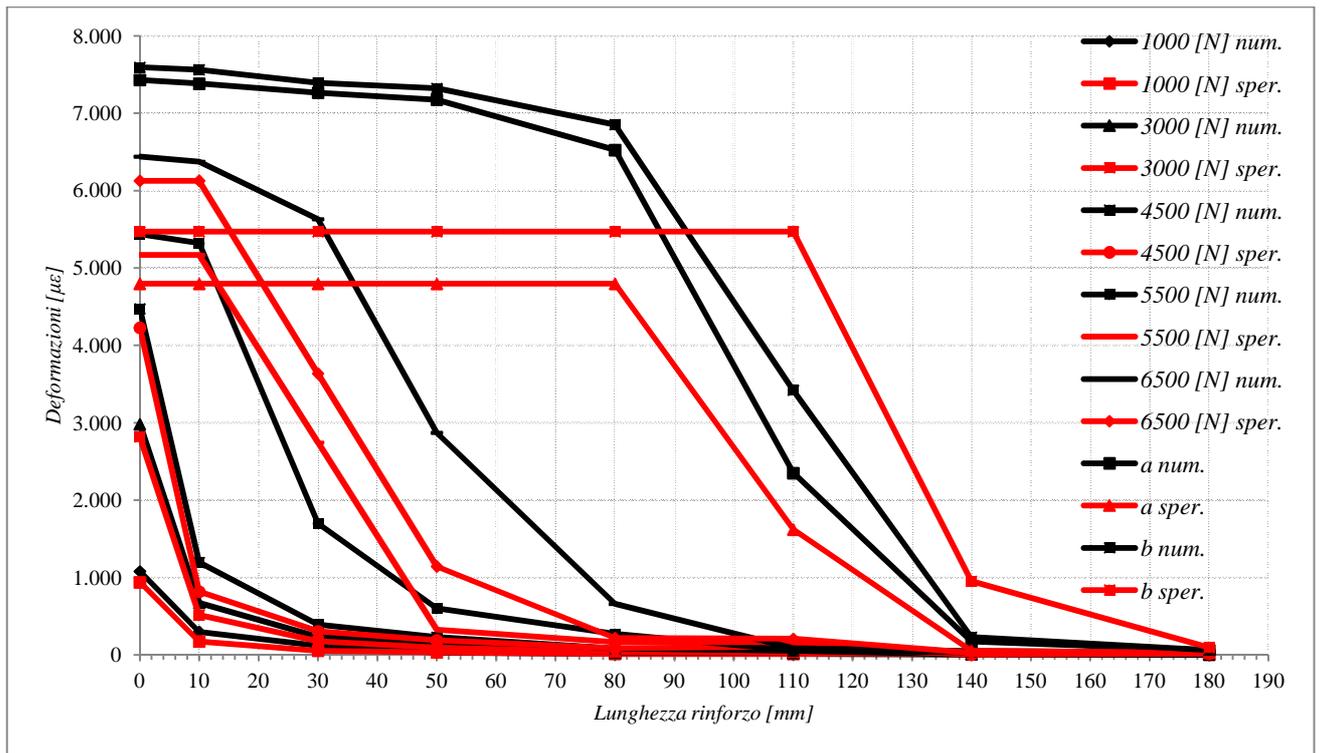


Figura 3.8.26 - Confronto deformazioni lungo la lamina.

Nella *figura 3.8.26*, è stato mostrato il confronto delle deformazioni lungo la lamina, in particolare sono stati presi in considerazione soltanto alcuni valori di forza, in modo tale da rendere più chiaro il confronto, si evince quindi che il modello numerico ricalca piuttosto bene ciò che succedeva dal punto di vista sperimentale.

Ciò che in questa figura non è mostrato, ma che si può vedere dalle *figure 3.8.24 - 3.8.25*, è che mentre dal punto di vista sperimentale superato il secondo letto di malta, la forza massima raggiungibile diminuisce, e di conseguenza anche le deformazioni sulla lamina, ciò non è successo per il modello numerico, mostrando quindi un ramo crescente nella *figura 3.8.22*, e visibile anche nelle deformazioni (*figura 3.8.24*).

Si vuole sottolineare come il processo di estrapolazione dei risultati riguardanti le deformazione è stato condotto nello stesso modo in cui era stato fatto anche per il modello precedente.

Vengono riportate di seguito delle figure che riguardano le deformazioni lungo la lamina.

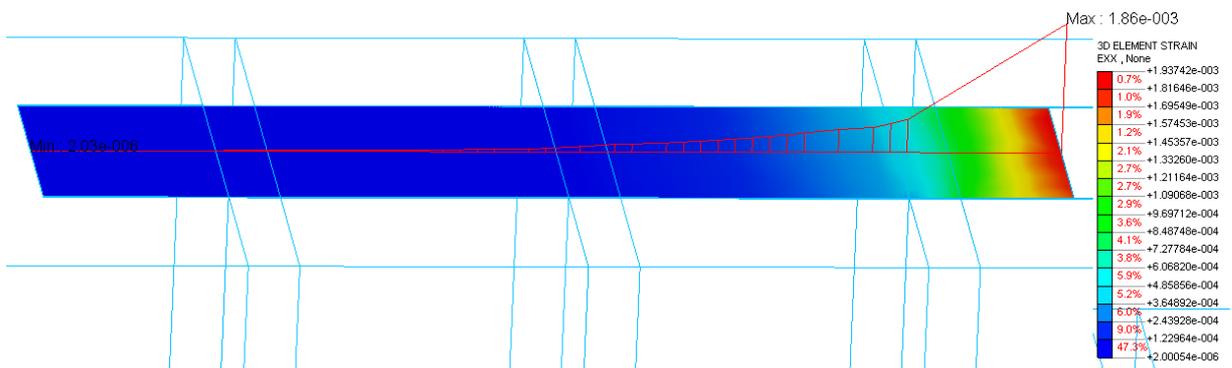


Figura 3.8.27 - Deformazioni lungo la lamina (passoA).

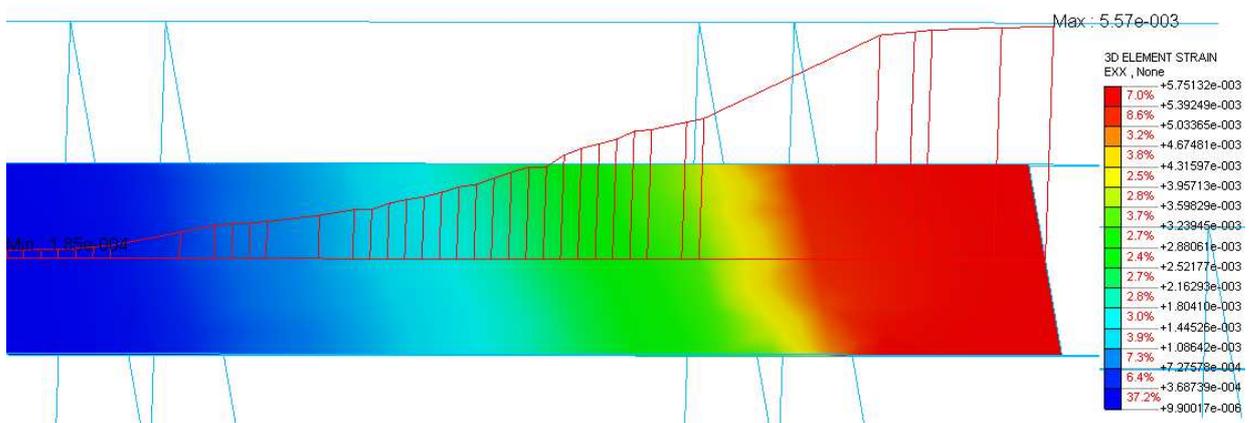


Figura 3.8.28- Deformazioni lungo la lamina (passoB).

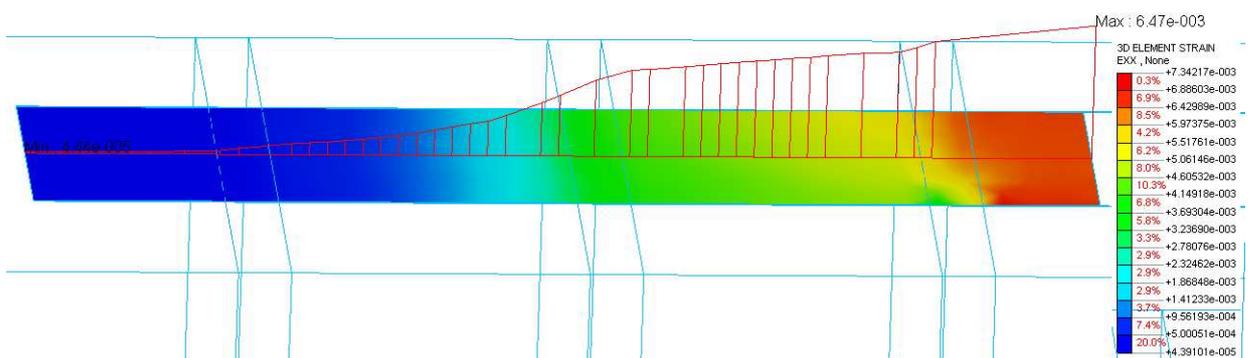


Figura 3.8.29 - Deformazioni lungo la lamina (passoC).

Si può vedere dalle figure sopra, come l'andamento delle deformazioni ricorda quello mostrato in figura 3.8.24, quindi che con il raggiungimento della tensione tangenziale di picco la prima parte della lamina risulti essere a deformazione sostanzialmente costante.

L'ultimo aspetto che è stato effettuato riguardo il modello B, è stato quello della calibrazione della legge tau-slip, in realtà in questa situazione si ritenuto opportuno essere coerenti con il modello precedente, e quindi riprendere la stessa calibrazione effettuata lì, e quindi viene riportata in questo grafico, confrontata con quello che si è ottenuto a livello sperimentale, che come possiamo vedere risulta essere differente rispetto al primo modello.

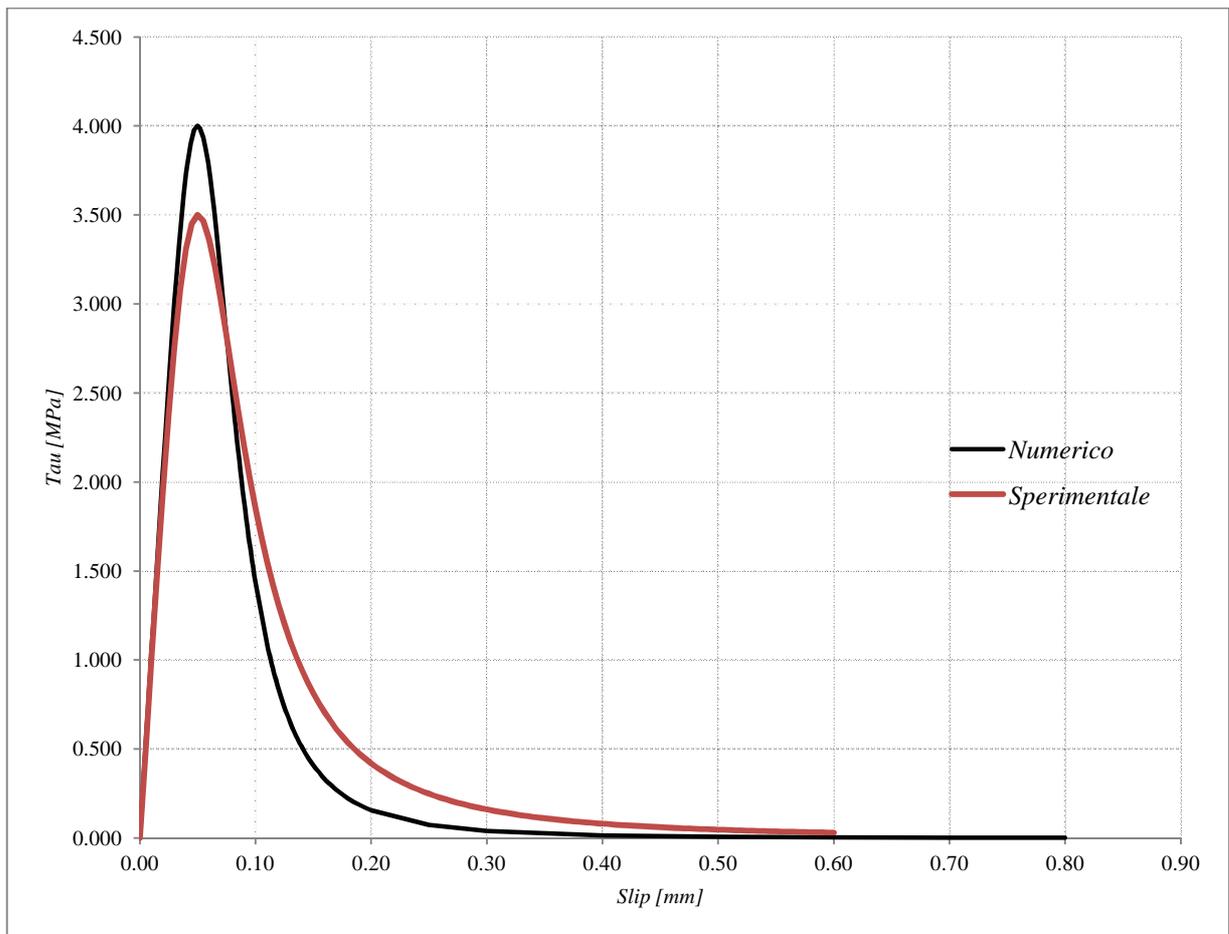


Figura 3.8.30 - Confronto leggi tau-slip.

4 MODELLO C : PARETE

In questo capitolo verrà illustrato il modello caratterizzata da una parete in muratura, quindi ciò che risulta essere il modello finale della presente analisi numerica.

In una prima parte si è soffermati sulla creazione della geometria del modello, successivamente si è passati alla discretizzazione e quindi applicazione del vincolamento e dei carichi applicati ed infine si è effettuata l'analisi non lineare del modello ponendo particolare attenzione a risultati quali forza ricavate a seguito dello spostamento impresso, deformazioni della fibra e tensioni tangenziali lungo l'interfaccia mattone FRP.

In generale per quanto riguarda la modellazione della muratura sono presenti diverse possibilità di scelta che fanno riferimento al fatto di considerare la muratura come un macroelemento o come un microelemento. Una descrizione materiale per la micro-modellazione deve essere ottenuta dalle prove su piccoli campioni dei costituenti della muratura, mentre per la macro-modellistica, le prove devono essere effettuate negli esemplari dal formato sufficientemente grande della muratura, sotto le condizioni omogenee di sollecitazione e di sforzo.

La muratura è un materiale che presenta proprietà diverse a seconda della direzione considerata, dovute principalmente ai giunti di malta che fungono da piani deboli.

Generalmente i metodi di analisi numerica sono basati o su micro-modelli (mattone, blocco, malta, ecc.) oppure su macro-modelli (muratura).

Tenendo conto della eterogeneità della muratura, che deriva dalla composizione di blocchi uniti insieme da malta di letti, i modelli proposti in letteratura possono essere classificati nelle tre diverse classi in breve descritto di seguito:

- *Micro-modelli* :considerano le unità e i giunti di malta separatamente, caratterizzati dalle diverse leggi costitutive; in tal modo, l'analisi strutturale viene eseguita prendendo in considerazione ciascun componente del materiale muratura. Le proprietà meccaniche che caratterizzano i modelli adottati per l'unità e giunti di malta, sono ottenuti attraverso prove sperimentali condotte sui componenti sui materiali (compressione prova, prova di trazione, prova di flessione, ecc.) .

Questo approccio porta per l'analisi strutturale un grande sforzo computazionale, infatti, in un quadro di formulazione agli elementi finiti, entrambi i blocchi di unità e i letti malta devono essere discretizzati, ottenendo un problema con un elevato numero di nodi e quindi un elevato numero di gradi di libertà. Tuttavia, questo approccio può essere con successo adottato per riprodurre campagne sperimentali precedentemente effettuate su pannelli in muratura.

- *Micro-macro modelli:* si considerano diverse leggi costitutive per l'unità e giunti di malta, poi, una procedura di omogenizzazione viene eseguita da ottenere un macro-modello per la muratura che viene utilizzato per sviluppare l'analisi strutturale. Anche in questo caso, le proprietà meccaniche di unità e giunti di malta sono ottenuti attraverso prove sperimentali. I micro-macro modelli sembrano molto attraenti, in quanto consentono di ricavare in modo razionale il rapporto sforzo-deformazione nella muratura, in un modo adatto per le proprietà meccaniche di ciascun componente materiale.

- *Macro-modelli, o modelli macroscopici:* si basano sull'uso fenomenologico di leggi costitutive per il materiale muratura, cioè le relazioni sforzo-deformazione adottata per l'analisi strutturale sono derivati effettuando test su in muratura, senza distinguere i blocchi e la malta. Un modello macroscopico potrebbe non essere in grado di descrivere in maniera dettagliata alcuni micro-meccanismi che si verificano in l'evoluzione del danno di muratura, ma è molto efficace da un punto di vista computazionale, quando le analisi strutturali vengono eseguiti.

Nel primo approccio si prendono in considerazione: il modulo di Young, il coefficiente di Poisson e le proprietà inelastiche delle unità e della malta. L'interfaccia rappresenta un potenziale piano di fessurazione/slittamento con una rigidità fittizia iniziale per evitare la penetrazione del continuo.

Nel secondo approccio, la muratura è considerata come un insieme di blocchi elastici legati ai vari punti attraverso una linea potenziale di frattura/slittamento; si perde in accuratezza e non si include il coefficiente di Poisson.

Nel terzo approccio non viene fatta una distinzione tra unità individuali ed i giunti, ma la muratura viene trattata come un continuo omogeneo ed anisotropo.

I metodi da utilizzare saranno scelti in funzione delle necessità; i micro-modelli sono, infatti, necessari per dare una migliore comprensione sul comportamento locale della muratura. Il macro-modello è applicabile nello studio di pareti solide sufficientemente larghe. Sia nel micro che nel macro modello occorre, comunque, una descrizione dettagliata del materiale, perché le proprietà della muratura sono influenzate da diversi fattori quali le proprietà dei materiali e della malta.

Nel modello che verrà analizzato di seguito, si adotta una modellazione in macroelementi, pur comunque differenziando la muratura dal mattone, ovvero si applicano ai mattoni le proprietà dei mattoni, invece per quanto riguarda la malta, dal punto di vista geometrico, si ingloba nello spessore del mattone, mentre per quanto riguarda il contributo meccanico, si creano degli elementi di interfaccia che considerano il comportamento della parete nel suo complesso, quindi come elementi nel nostro modello avremo il mattone e l'interfaccia a spessore nullo.

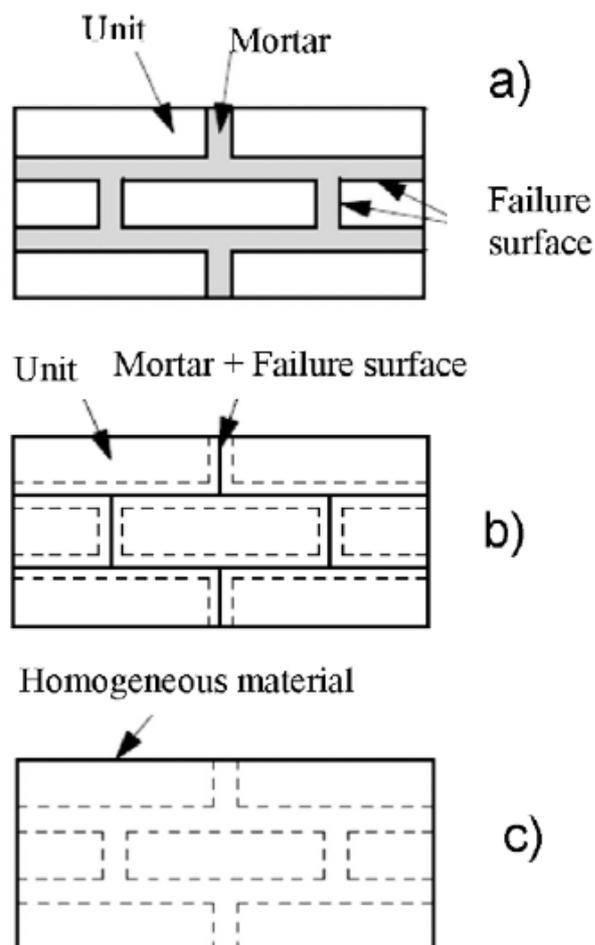


Figura 4.1- Modello muratura: a) micromodel; b) micromodel semplificato; c) macromodel.

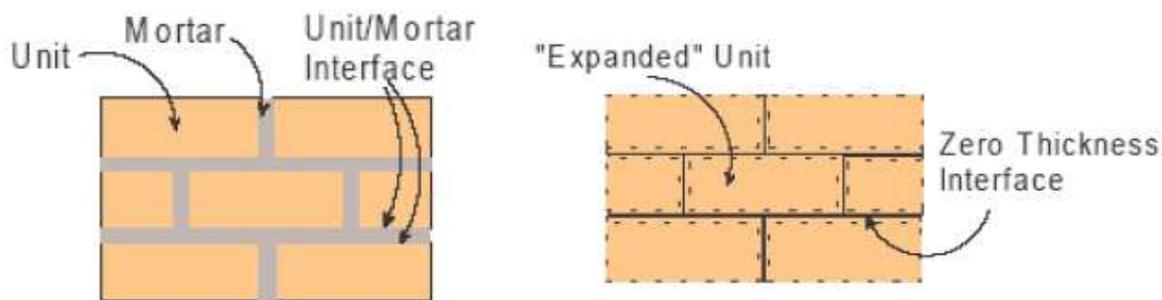


Figura 4.2 – Macromodel con interfaccia a spessore nullo.

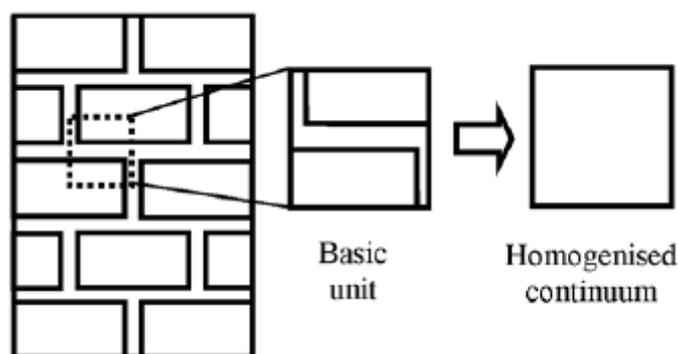


Figura 4.3 – Modello con omogeneizzazione della muratura

Il modello che tratta l'omogeneizzazione della muratura è molto usato, soprattutto, per l'analisi numerica dei pannelli in muratura, tuttavia comporta numerose approssimazioni, a partire da quella più grande, ovvero la creazione di un materiale muratura+malta, non esistente, le cui proprietà vengono sostanzialmente valutate con prove sperimentali.

4.1 Proprietà dei materiali

Come partenza per questo modello numerico sono state prese in considerazione tutti quei risultati ottenuti nei modelli che sono stati precedentemente analizzati, quindi sono riprese sia le proprietà dei materiali che le considerazioni geometriche.

A differenza dei modelli precedentemente analizzati, in questo caso non si è fatta alcuna considerazione con risultati sperimentali, in quanto le prove riguardanti queste pareti in muratura non sono state ancora effettuate, e quindi questo modello risulterà essere la base per successive elaborazioni sperimentali.

Vengono quindi riportate le proprietà dei mattoni, mentre per la malta, come detto in precedenza non si creeranno degli elementi geometrici con proprie proprietà meccaniche, ma si ingloberà il suo comportamento nell'interfaccia.



Figura 4.1.1 - Mattone pieno liscio tipo bolognese (mattone tipo 3).

Sul singolo mattone sono state eseguite prove di caratterizzazione del materiale a flessione e compressione, allo scopo di determinare le resistenze a compressione e a trazione dei materiali utilizzati.

<i>Campione</i>	<i>Carico massimo (t)</i>	<i>Resistenza a compressione (MPa)</i>	<i>Fattore di forma (UNI EN 772-1)</i>	<i>Resistenza a compr. normalizzata (MPa)</i>	<i>Media (MPa)</i>
B3PC1	57.850	42.993	0.76	32.675	32.901
B3PC2	58.650	43.588	0.76	33.127	

Tabella 4.1.1 – Prove di resistenza a compressione.

Oltre alle prove di compressione appena descritte, su tutte le tipologie di mattone sono state condotte anche prove di flessione a 3 punti per determinare la resistenza a trazione del materiale.

<i>Campione</i>	<i>Carico max (kg)</i>	<i>Resistenza a trazione (MPa)</i>	<i>Media (MPa)</i>
F3a	-	-	7.144
F3b	338	7.144	

Tabella 4.1.2 – Prove di resistenza a trazione.

4.2 Modellazione della geometria

Per questo modello come detto prima non si hanno basi per la creazione della geometria, ma si sono supposte delle dimensioni che successivamente verranno adottate per prove che saranno svolte in laboratorio.

Quindi si è ipotizzata una parete di dimensioni all'incirca 50x50.

Sulla base di prove prese in riferimento da diverse campagne sperimentali, si è adottato uno spessore di 15cm per la striscia di calcestruzzo posta in sommità in cui verranno applicati i carichi sia verticali che orizzontali, e di 2cm per la fascia sottostante rigida in cui applicheremo i vincoli.

In figura 4.2.1 viene riportato uno schema che serve per spiegare in che modo sviluppare questo modello.

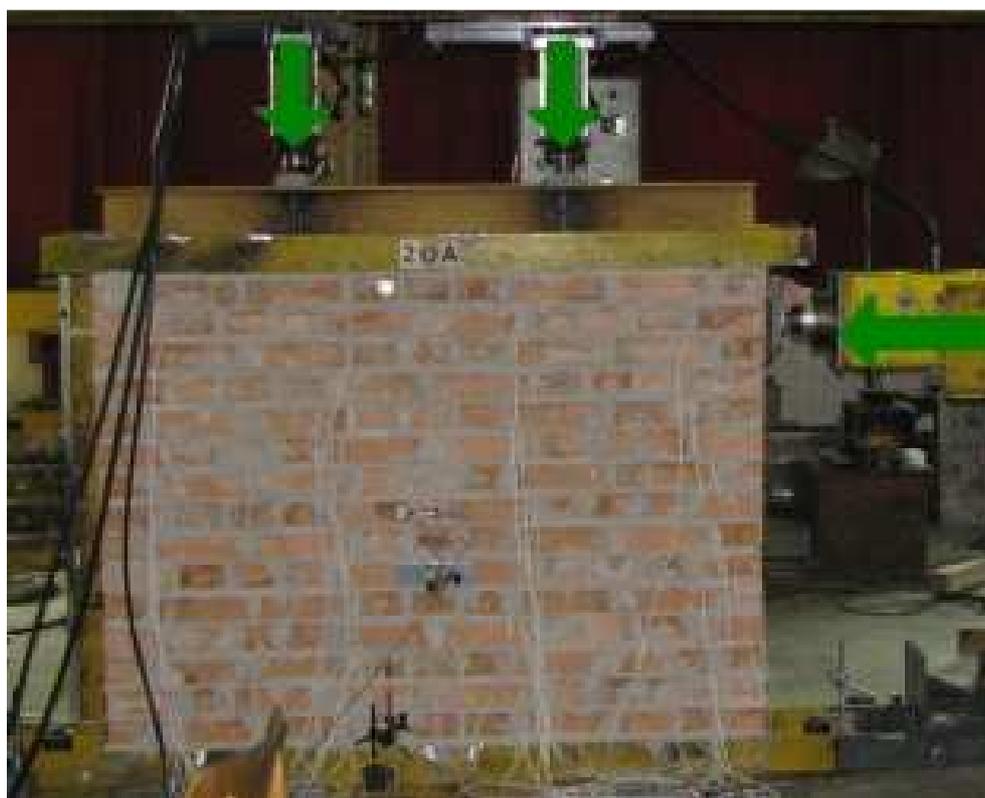


Figura 4.2.1 – Parete.

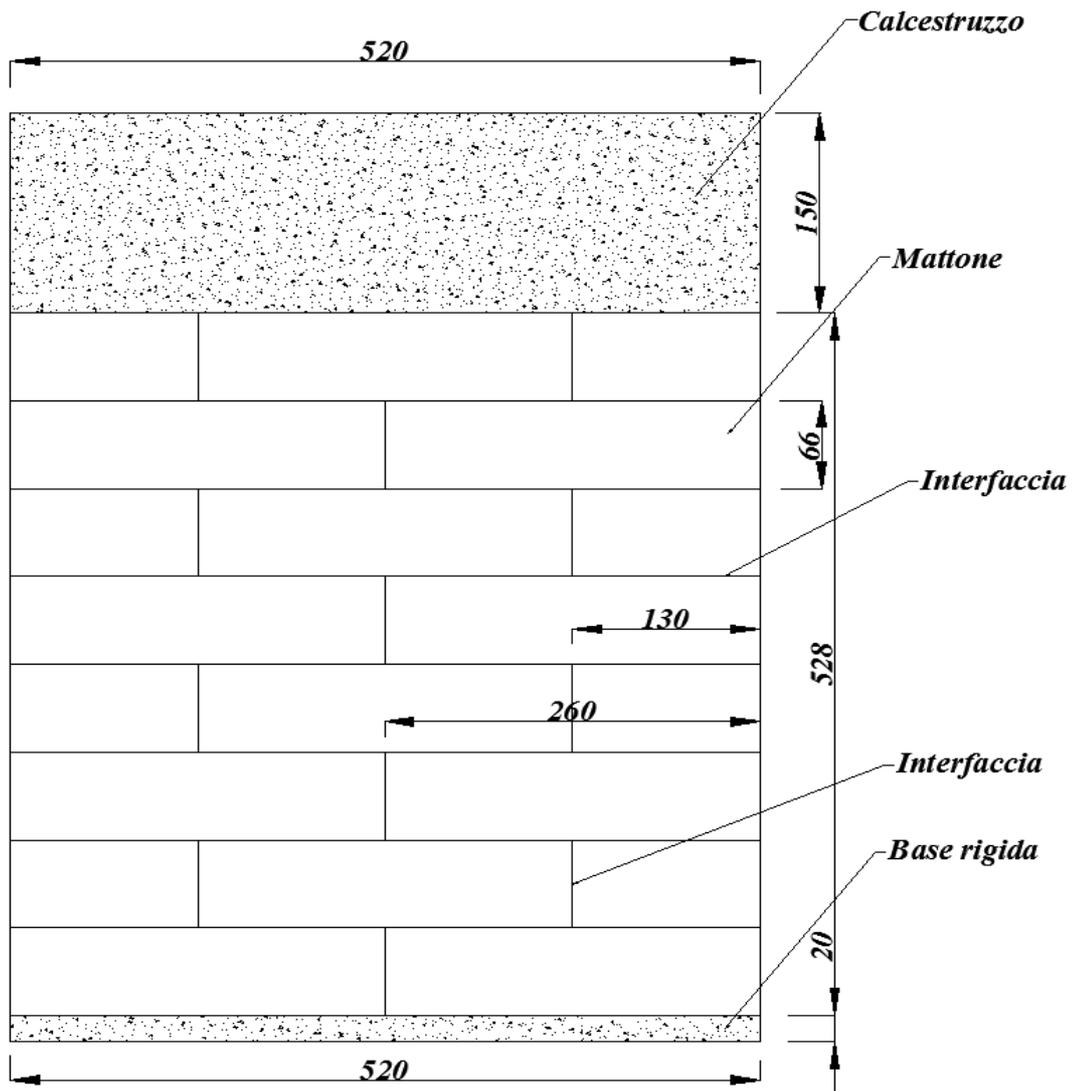


Figura 4.2.1 – Modello C.

Dal punto di vista della modellazione geometrica della parete, non si sono riscontrati particolari difficoltà, in quanto è stato necessario creare soltanto diversi parallelepipedi ognuno dei quali rappresentava un mattone, oltre ovviamente alla base rigida e alla striscia di calcestruzzo nella parte superiore della parete.

Quindi seguendo le linee già tracciate nelle precedenti sezioni, si sono creati i diversi *Box*, *Geometry > Primitive Feature > Box* (tasto rapido ).

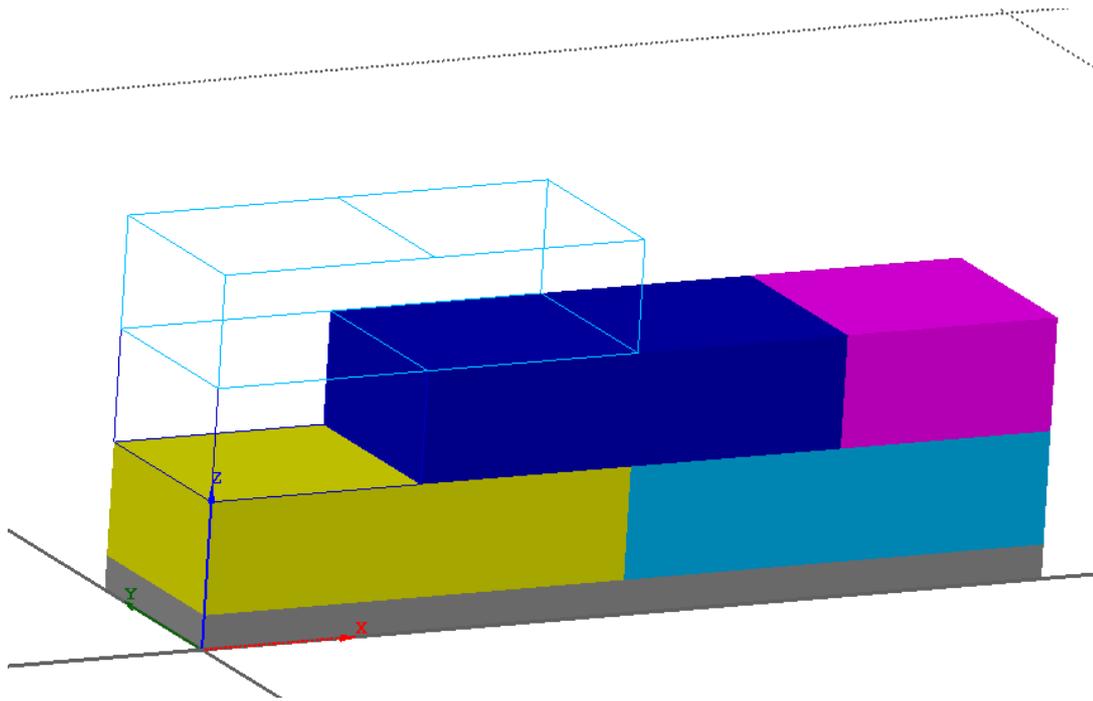


Figura 4.2.2 – Modello geometrico.

Vengono quindi creati tutti i parallelepipedi necessari alla creazione del muretto.

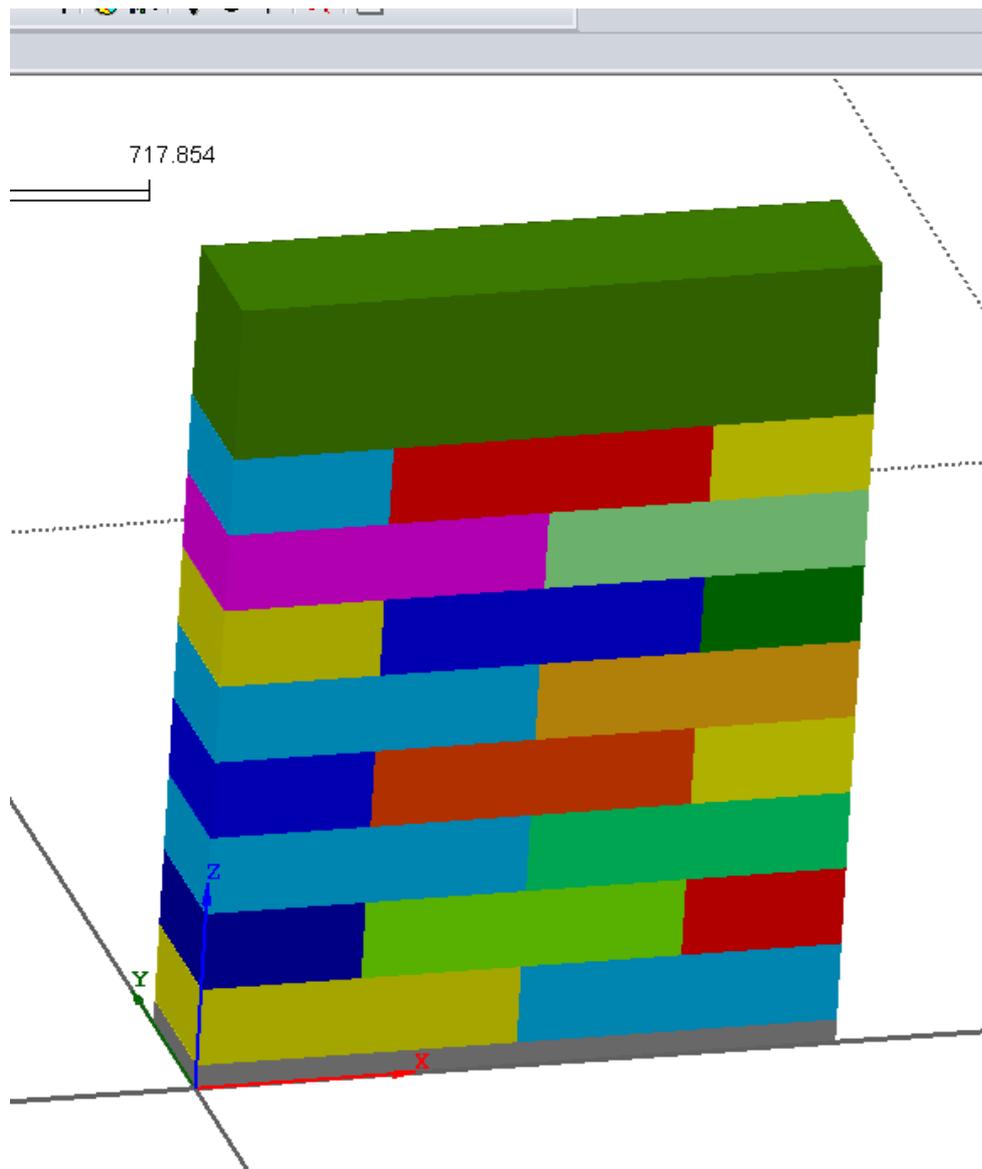


Figura 4.2.3 – Modello geometrico.

Anche in questo caso è stato necessario utilizzare la funzione *Boolean cut*, per poter creare le diverse interfacce, in particolare sono state create interfacce in corrispondenza di ogni collegamento mattone mattone, sia in orizzontale che in verticale,

Va sottolineato come questa opzione sia possibile inserirla grazie al tasto *Geometry > Boolean Operation > Cut*, in cui bisogna selezionare il *Boolean Master* e il *Boolean Tool(s)*, ovvero l'elemento master da tagliare e la rispettiva forma del taglio.

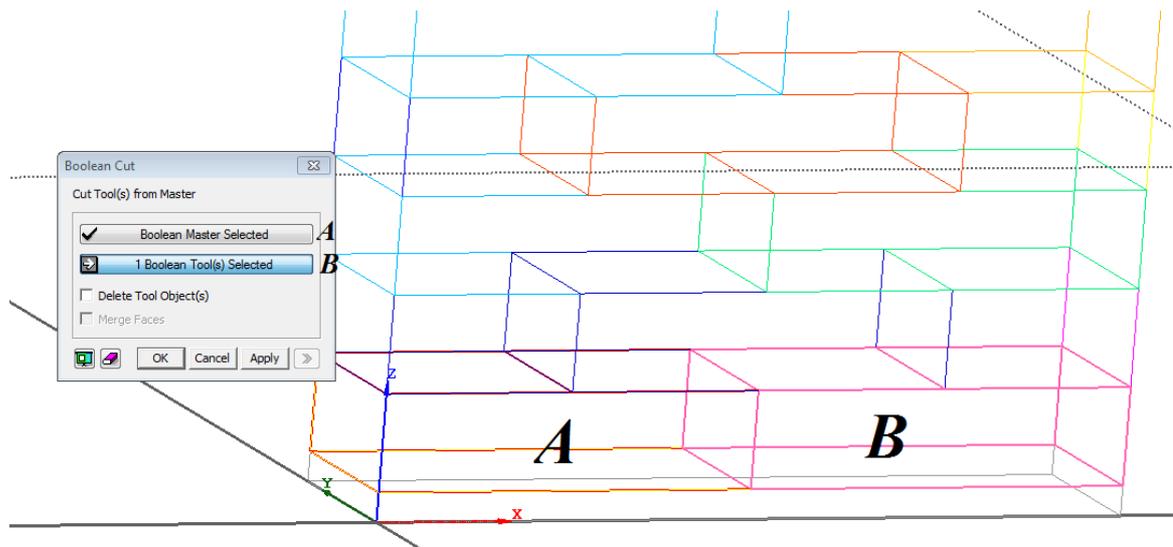


Figura 4.2.4 – Boolean operation : cut.

Questa operazione è stata effettuata per ogni singolo mattone ed inoltre sarà effettuata sia per la striscia rigida sottostante, che per la porzione di calcestruzzo in testa alla parete, sempre con lo stesso obiettivo di creare delle interfacce in corrispondenza di questi elementi.

4.3 Modellazione delle proprietà meccaniche

In questo paragrafo si mostrerà come sono state inserite e modellate le proprietà dei diversi materiali utilizzati, in particolare in questo caso si parla di mattone, calcestruzzo, e di un materiale rigido come un acciaio, per la base della parete.

Le modalità di inserimento delle caratteristiche meccaniche, e le caratteristiche meccaniche stesse, sono le medesime del modello precedente.

Le proprietà quindi del materiale possono essere definite attraverso il comando *Analysis* > *Material* > *Create* > *Isotropic*, in cui si apre una schermata riportata in *figura 4.3.1*.

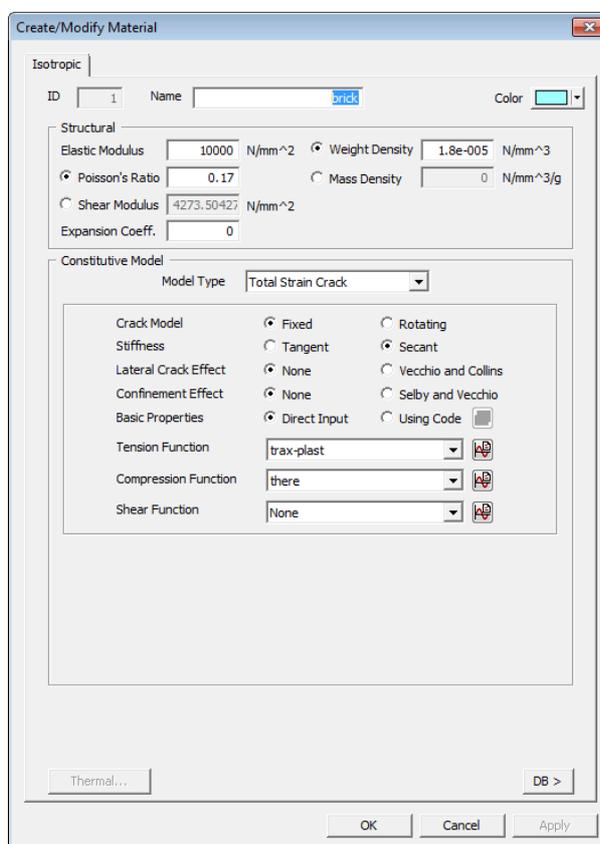


Figura 4.3.1 – Create Material.

Riportiamo quindi le proprietà dei diversi materiali:

➤ **MATTONE**

- *Modulo elastico = 10000 MPa;*
- *Coefficiente di Poisson = 0.17;*
- *Weight density = 1.8 e-005.*

- **Comportamento a trazione:** (figura 4.3.2).

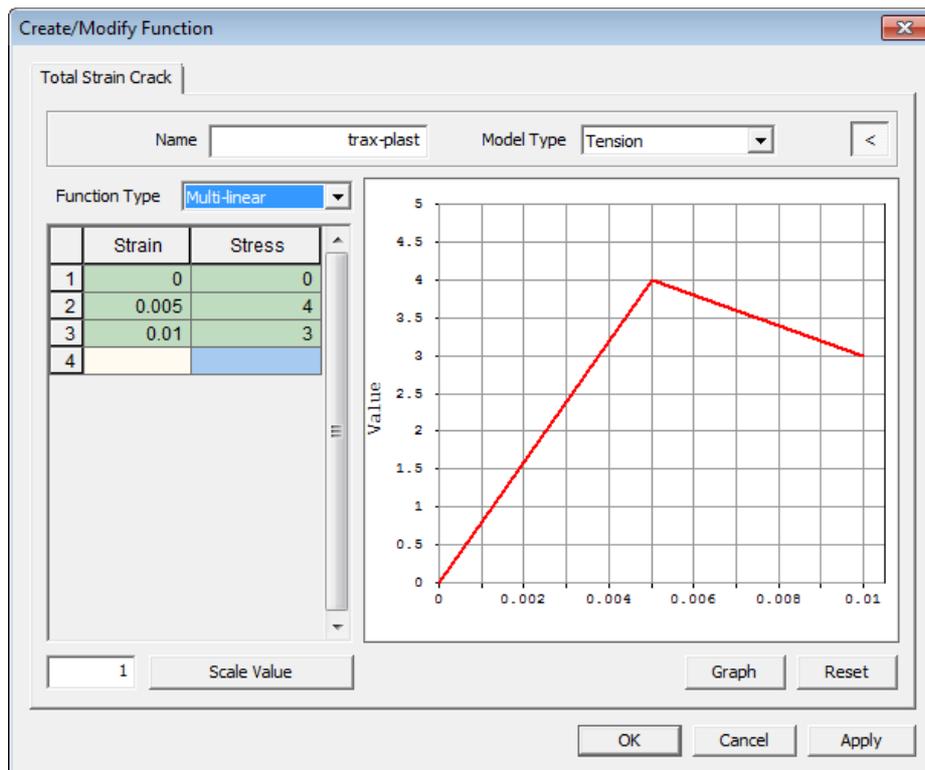


Figura 4.3.2 – Legame a trazione del mattone.

- **Comportamento a compressione:** (figura 4.3.3)

Per quanto riguarda il comportamento in compressione del mattone è stato inserito un comportamento a parabola, caratterizzato da una tensione di picco a compressione pari a 40 MPa (figura 4.3.3).

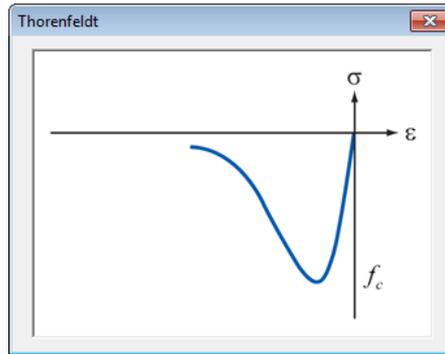


Figura 4.3.3 – Legame a compressione del mattone.

➤ **CALCESTRUZZO**

- *Modulo elastico = 30000 MPa;*
- *Coefficiente di Poisson = 0.2;*
- *Weight density = 0.00001.*

Per quanto riguarda il calcestruzzo si è pensato di utilizzare un comportamento elastico, in maniera tale da non avere, successivamente, per le altre tipologie di analisi che verranno effettuate, problemi a causa della scarsa resistenza a trazione, poiché l'attenzione non si vuole avere su questo elemento.

4.4 Discretizzazione del modello geometrico

Il passo successivo alla creazione di un modello geometrico, durante la creazione di un'analisi numerica, è quello della generazione della mesh, quindi della scelta della grandezza degli elementi e del grado di approssimazione da adottare.

Discretizzare un modello geometrico dal punto di vista di un codice numerico quale Midas Fea, significa realizzare, sulla geometria creata, tanti elementi tridimensionali, nel nostro caso, aventi numero di nodi a seconda della precisione da adottare, tali da coprire l'intera geometria; una volta creati questi elementi, si è soliti chiamare l'intera discretizzazione di un elemento come mesh; tale tipologia di mesh è realizzabile attraverso il comando *Mesh >*

Map Mesh > Solid (tasto rapido ).

Mentre per quanto riguarda i modelli precedentemente sviluppati, la creazione della mesh seguiva il fatto che era necessario valutare a livello particolare e microscopico, ciò che accadeva nel singolo mattone, in questo caso, l'obiettivo è valutare il comportamento di insieme della parete, e quindi andare a valutare quei meccanismi di crisi che potrebbero innescarsi e portare alla crisi del mio sistema.

Proprio per questo motivo, la mesh utilizzata in questo modello sarà molto più rada, in modo da consentire un'analisi molto più veloce ed avere informazione macroscopiche e non più microscopiche.

La discretizzazione di ogni singolo elemento è stata effettuata con la medesima metodologia ovvero Unstructured mesh, realizzabile con il comando *Mesh > Auto Mesh >*

Solid (tasto rapido )(figura 4.4.1).

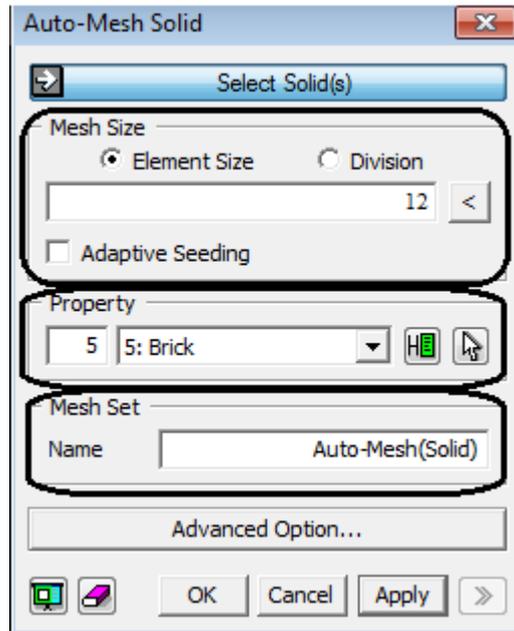


Figura 4.4.1 – Auto-Mesh Solid.

Si può ben notare da queste due figura quanto detto sopra, ed è proprio per questo motivo che in corrispondenza di questi punti nella geometria del modello numerico, è stato necessario effettuare un raffittimento considerevole della mesh.

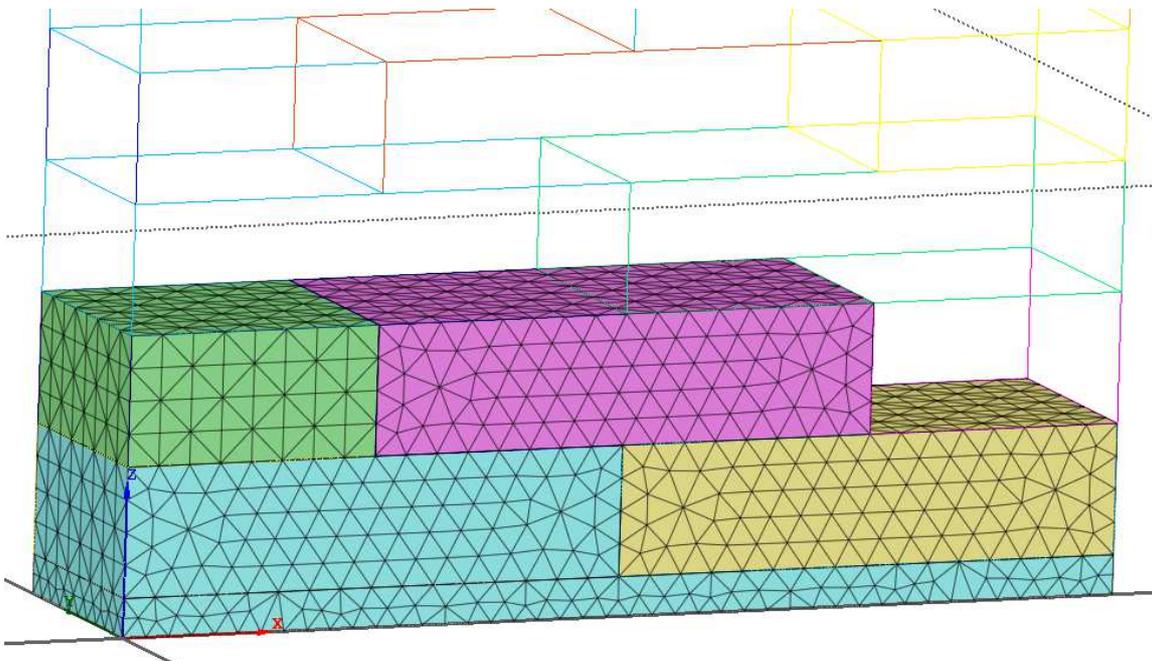


Figura 4.4.2 – Discretizzazione.

Viene quindi mostrata una figura che rappresenta nel complesso, la discretizzazione adottata per tutta la parete.

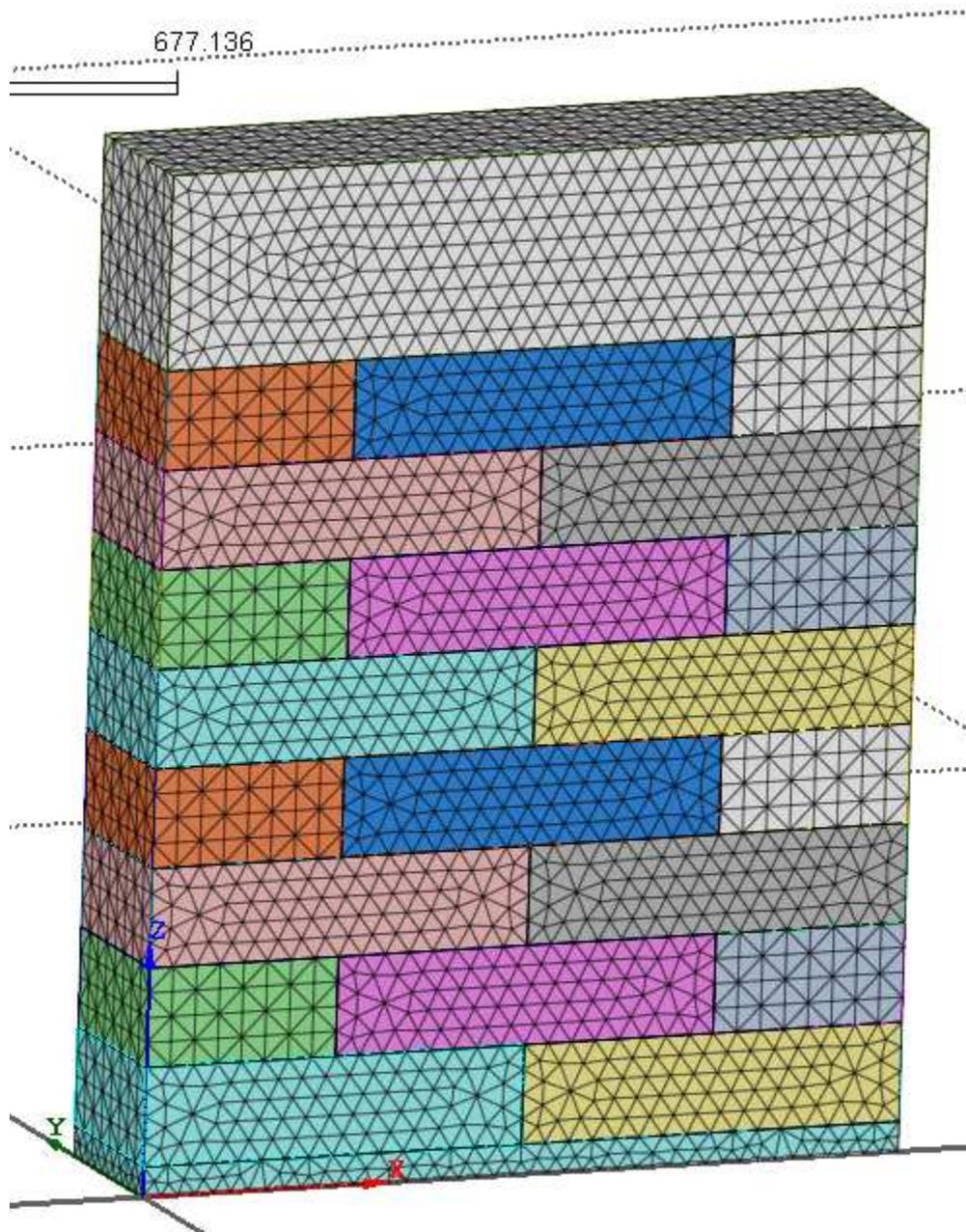


Figura 4.4.3 – Parete discretizzata.

4.5 *Interfaccia mattone - mattone*

Uno degli aspetti fondamentali per la creazione del modello della parete, riguarda la rappresentazione della malta, che come abbiamo detto è sostanzialmente inglobata nello spessore del mattone, ed è rappresentato dall' interfaccia in corrispondenza di ogni mattone.

L' alternativa a questa strada sarebbe stata omogeneizzare il mattone e la malta ad un singolo materiale ed inserire delle proprietà meccaniche a questo materiale, a metà fra l'uno e l'altro, invece qui, seguendo anche altre ricerche effettuate sull'argomento, si è pensato di adottare una particolare interfaccia in grado di schematizzare il comportamento della malta.

Tra le diverse possibilità di scelta per realizzare le interfacce, in questo caso si è utilizzata la *Combined Cracking – Shearing – Crushing* le cui principali caratteristiche vengono riportate di seguito.

In questo modello di interfaccia, conosciuto anche come "modello di interfaccia composito", è idoneo a simulare la frattura, "frictional slip" così come la frantumazione del materiale lungo interfacce, per esempio ai giunti in muratura. Di solito le unità di mattoni sono modellati come elastico lineare, o viscoelastica continua, mentre i giunti di malta sono modellati con elementi di interfaccia, che obbediscono al comportamento non lineare descritto da questo modello combinato fessurazione-taglio-schiacciamento(*figura 4.5.1 a*).

In alcuni casi è giustificato utilizzare un modello in cui la malta è schematizzata con elementi continui, e gli elementi dell'interfaccia e i comportamenti dei materiali vengono utilizzati per catturare i fenomeni fisici tra mattoni e malta (*figura 4.5.2 b*).

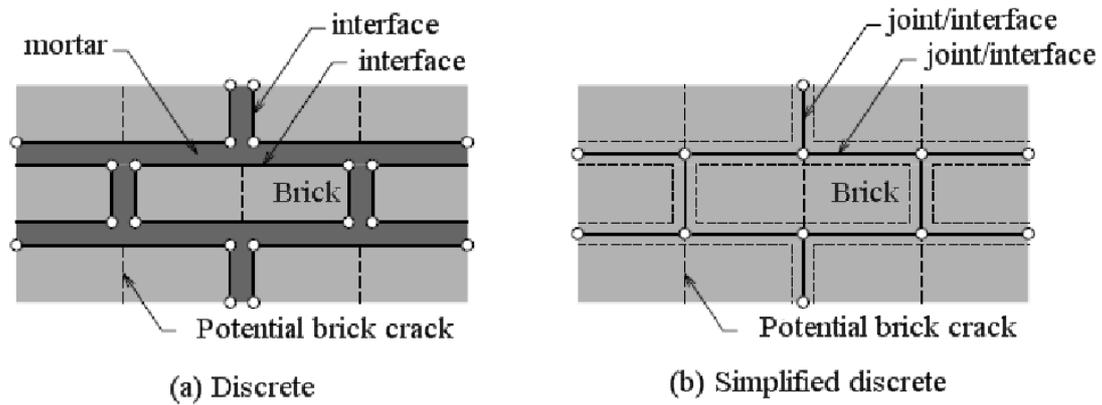


Figura 4.5.1 – Combined Cracking – Shearing – Crushing model.

Le proprietà adottate per questa interfaccia sono le stesse utilizzate anche nel precedente modello:

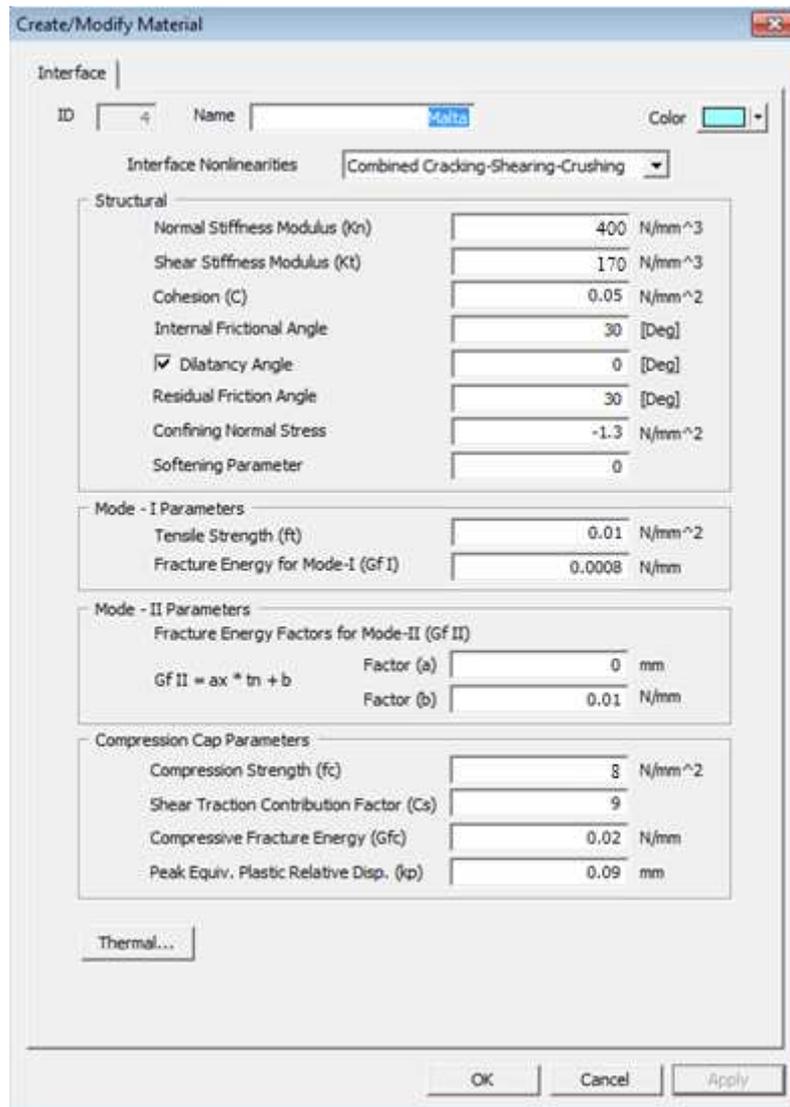


Figura 4.5.2 - Create Interface model.

I parametri inseriti in questa finestra rappresentano: kn il modulo di rigidezza in direzione normale, kt il modulo di rigidezza tagliante c la coesione, φ_0 l'angolo di frizione, ψ l'angolo di dilatazione φ_r il residuo angolo di frizione, ft la tensione di trazione, GfI l'energia di frattura per modo I, a e b sono dei parametri necessari per la determinazione dell'energia di frattura nel modo II (espressa come $GII = a \cdot \sigma + b$), fc la resistenza a compressione Cs il fattore di contributo per la tensione di taglio, Gfc l'energia di frattura a compressione, e kp è il picco in termine di spostamenti relativi della curva plastica.

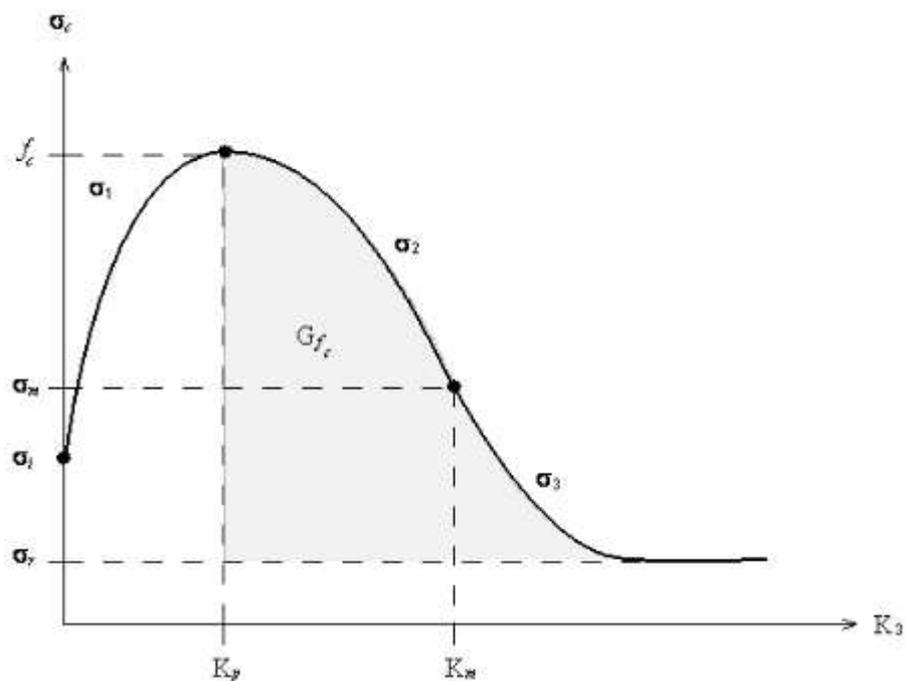


Figura 4.5.3 - Energia di frattura.

Una volta settati i parametri riguardanti le proprietà meccaniche è stato possibile effettuare la discretizzazione dell'interfaccia, quindi si è creato un strato di elementi tetraedrici, questa operazione è resa possibile grazie al comando `Mesh > Element > Create Interface Element` (tasto rapido ).

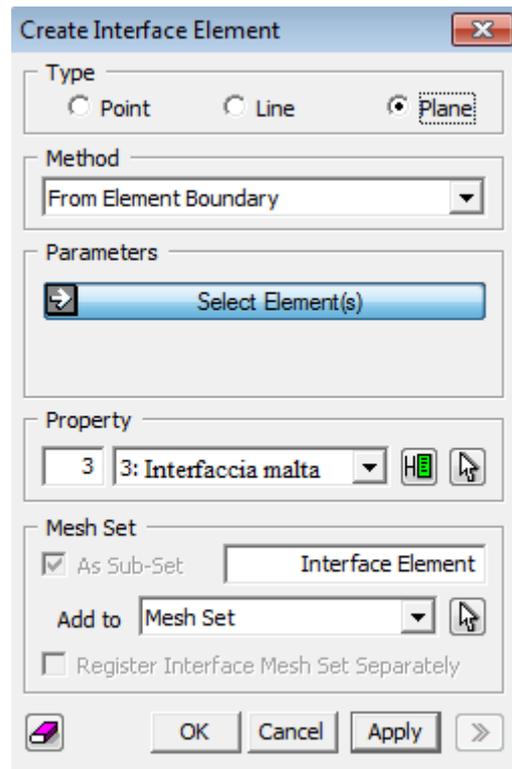


Figura 4.5.4 - Interfaccia malta.

La stessa interfaccia la si è realizzata anche tra i due mattoni posti nella parte inferiore della parete, e la porzione rigida di 2cm che rappresenta la base della mia parete, in quanto si presuppone che durante una prova di questo tipo, sopra la base venga posta prima uno strato di malta e successivamente i mattoni.

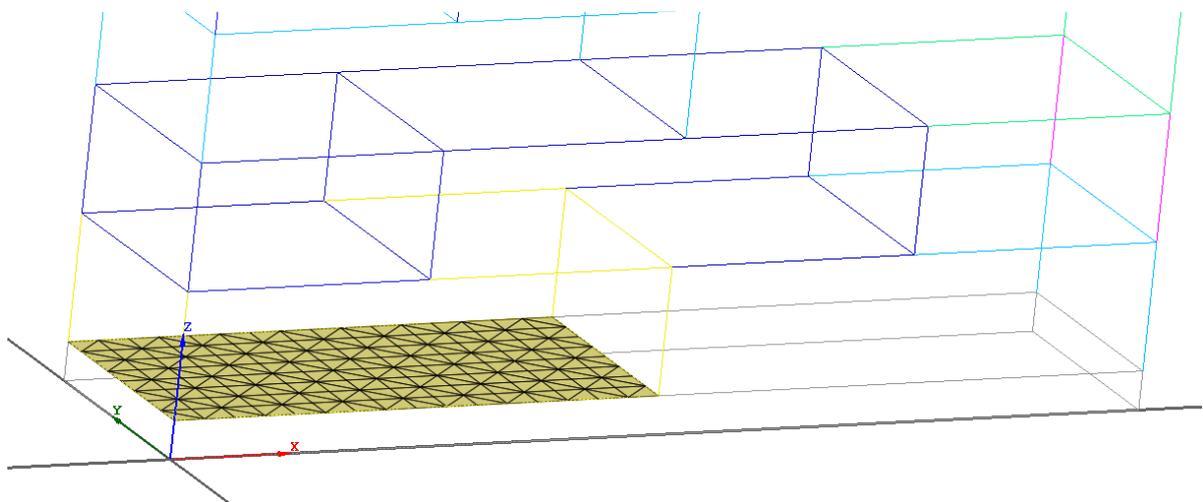


Figura 4.5.5 - Interfaccia con la base.

È riportata di seguito una figura che mostra tutte le interfacce create sulla parete, che poi rappresentano tutte le superfici in cui sperimentalmente ci andrebbe la malta, si vuole sottolineare come nella testa della parete non è stata inserita alcuna interfaccia, poichè in quella sezione, i mattoni sono in continuità con il calcestruzzo sovrastante, in modo che sia in grado di trasferire le forze.

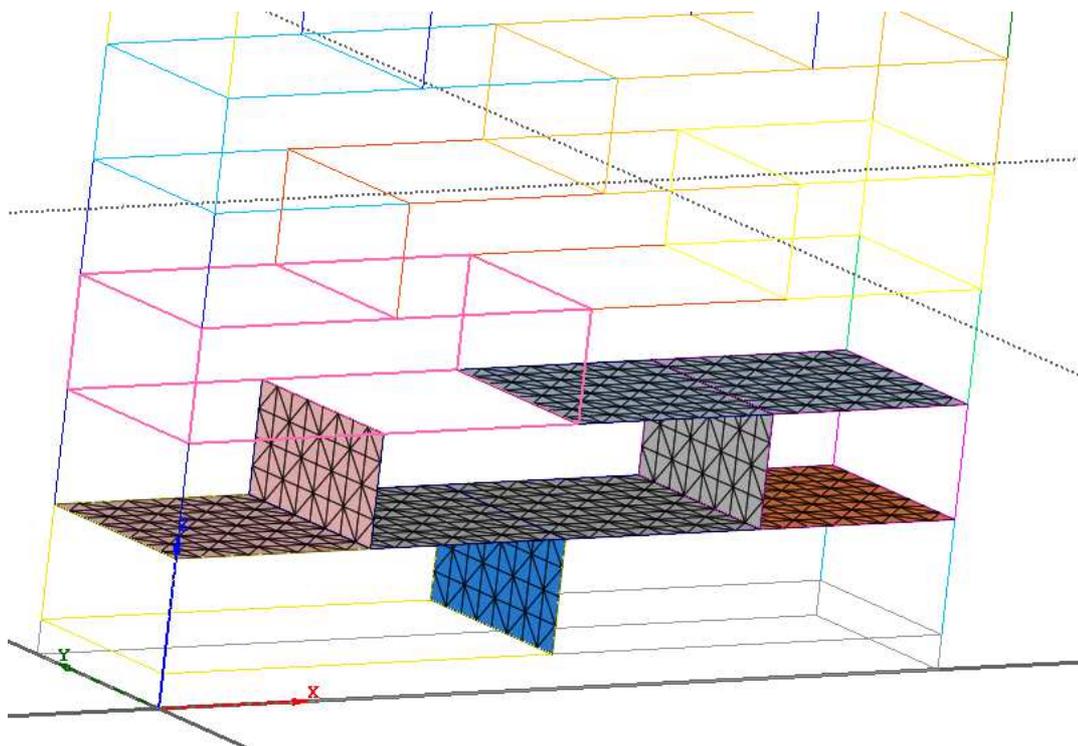


Figura 4.5.6 - Interfaccia con la base.

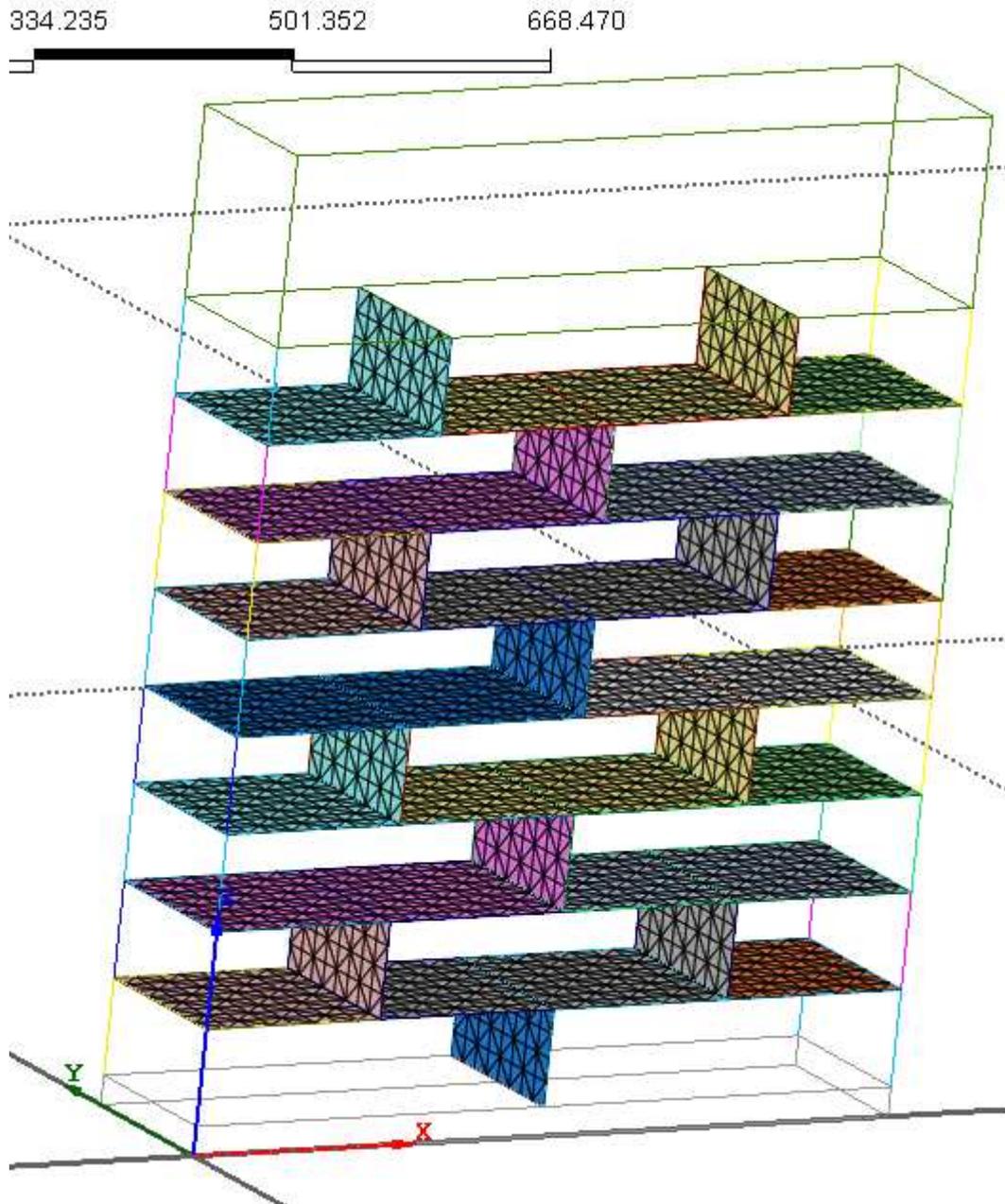


Figura 4.5.7 - Interfaccia con la base.

4.6 Vincolamento e condizioni di carico

4.6.1 Vincolamento

Il vincolamento che è stato adottato in questo modello risulta essere rappresentato soltanto da un incastro alla base, in corrispondenza del materiale rigido, impedendo in questo modo alla parete di avere qualsiasi movimento sia traslazionale che rotazionale.

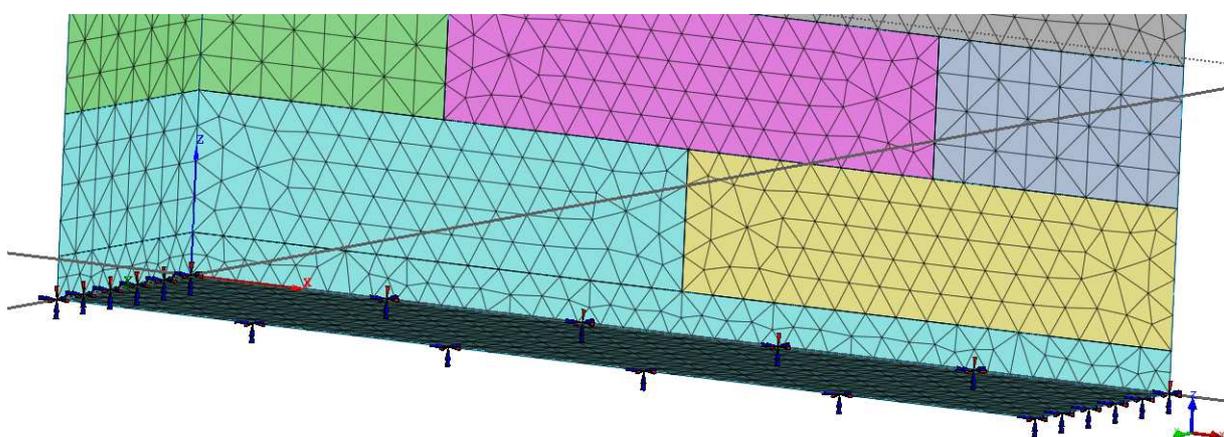


Figura 4.6.1.1 - Vincolamento.

Seguendo quindi lo stesso percorso già mostrato in precedenza per il primo modello di calcolo, *Analysis > BC > Constraint* (tasto rapido ) , in questo modo vengono applicati i vincoli al modello numerico.

In questa situazione il vincolamento è stato applicato ad una superficie intera, e non come accadeva spesso nei precedenti modelli a dei singoli nodi.

Inoltre come si vede in *figura 4.6.1.1*, sono stati selezionati tutti i vincoli: T1, T2, T3, R1, R2, R3.

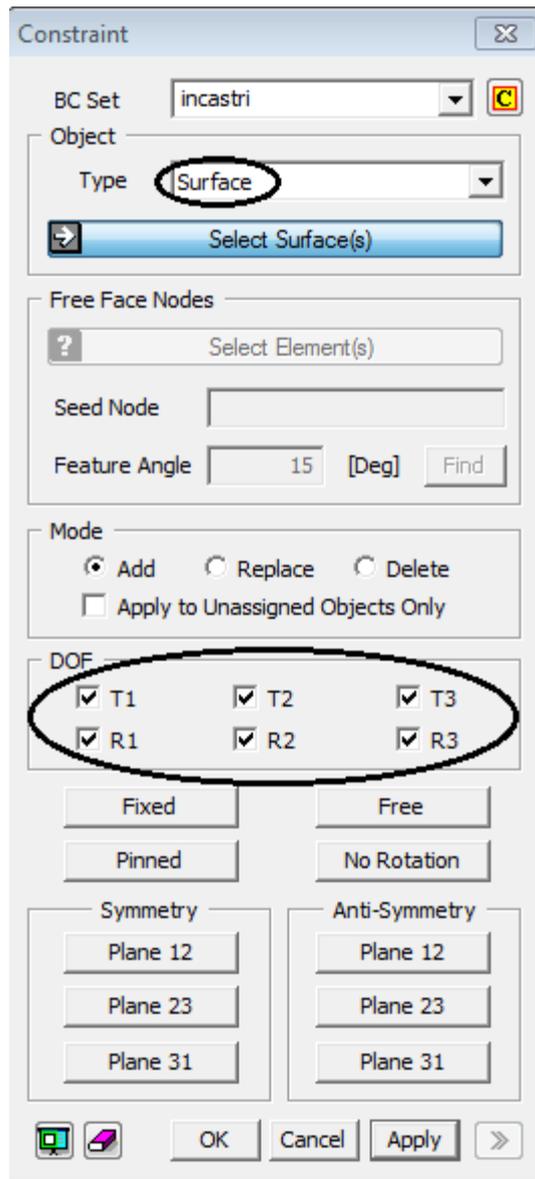


Figura 4.6.1.2 - Constraint.

4.6.2 Load Set

In questo paragrafo sono riportate tutte le indicazioni adottate per descrivere al meglio il carico applicato al modello.

Rispetto ai due modelli precedenti, in questo caso, poiché la tipologia della prova è totalmente cambiata, sono cambiati anche i carichi che vengono applicati alla struttura.

In particolare durante prove riguardanti pareti in muratura, ciò che si fa è applicare una forza o uno spostamento orizzontale, in sommità, oltre all'applicazione di una pressione verticale dall'alta che funge da sforzo normale per la parete.

Si ricorda che il comando necessario all'applicazione del carico segue il seguente percorso *Analysis > Load > Displacement*.

Come mostra la *figura 4.6.2.1*, allo stesso modo dell'applicazione del vincolamento, bisogna scegliere se applicare il carico sui nodi o sulla superficie, nel nostro caso è stato applicati ai nodi sulla parte anteriore del cordolo (*figura 4.6.2.1*).

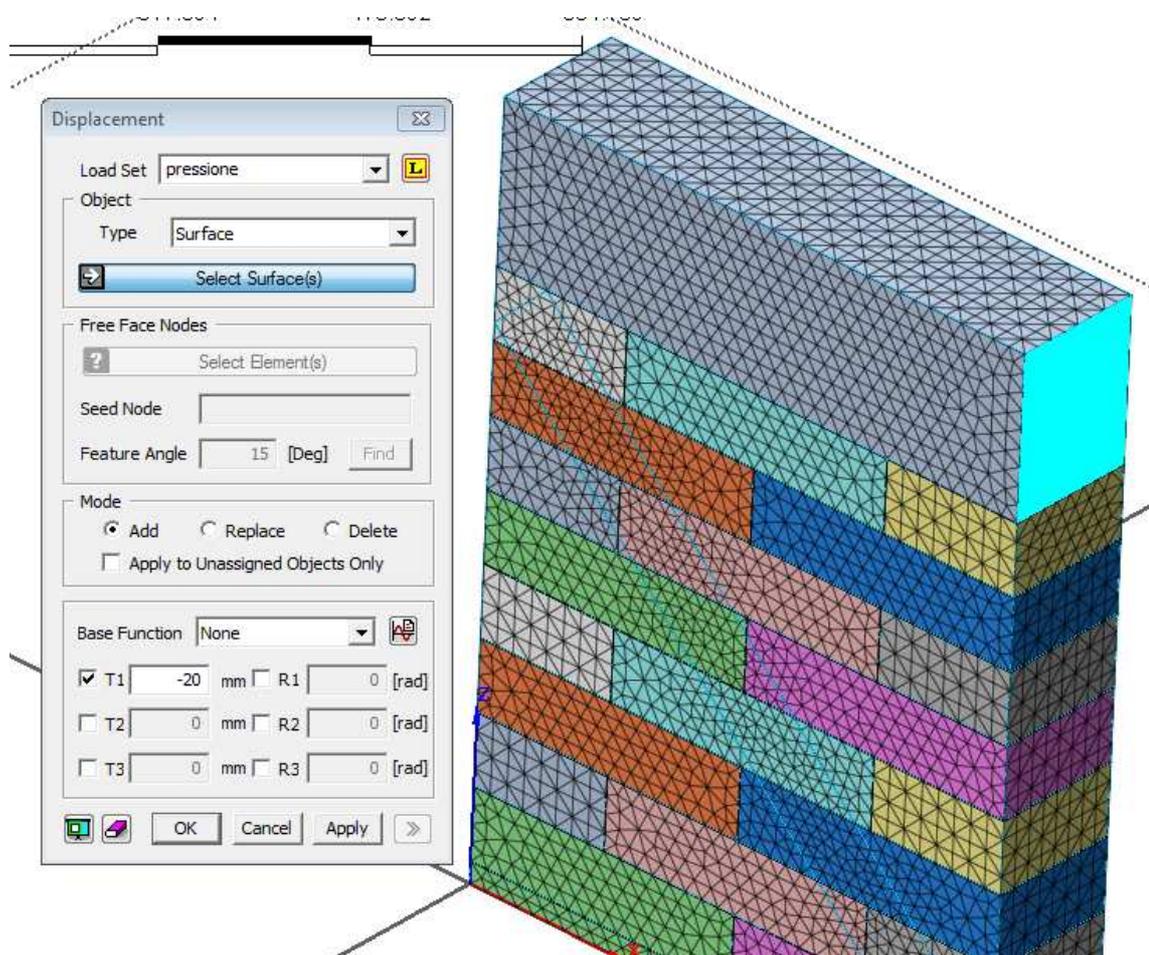


Figura 4.6.2.1 - Displacement.

Per quanto riguarda l'applicazione del carico verticale sotto forma di pressione, il percorso che bisogna seguire è *Analysis > Load > Pressure*, quindi una volta aperta la schermata mostrata in *figura 4.6.2.2*, è possibile inserire il valore della pressione da applicare, scegliendo sia se applicarla lungo una superficie o su dei nodi in particolare, sia in che direzione applicarla:

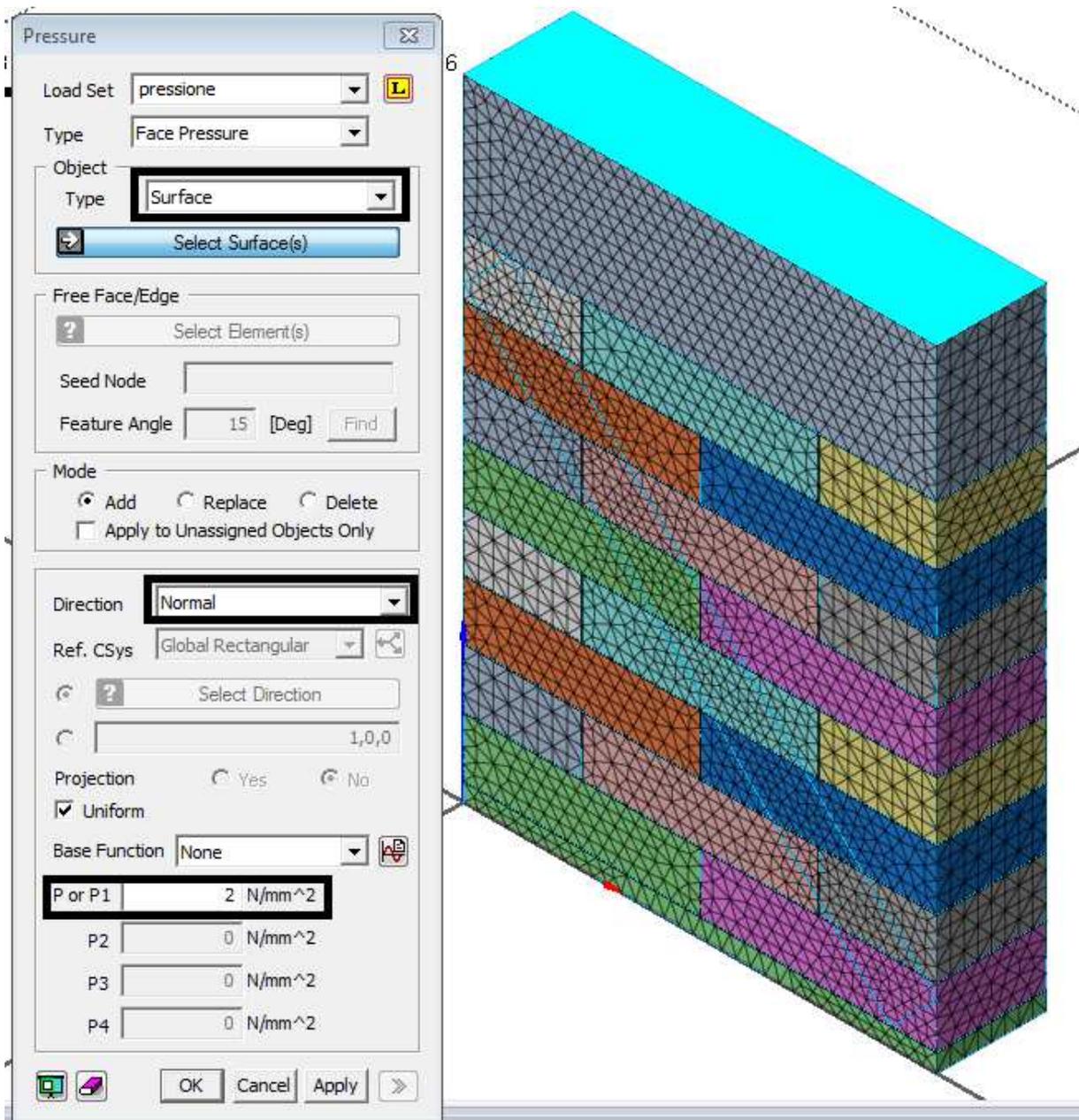


Figura 4.6.2.2 - Pressure.

Riguardo il valore di pressione che è stata applicata superiormente, si vuol specificare che come valore di forza che è stata calcolato effettuando un'analisi dei carichi di massima per

un muro avente al di sopra un solaio tipico di civile abitazione, è stato considerato circa *12tonnellate*, equivalenti a $120000N$, che moltiplicati per l'area su cui andrà applicata questa forza, portano ad un valore che arrotondato è risultato essere $2MPa$.

È possibile quindi vedere come il codice di calcolo legge la pressione che io ho applicato al modello e come la schematizza nella finestra principale (*figura 4.6.2.3*).

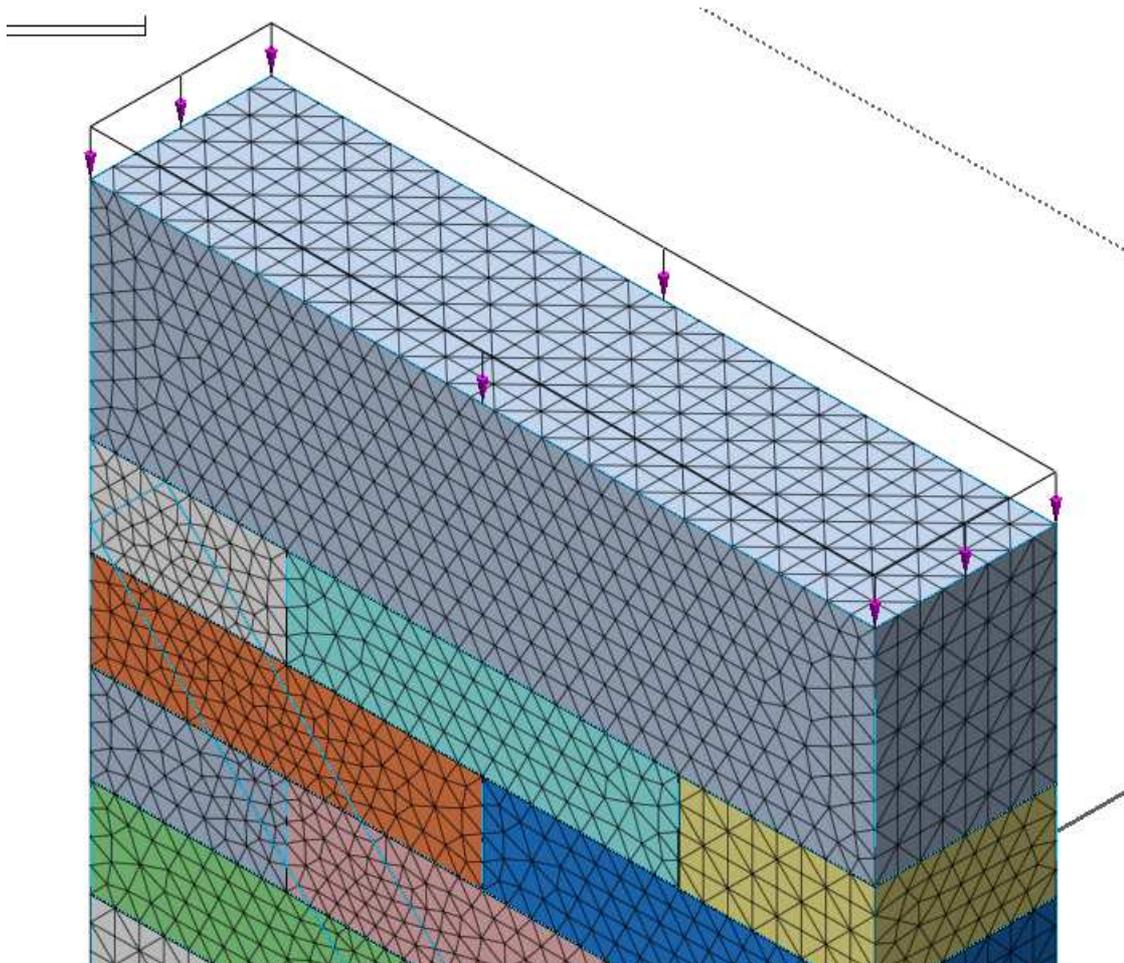


Figura 4.6.2.3 - Pressure.

4.7 *Analisi non lineare*

Per quanto riguarda concetti puramente teorici riguardanti l'analisi non lineare si riporta al *paragrafo 2.7*, in cui sono indicate le principali differenze tra un'analisi non lineare ed una lineare, specificando in particolare le possibilità non linearità (*geometriche , del materiale*). In questo paragrafo saranno riportate quindi soltanto alcune indicazioni che potrebbe essere utile avere in più rispetto a quanto già detto nel *paragrafo 2.7*.

L'analisi attraverso il programma di calcolo Midas Fea è possibile seguendo il percorso *Analysis > Analysis Case > Add*, in cui è possibile aggiungere un caso di analisi (*Figura 4.7.1*).

In questa schermata è possibile come mostrato dal menù a tendina inserire diverse tipologie di analisi tra cui una *Linear Static, Linear Buckling* ecc.

In questo caso a differenza di quanto successo durante tutto questo lavoro, l'analisi da svolgere risulta sempre essere un'analisi non lineare statica, ma con la differenza che nella schermata principale in cui precedentemente si era inserita l'opzione *Non Linear Static*, in questo caso andremo ad inserire *Construction Stage* (*figura 4.7.1*).

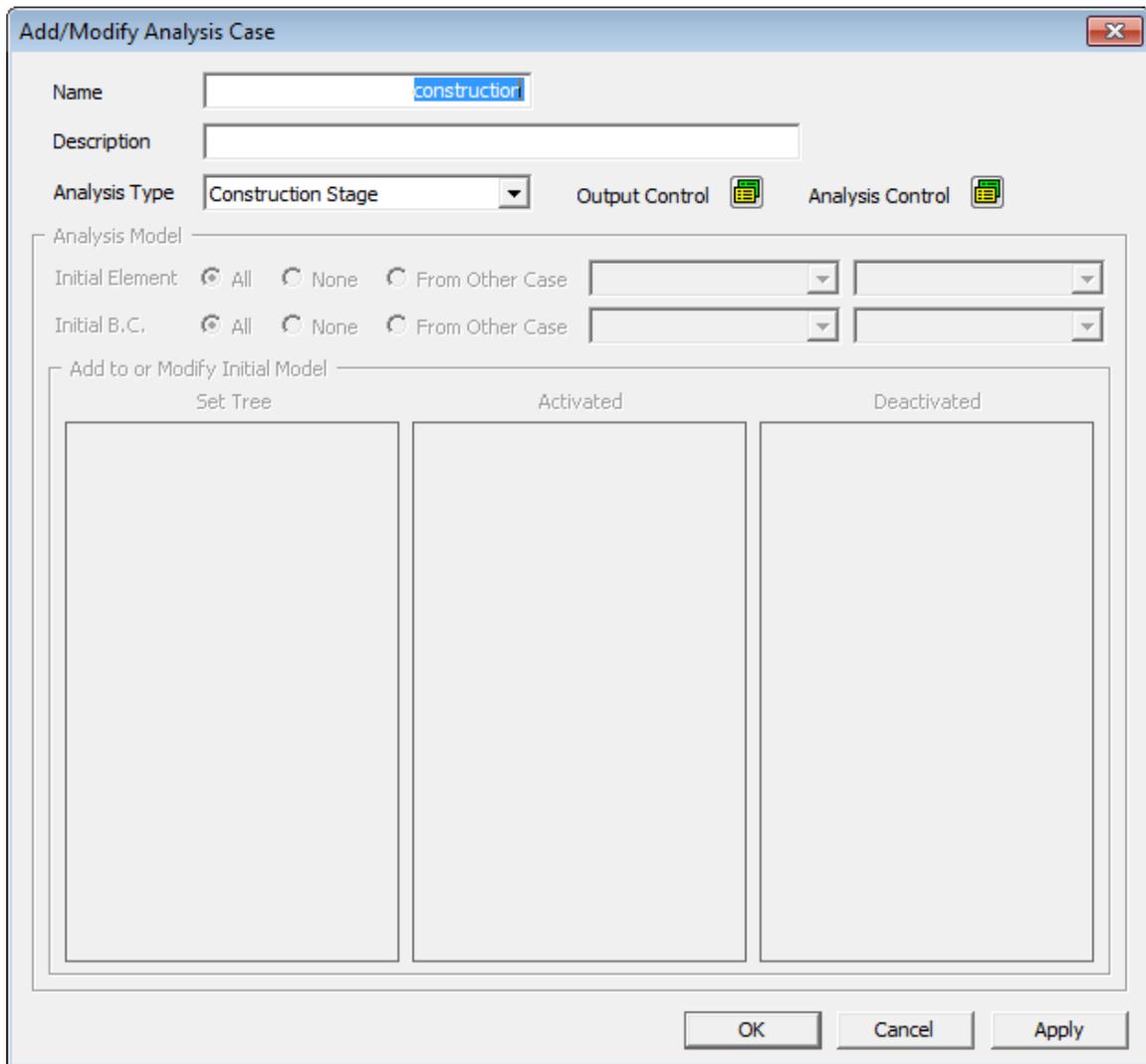


Figura 4.7.1- *New Analysis Case.*

La spiegazione di ciò, sta nel fatto che l'analisi che solitamente viene svolta per questo tipo di modelli, è un'analisi che vede un'applicazione di un carico verticale e di uno spostamento orizzontale, e mentre nel caso precedente avevamo soltanto un'unica condizione di carico e che quindi durante l'analisi non lineare il parametro che veniva suddiviso in diversi step era ovviamente il carico applicato, in questo caso, il programma non sa se far variare in step la pressione o lo spostamento, infatti nel caso in cui avessimo utilizzato la solita *Non Linear Static*, quello che sarebbe successo sarebbe stata una contemporanea applicazione per step sia dello spostamento che della pressione, che non l'obiettivo di questo lavoro.

Quello che bisogna fare però, prima di poter eseguire questo nuovo tipo di analisi è costruire quelli che il codice di calcolo chiama *Stage*, ovvero istanti temporali diversi a cui saranno applicati i diversi carichi.

Ciò è possibile cliccando su *Analysis > Construction Stage > Define Construction Stage* (tasto rapido ).

Una volta aperta la schermata in *figura 4.7.2*, cliccando su *New*, è possibile creare nuovi stage di carico.

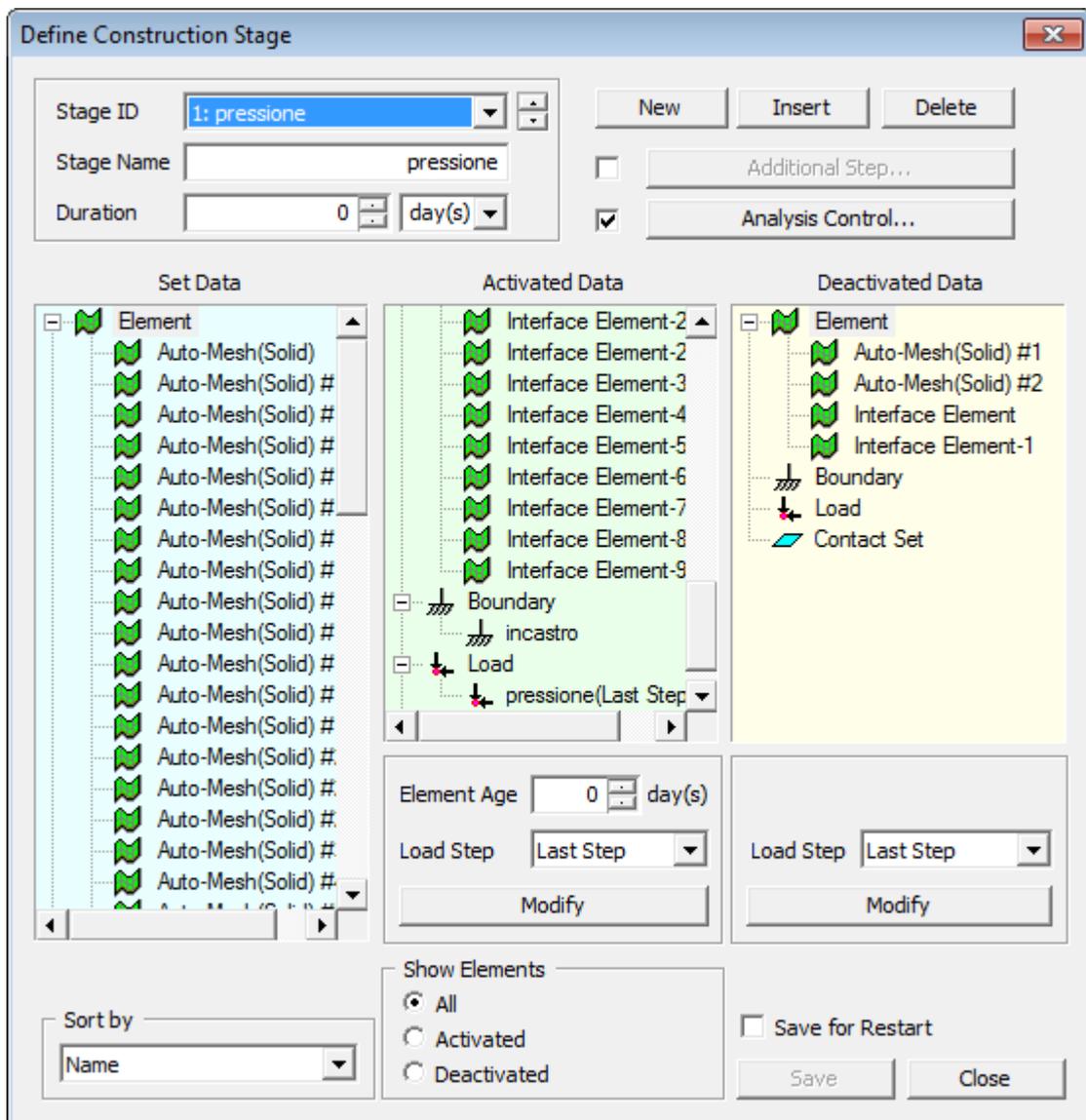


Figura 4.7.2- Define Construction Stage.

Innanzitutto bisogna trasportare, così come si faceva anche nella schermata della *non linear static*, tutto ciò che si vuole faccia parte dello stage creato, sia per le mesh che per i carichi

e i vincoli, successivamente selezionando *Analysis Control*, è possibile effettuare l'analisi desiderata, e quindi andremo a selezionare la solita *Initial Stiffness*, caratterizzata da 5 passi e 5 iterazioni per passo.

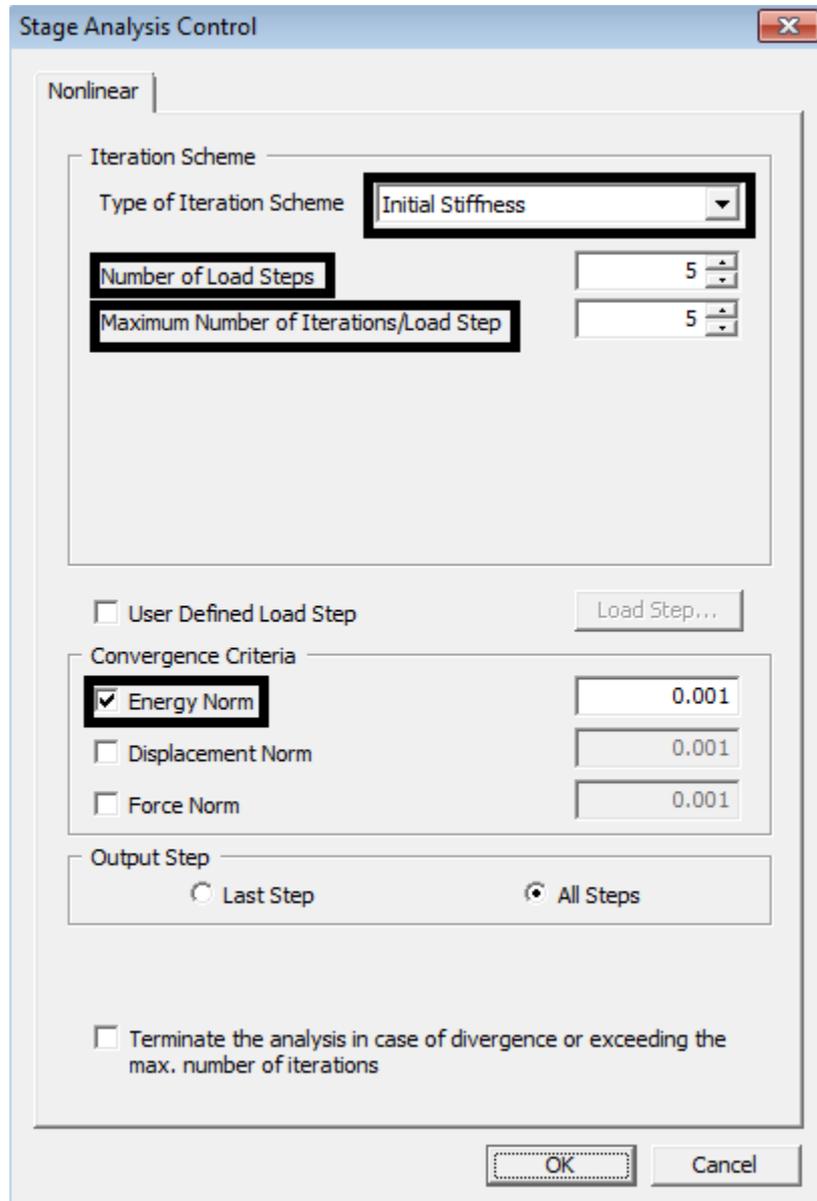


Figura 4.7.3- Analysis Control(stage1).

Poiché come abbiamo detto la nostra analisi risulta essere formata da due successivi istanti temporali, caratterizzati il primo dall'applicazione della pressione verticale, ed il secondo dall'applicazione dello spostamento impresso alla testa superiore orizzontale, sono stati creati due *Stage*.

La differenza sostanziale tra i due *stage* è costituita dal fatto che sono applicati per ogni *stage* due differenti situazioni carico, nel primo *stage* è stata applicata solamente la pressione verticale, mentre per quanto riguarda il secondo *stage* si è applicato solamente lo spostamento impresso in direzione orizzontale.

Per quanto riguarda lo *stage* caratterizzato dal carico orizzontale, come parametri dell'analisi non lineare si è deciso di utilizzare un valore di 20step di carico e 20 iterazioni per ciascuno step.

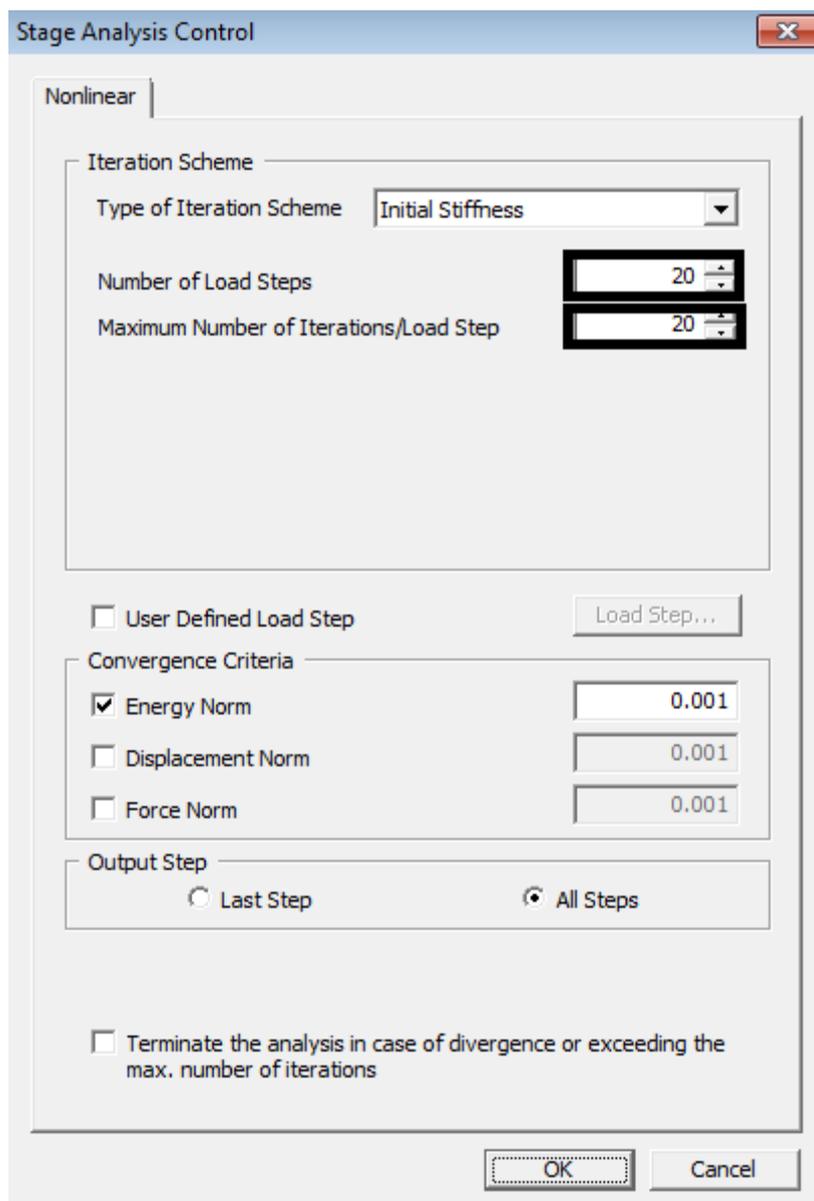


Figura 4.7.4- Analysis Control(stage2).

Dopo aver inserito i diversi stage di carico, e aver creato un'analisi *Construction Stage*, è stata lanciata l'analisi (tasto rapido ).

4.8 *Elaborazione ed analisi dei risultati numerici*

Come già esposto precedentemente nell'introduzione di questa tesi, i meccanismi di collasso degli edifici in muratura possono essere molteplici, in questo caso però essendo il modello che si sta analizzando un pannello in muratura, e non un edificio, verranno esposti i possibili meccanismi di collasso, che poi ritroveremo in parte nell'analisi numerica.

Il comportamento in termini di modalità di rottura di un pannello murario soggetto ad azioni nel piano dipende da diversi fattori tra i quali intervengono alcuni legati alla geometria (altezza, base, spessore, snellezza, regolarità dei conci, tessitura della muratura), altri connessi alle caratteristiche meccaniche degli elementi costituenti il pannello (resistenza a compressione e a trazione del concio murario, resistenza a trazione della malta, resistenza a taglio della muratura) ed altri ancora che dipendono dall'entità dello stato tensionale agente sul pannello.

Le modalità di rottura possono essere suddivise in:

- rottura per fessurazione diagonale (*Diagonal Tension*);
- rottura per un meccanismo di scorrimento (*Joint Sliding*);
- rottura per flessione (*Flexural Cracking*);
- ribaltamento del pannello (*Pier Rocking*).

Rottura per fessurazione diagonale (Diagonal Tension)

Le fessure, che si sviluppano interessando il pannello quasi per l'intera sua altezza, sono orientate secondo le direzioni principali della tensione e (in dipendenza del tipo di malta) possono interessare solo i giunti di malta (ma in tal caso si va verso un altro meccanismo di rottura "joint-sliding") oppure attraversano anche gli elementi murari.

Dunque tali fessure diagonali interessano in prevalenza giunti di malta oppure elementi murari, a seconda della resistenza relativa tra loro.

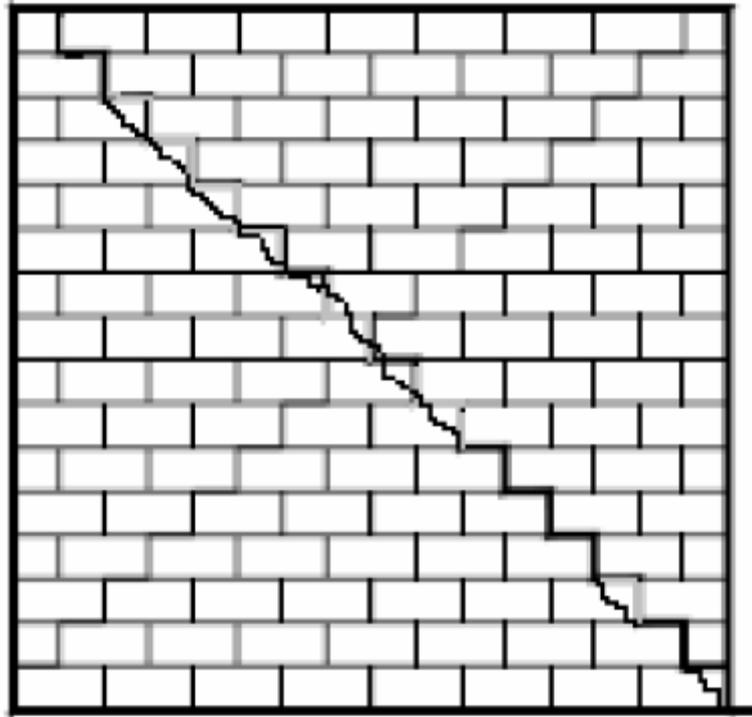


Figura 4.8.1 - Rottura per fessurazione diagonale.

Rottura per fessurazione diagonale (Joint Sliding)

Lo scorrimento avviene in corrispondenza dei giunti di malta, presentando questa una resistenza (soprattutto per gli edifici realizzati in passato) solitamente inferiore rispetto agli elementi costituenti i pannelli.

Questo scorrimento può avvenire o lungo linee di frattura orizzontali, ciò quando i giunti interessati sono disposti sull'orizzontale (classicamente quando si è in presenza di pannelli con conci o mattoni regolari), oppure secondo un andamento diagonale a scaletta, quando i giunti di malta interessati sono in alternanza verticali orizzontali.

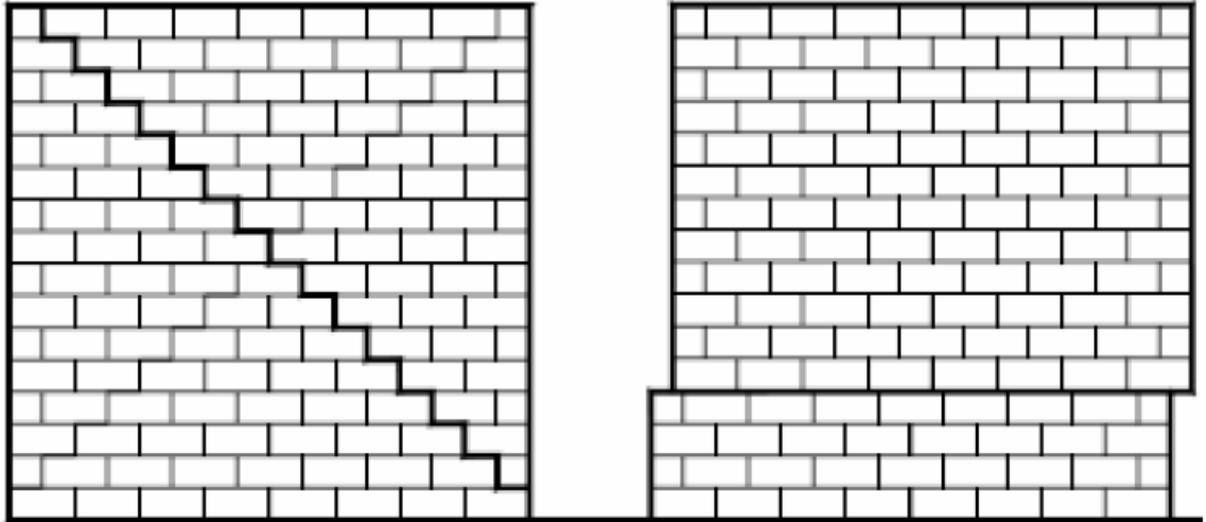


Figura 4.8.2 - Rottura per meccanismo di scorrimento.

Ben si presta la terminologia anglosassone a descrivere questa modalità di rottura “stair-stepped diagonal crack”.



Figura 4.8.3 - Stair-stepped diagonal crack.

Alcuni autori sono soliti confondere quest'ultima modalità di rottura con quella per fessurazione diagonale, nella quale di solito interviene oltre alla rottura dei corsi di malta anche quella degli elementi costituenti il pannello.

Lo scorrimento può avvenire anche in corrispondenza del piano di fondazione, (si parla in tal caso di “bed-joint sliding at wall base”), questo perché è ivi massimo il taglio di piano.

Rottura per flessione (Flexural Cracking)

Le fessure hanno origine alla base del muro, ma non si propagano in maniera tale da interessarlo interamente.

Tale modalità può essere seguita dalla rotazione del pannello, come meglio descritto in seguito, in conseguenza della trascurabile resistenza a trazione dei giunti di malta e degli elementi murari.

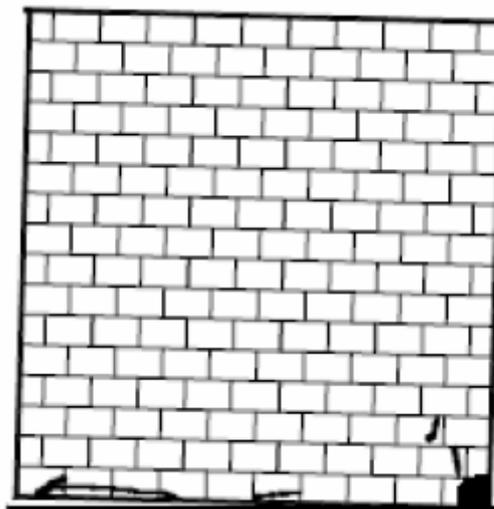


Figura 3.8.4 - Rottura per flessione.

Rotazione rigida del pannello (Pier Rocking)

Si verifica al seguito della formazione di fessure per flessione al piede del pannello murario, con una rotazione da corpo rigido intorno al piede stesso.

Tale meccanismo si presenta tipicamente allorquando la resistenza a taglio del pannello è elevata, lo sforzo normale su di esso agente è basso ed il pannello è snello.

Infatti, snellezza ed elevata resistenza a taglio, comportano la crisi per flessione del pannello, a seguito poi della formazione di fessure, il cinematismo viene agevolato qualora sia agente una tensione di compressione molto elevata.

Le fessure hanno origine al piede del muro per poi propagarsi attraverso lo stesso.

È raro poter osservare questo tipo di crisi del pannello a seguito del sisma, in quanto al cessare delle oscillazioni da esso provocate le fessure tendono a chiudersi.

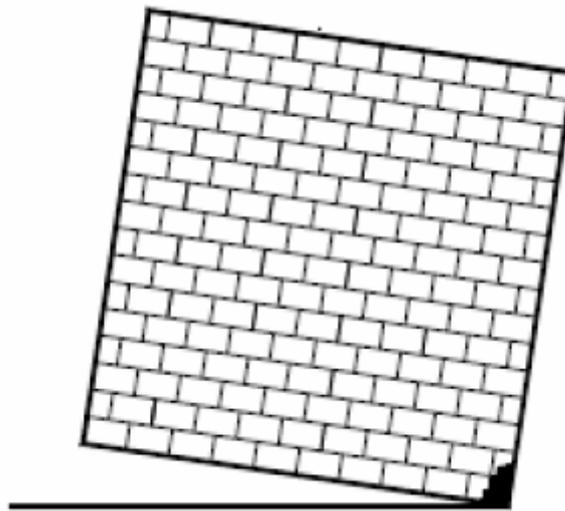


Figura 4.8.5 - Rotazione rigida del pannello.

Dal punto di vista dei risultati che sono stati interrogati durante la modellazione della muratura, si è fatto riferimento diverse volte alle cosiddette *Von Mises Stress*.

In particolare i risultati che successivamente verranno mostrati fanno riferimento ovviamente allo *stage2*, in cui la pressione verticale è già stata applicata e si sta man mano crescendo il valore dello spostamento orizzontale.

A titolo di esempio viene mostrata una prima figura in cui è possibile vedere chiaramente la rottura della parete per flessione del pannello avvenuta durante le prime analisi che sono state effettuate per la parete in cui oltretutto non era ancora stato applicato il metodo dell'analisi *Construction stage*, infatti la parete risulta essere sostanzialmente caricata soltanto da un carico orizzontale, in quanto la normale tipologia di analisi non lineare non era in grado di riuscire a implementare anche la pressione orizzontale.

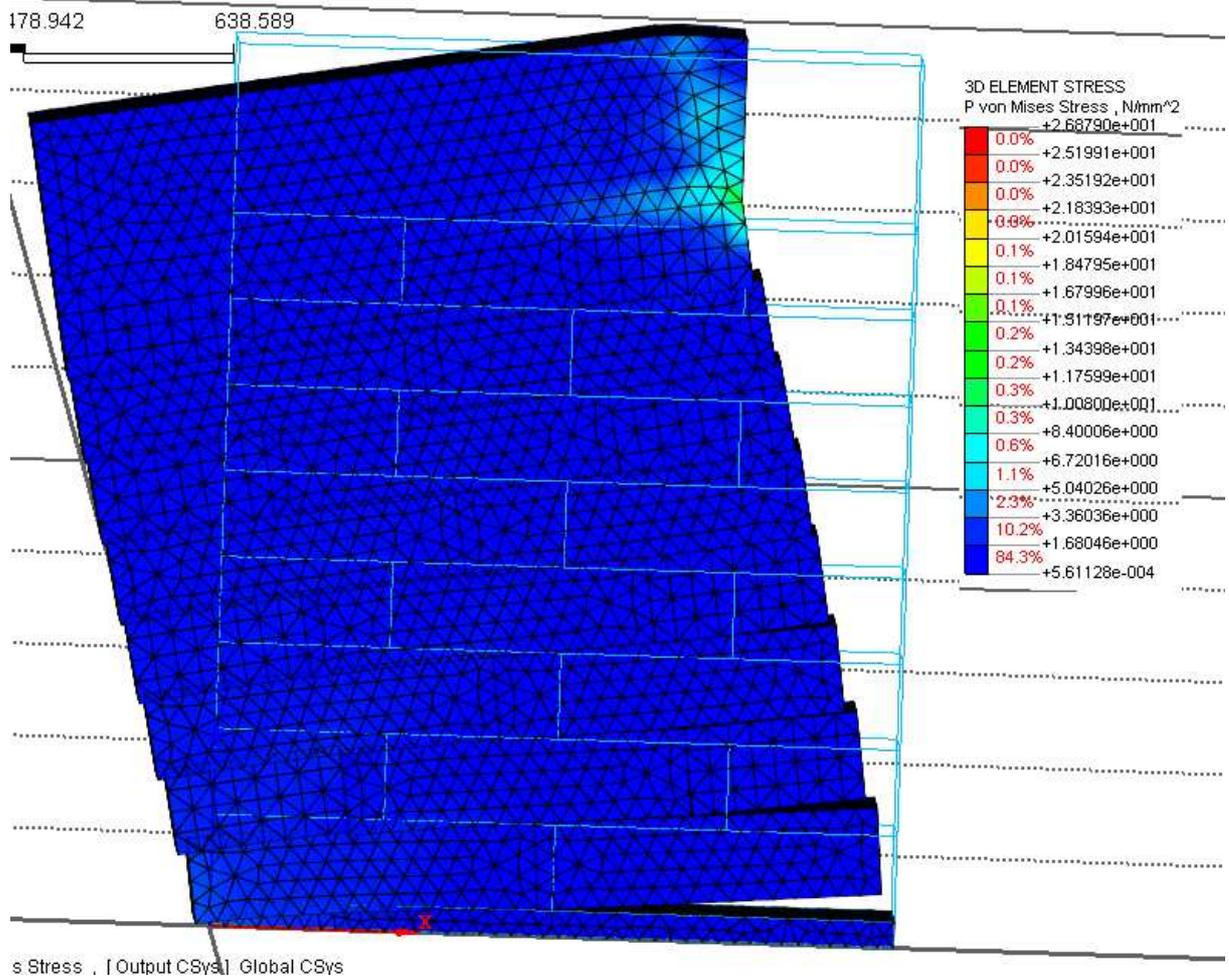


Figura 4.8.6 - Rottura per flessione.

Viene di seguito mostrata di seguito una serie di figure, associate a diversi step di carico, che mostrano le Von Mises Stress in corrispondenza della porzione frontale della parete.

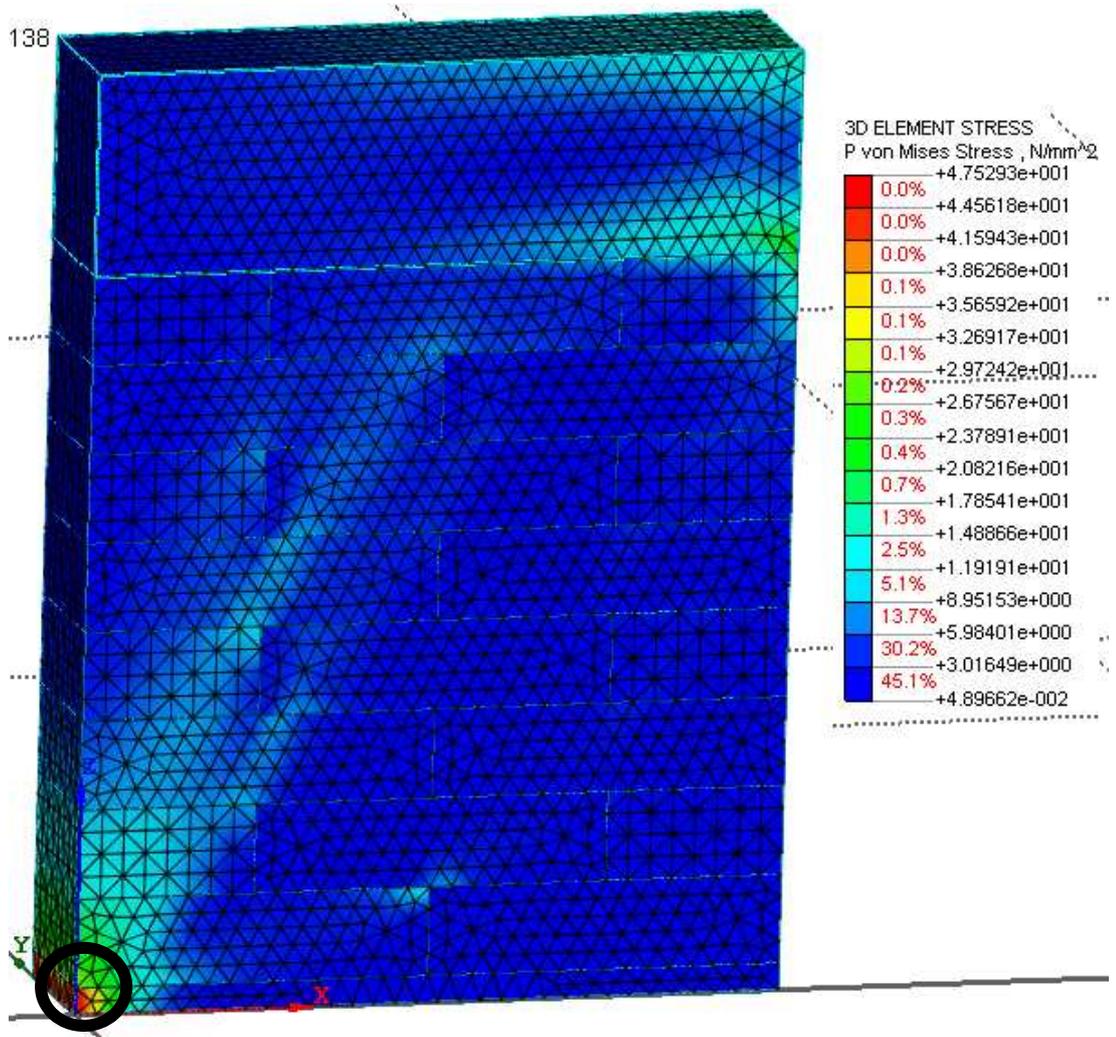


Figura 4.8.7 - Von Mises Stress (passoA).

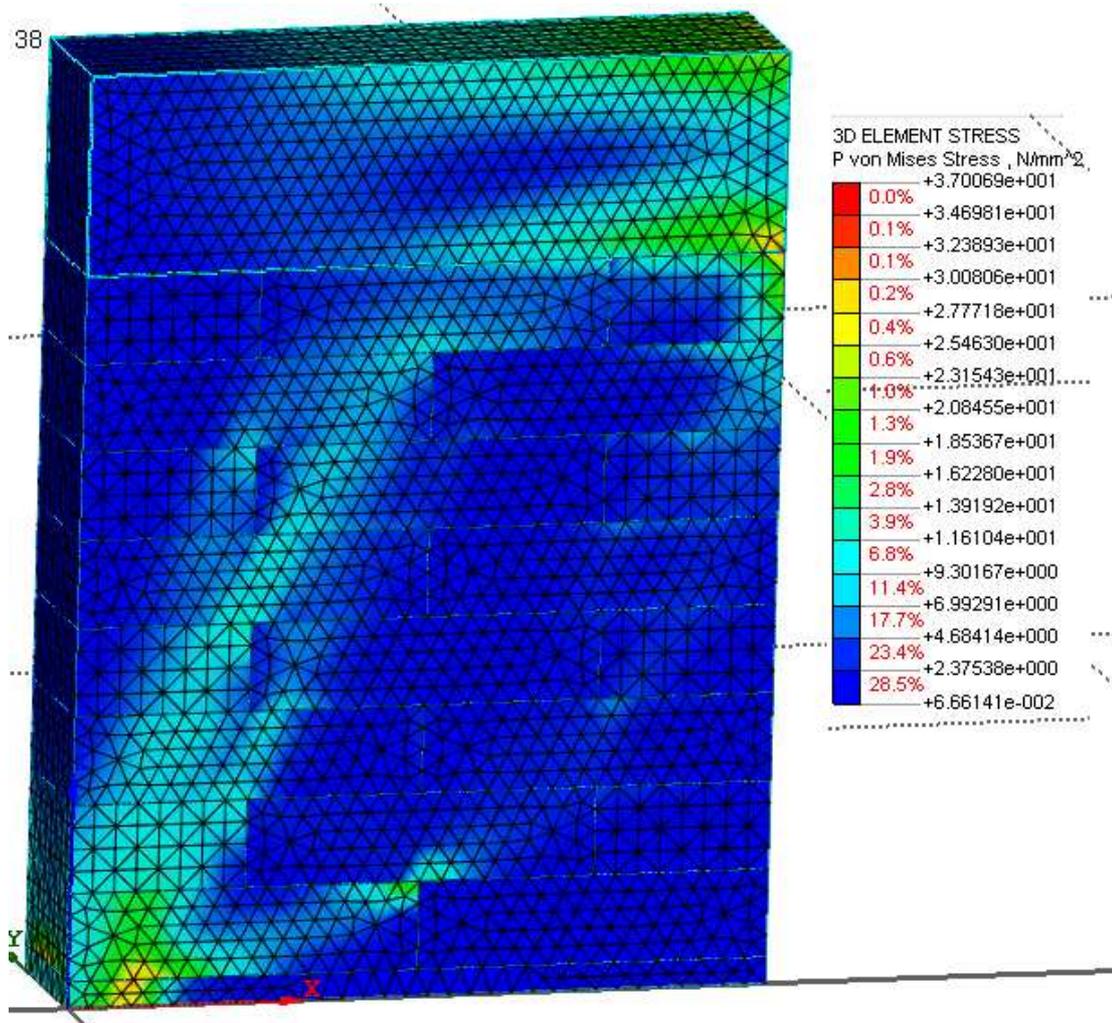


Figura 4.8.8 - Von Mises Stress (passoB).

Dalla *figura 4.8.7* è possibile capire come sia già stata applicata tutta la pressione verticale, infatti alla base della parete si può notare un picco di tensione.

Particolare attenzione inoltre va riservata alla striscia diagonale compressa, che al crescere dello step di carico tende ad aumentare di larghezza.

Viene di seguito riportata anche una figura (*figura 4.8.9*), che mostra la deformata della parete da cui si può ben capire come ci sia una certa fessurazione diagonale.

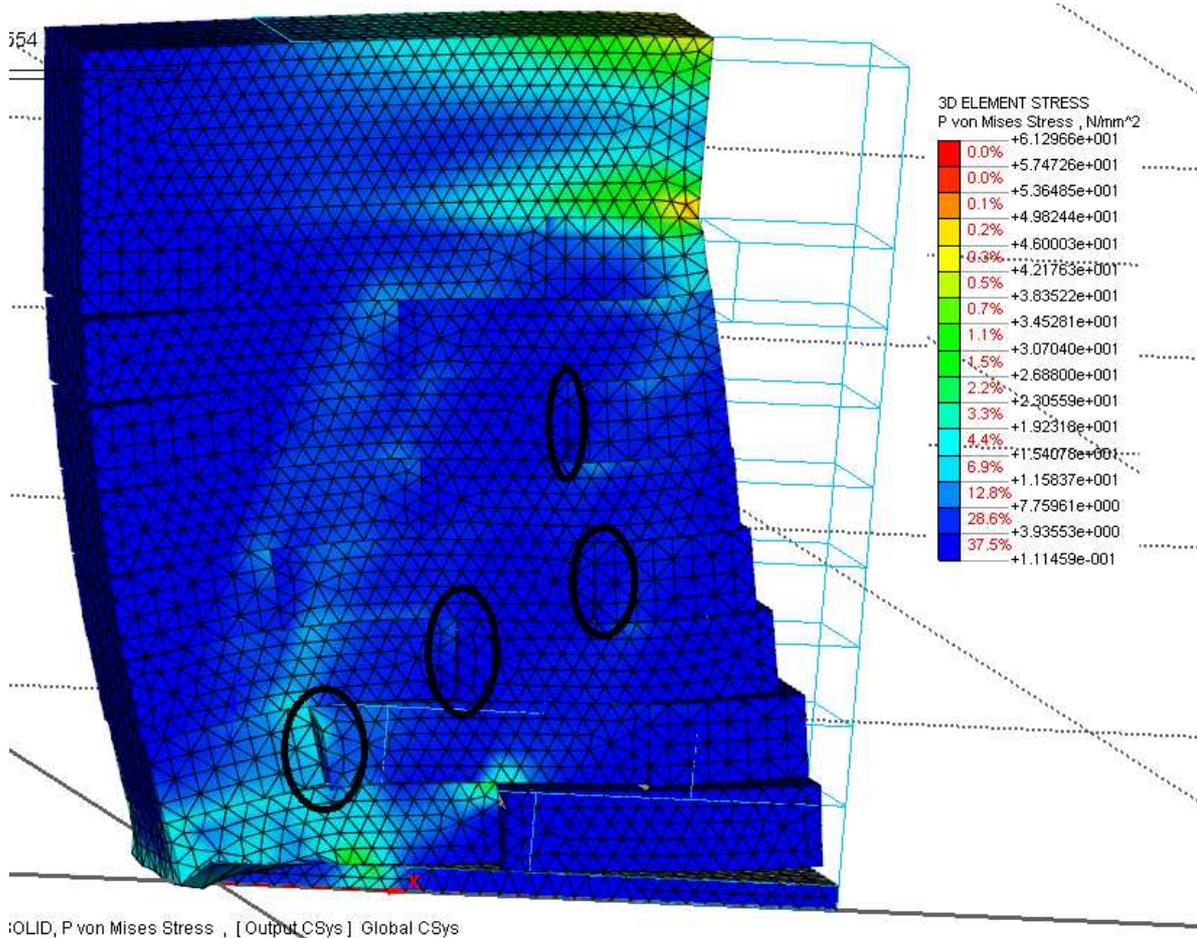


Figura 4.8.9 - Deformata.

Vengono rappresentate anche le tensioni lungo z.

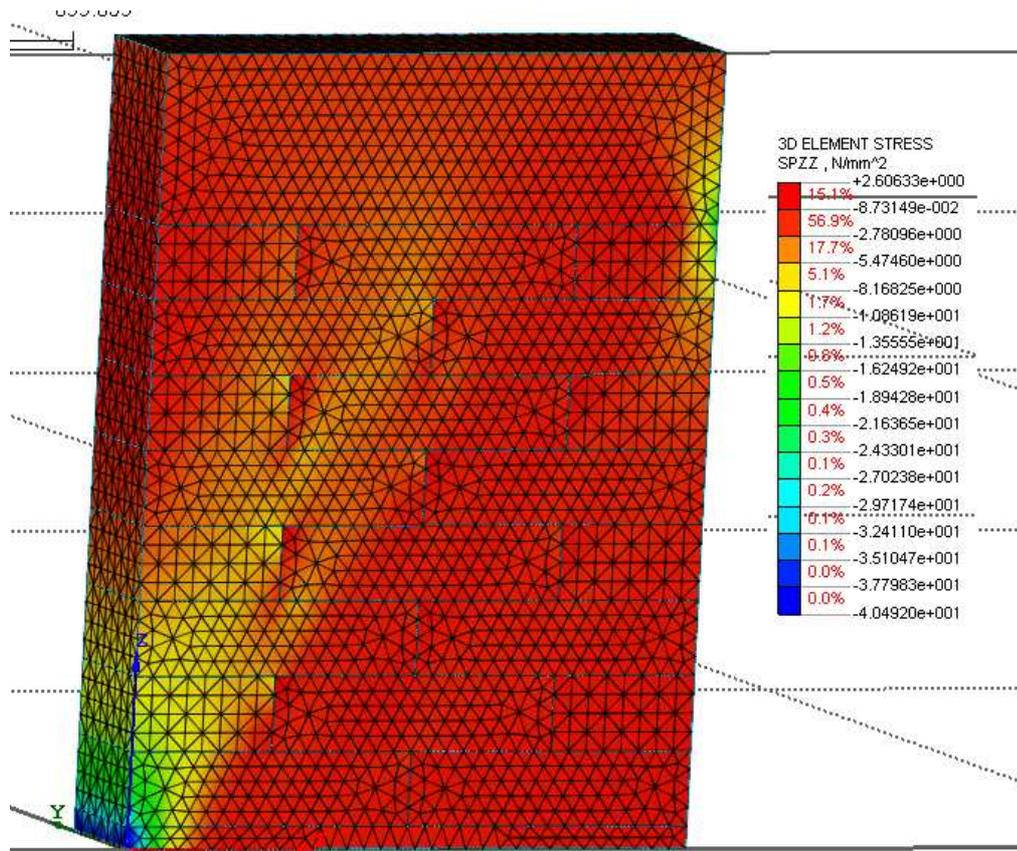


Figura 4.8.10 - Stress SPZZ.

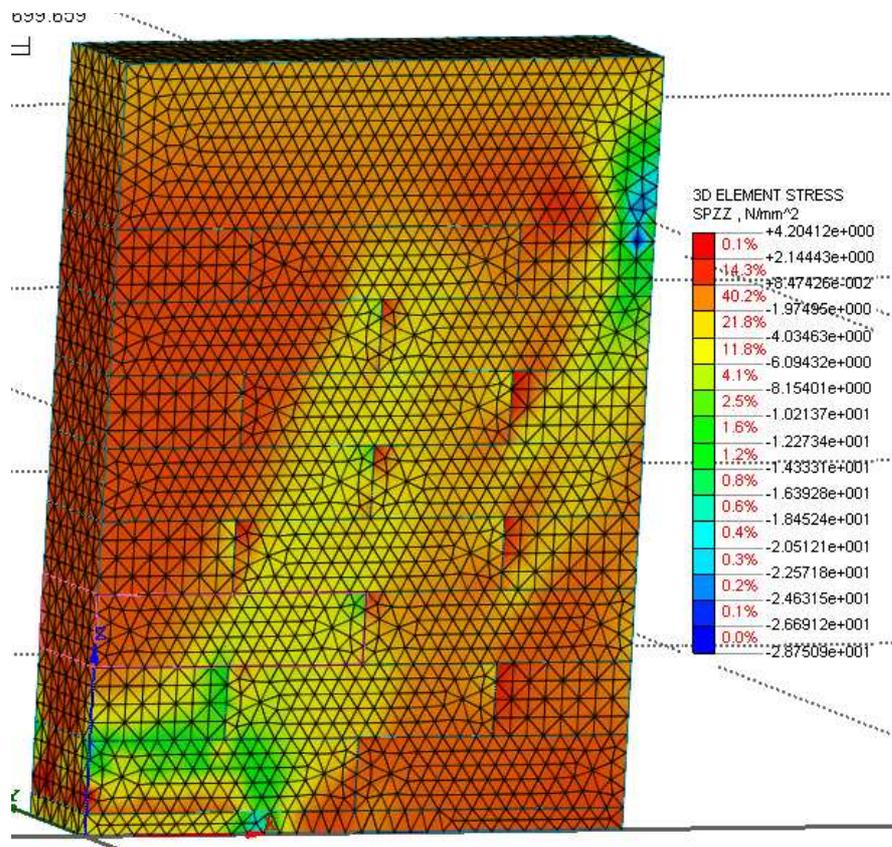


Figura 4.8.11 - Stress SPZZ.

I due grafici in *figura 4.8.10 – 4.8.11*, si riferiscono a due diverse situazioni di carico, la prima in corrispondenza del ramo crescente della curva mostrata in *figura 4.8.12*, il secondo invece fa riferimento ad un passo successivo al picco di carico, in cui la zona compressa come si può ben vedere anche dalla legenda aumenta di larghezza.

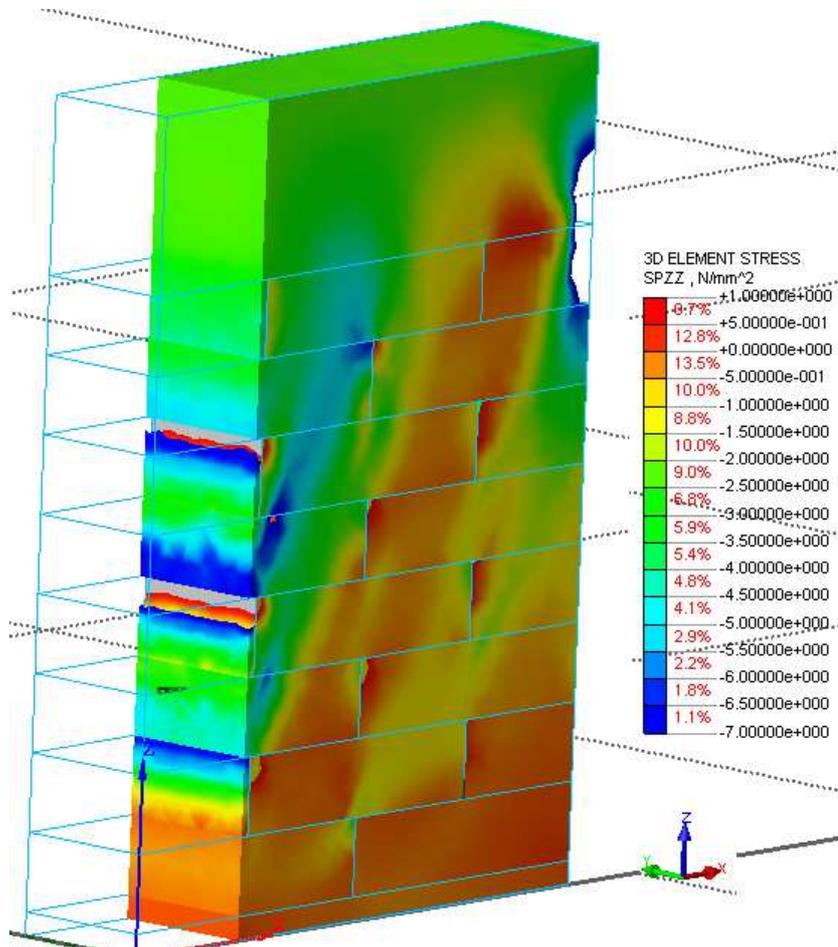


Figura 4.8.12 - Particolare stress SPZZ (passo1).

In *figura 4.8.12*, viene mostrata una sezione della parete, in maniera tale da poter valutare anche il comportamento anche del singolo mattone nel modello complessivo.

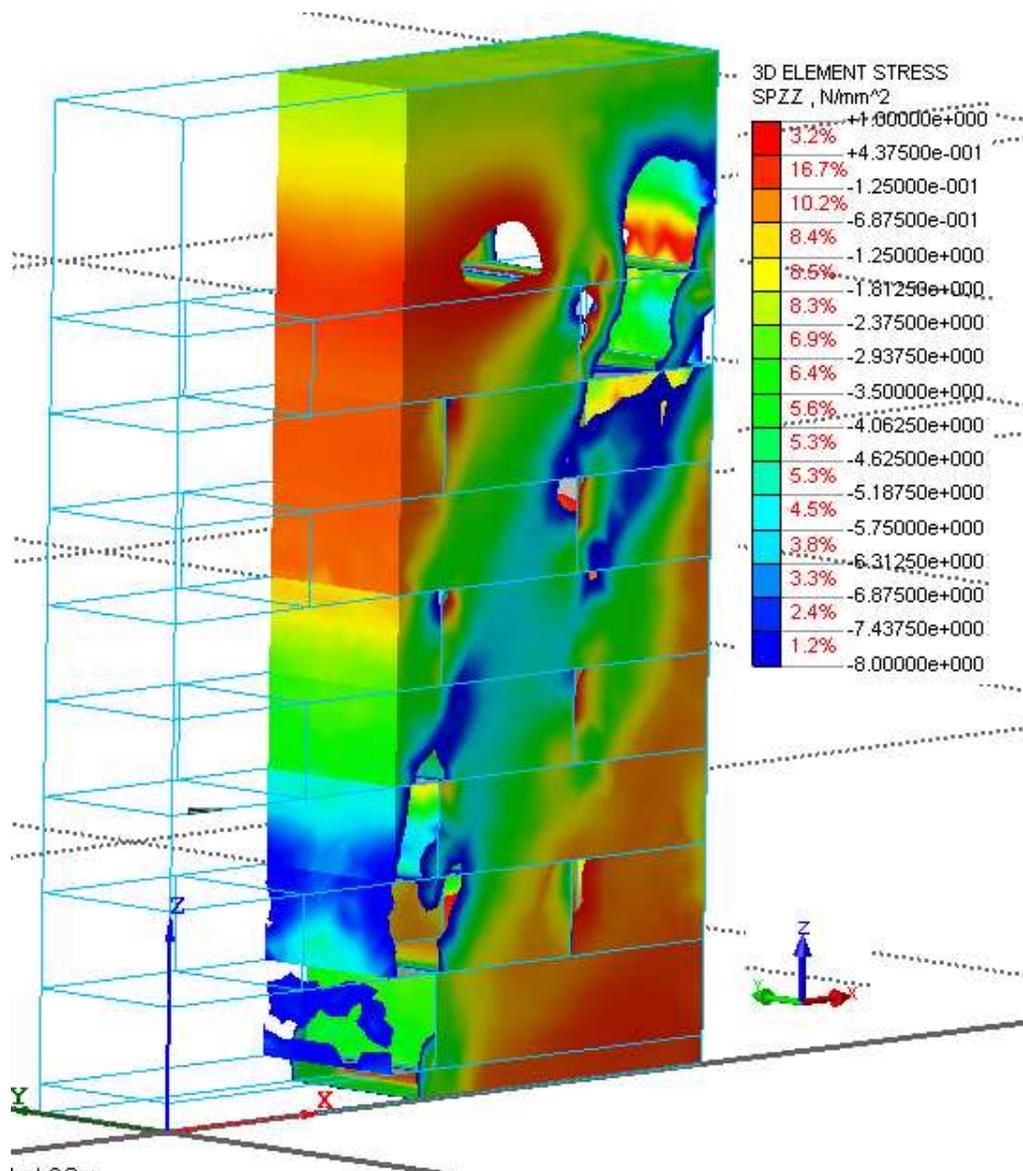


Figura 4.8.13 - Particolare stress SPZZ (passo2).

Quello che accade con il vedere i passi relativi alla zona plastica della parete, è che le compressioni sulla parete crescono, ed in particolare si spostano lungo la porzione inferiore della parete stessa.

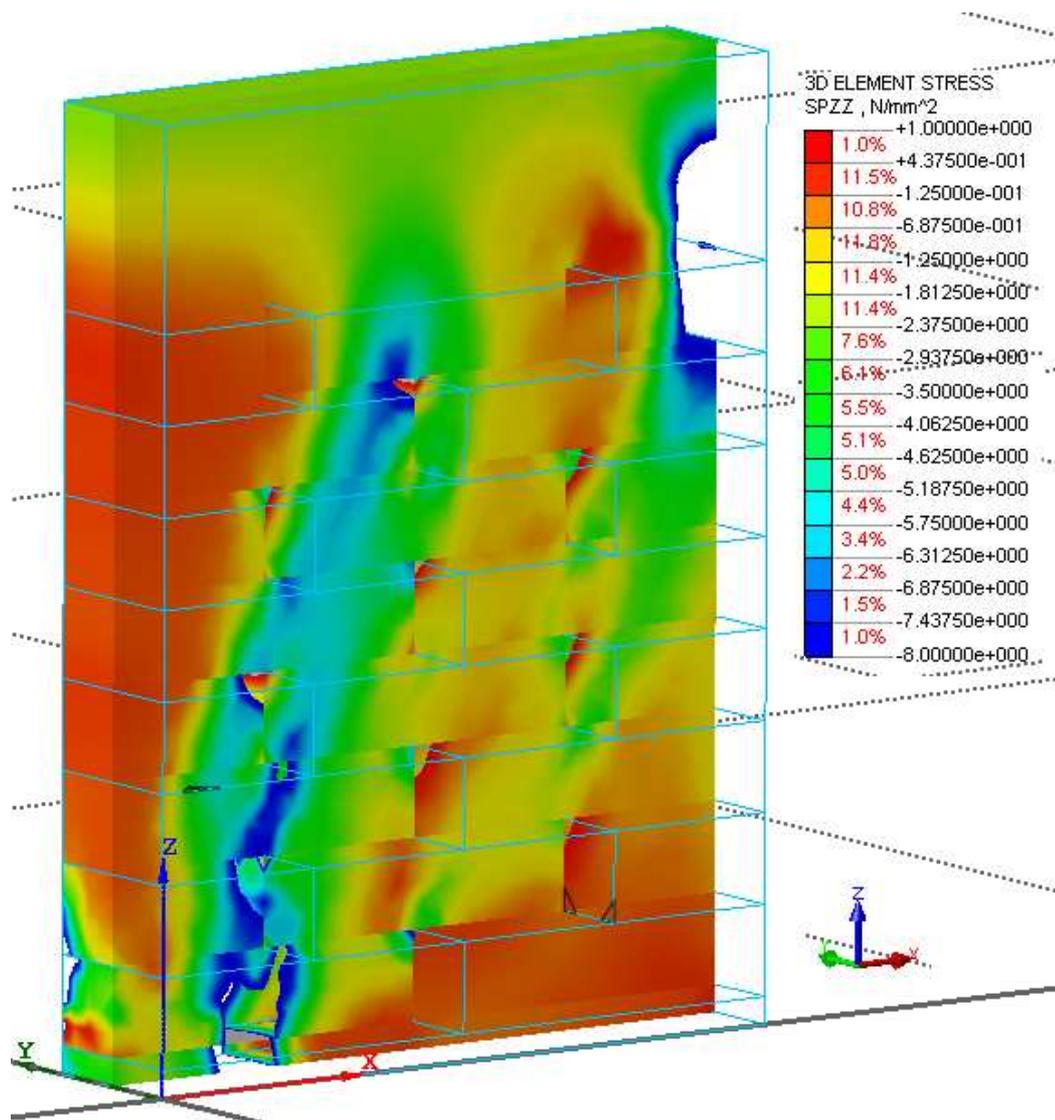


Figura 4.8.14 - Particolare stress SPZZ, sezione trasversale

Nella *figura 4.8.14* invece è mostrata una sezione in direzione y-y, per capire come il mattone si comporta all'applicazione del carico.

Sono stati inoltre estrapolati i dati per poter ottenere il solito diagramma forza spostamento, in modo tale da poter valutare il massimo sforzo raggiungibile dalla parete e per poter fare delle considerazioni riguardo il ramo plastico.

Il criterio di estrapolazione dei dati è il medesimo ormai già visto diverse volte precedenti.

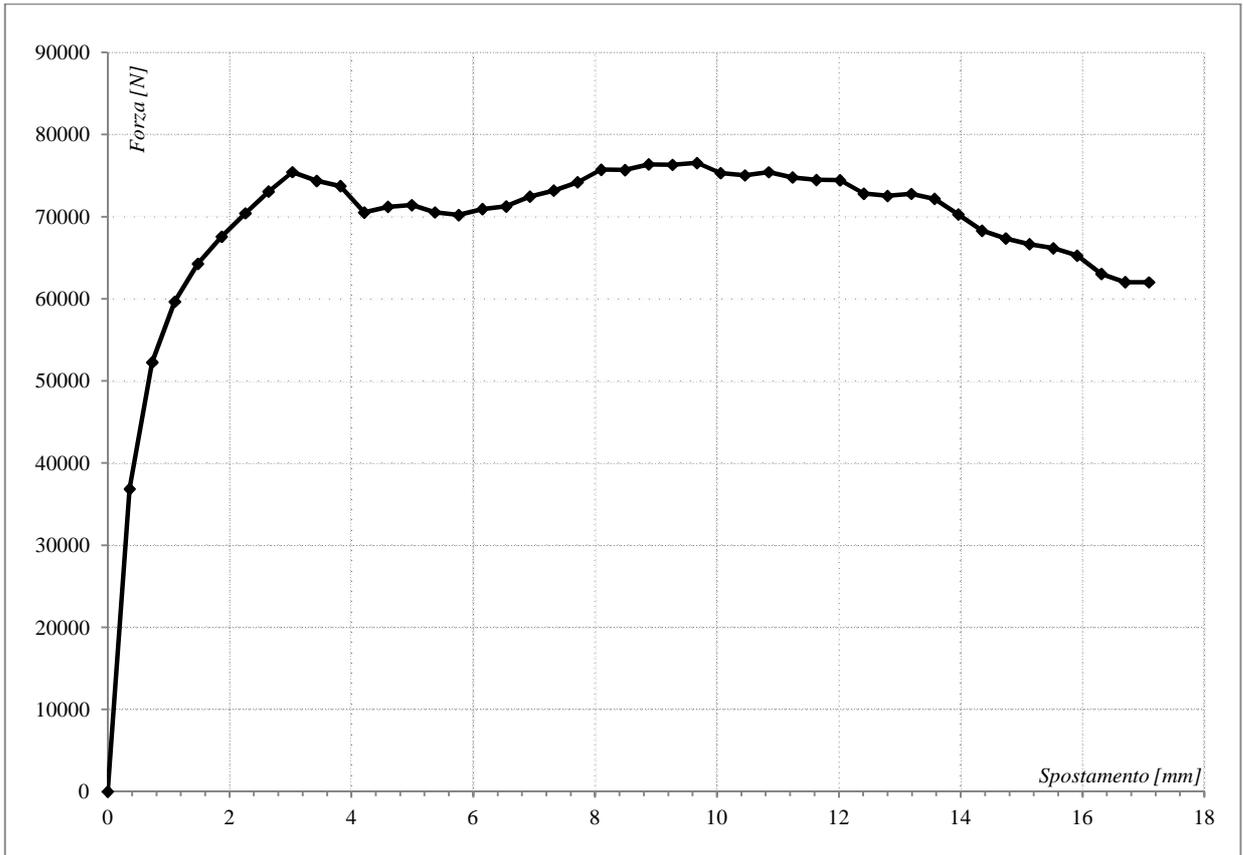


Figura 4.8.15 - Diagramma forza-spostamento.

Come si può vedere dalla *figura 4.8.15* il massimo valore di forza raggiungibile dal muro è pari a $75000N$, oltre cui si ha un certo ramo plastico, l'analisi si è conclusa poiché il codice di calcolo non riusciva ad andare in convergenza.

5 PARETE CON RINFORZO FRP

In questa sezione si farà riferimento sempre al modello C, ovvero quello della parete, con l'unica differenza che oltre agli elementi caratterizzanti il modello C, in questa situazione sono stati aggiunti dei rinforzi caratterizzati da lamine di FRP, una per ogni faccia della parete.

Le strutture esistenti in muratura non sono state progettate per resistere alle sollecitazioni sismiche, perciò la maggior parte degli edifici esistenti non è conforme alle nuove norme che hanno modificato la classificazione delle zone sismiche sul territorio nazionale. Per questo motivo, sempre più spesso sono necessari interventi di adeguamento che forniscano loro maggiori risorse, come richiesto dalle norme stesse. Tra i molteplici interventi che possono essere realizzati sugli edifici in muratura per migliorarne le caratteristiche dinamiche, le ricerche compiute negli ultimi anni hanno concentrato la loro attenzione sull'utilizzo di materiali polimerici fibrorinforzati (FRP). In letteratura si trovano numerosi studi relativi al rinforzo dei maschi murari e ai benefici che esso introduce nella risposta sismica delle strutture, mentre, nonostante l'assodata importanza che rivestono le fasce murarie, ad oggi non sono state eseguite ricerche sperimentali relative al loro rinforzo tramite materiali FRP.. Le modifiche apportate al codice di calcolo forniscono la possibilità di introdurre rinforzi in FRP, applicati alle fasce murarie e permettono di studiare quali benefici apporta alla risposta globale della struttura questo tipo di intervento.

Questa moderna tecnica di rinforzo può essere applicata agli edifici in muratura per incrementarne la loro resistenza e duttilità. L'intervento di rinforzo ha lo scopo di conseguire, per i singoli elementi strutturali e per l'intera costruzione, un incremento di resistenza nei confronti delle azioni sollecitanti e, quando possibile, un aumento dei valori degli spostamenti esibiti all'atto del collasso.

5.1 Modellazione geometrica e discretizzazione

A partire dal modello C della parete, quello che si è fatto è stato solamente aggiungere una ulteriore geometria che consentisse successivamente la creazione la modellazione di fasce di FRP.

Tramite il comando *Geometry > Curve > Create 3D > Polyline (Wire)*, è stato possibile creare un elemento di geometria lineare, su cui poi, utilizzando il comando *Geometry > Generator Feature > Extrude* è stato trasformato in 3D.

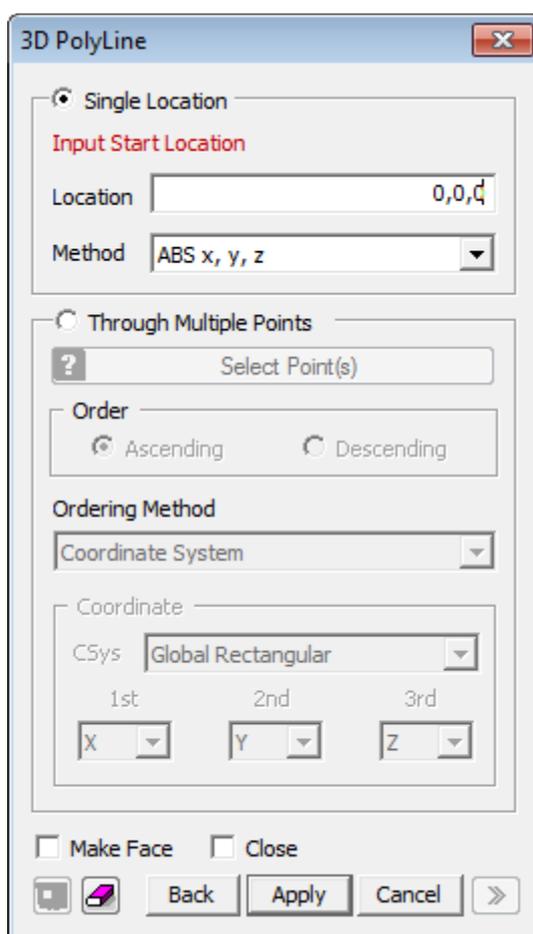


Figura 5.1.1 - Polyline.

Con il comando *Polyline*, è possibile creare, partendo da un certo punto, e incrementando in maniera relative le distanze, una pollilinea così come accade in altri programmi.

Mentre per quanto riguarda il comando *Extrude* è possibile trasformare un determinato elemento 2D in 3D, scegliendo la direzione in cui creare la terza dimensione.

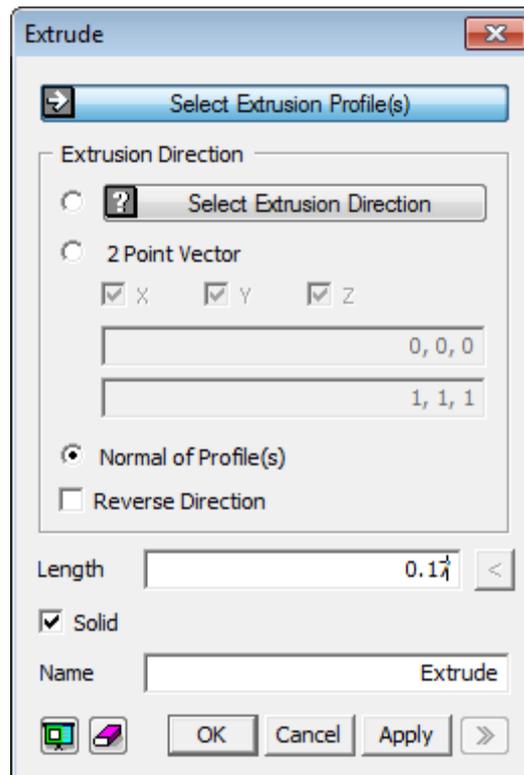


Figura 5.1.2 - Extrude.

Nel caso in questione si è scelto di creare la terza dimensione in direzione normale alla figura, e di creare uno spessore di 0.17mm , ovvero quello della lamina.

Viene quindi mostrata di seguito una figura che mostra la schematizzazione geometrica del nuovo modello, caratterizzato oltre che dalla parte anche dalle lamine, una per ogni faccia principale.

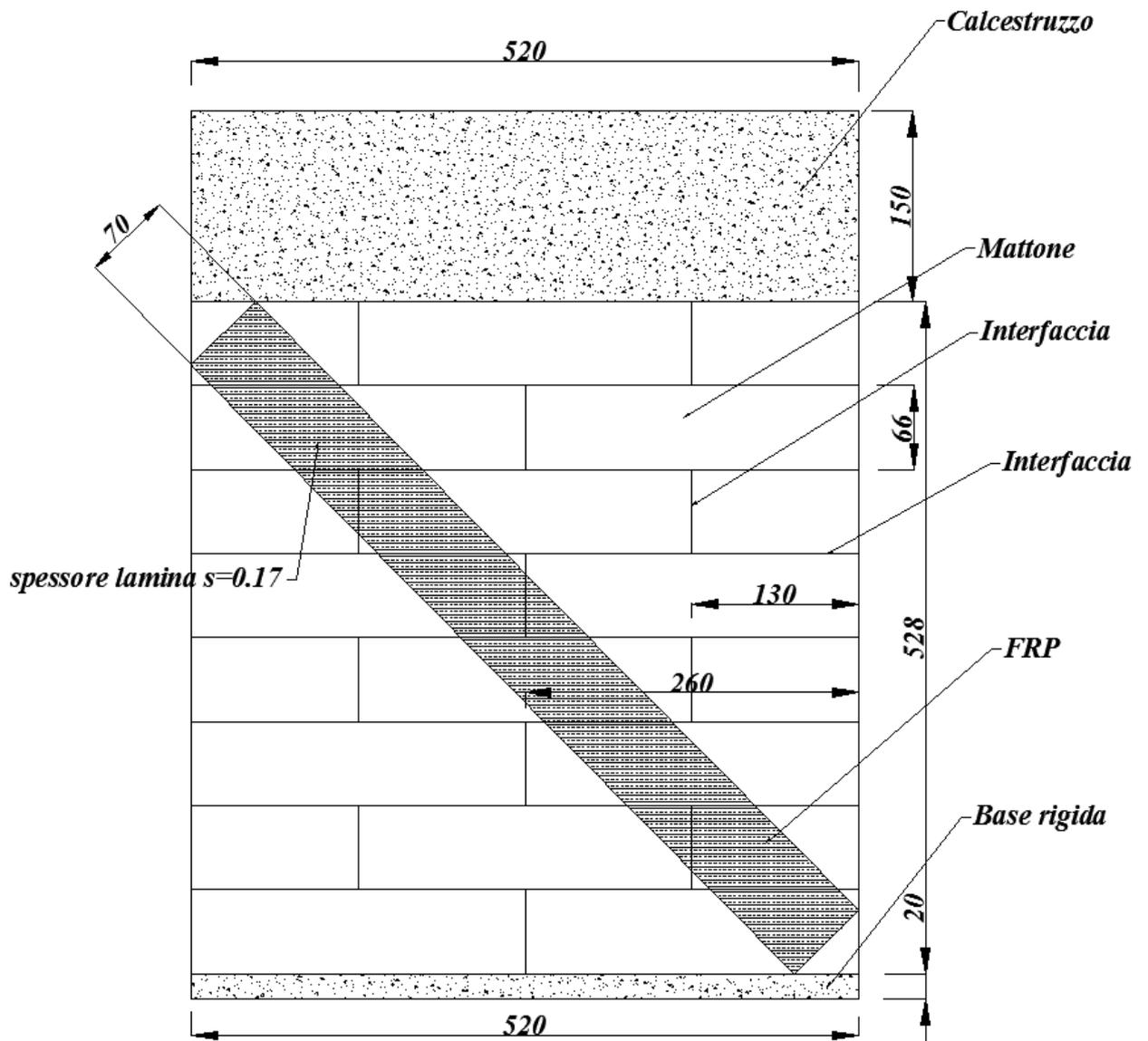


Figura 5.1.3 - Parete con rinforzo FRP.

La motivazione del fatto che la lamina di FRP, sia stata posizionata in questo modo, viene dalla considerazione già fatta precedentemente, riguardante la *figura 4.8.7-4.8.8*, a proposito della striscia diagonale compressa, infatti se in quella direzione sono concentrate le compressioni, nella parte opposta saranno concentrate le trazioni ed è proprio questo il motivo della posizione della lamina.

Per quanto riguarda la discretizzazione della lamina, il percorso seguito è il medesimo che per le altre discretizzazioni, l'unica differenza, è che per quanto riguarda questa geometria, si è deciso di adottare una dimensione di mesh più fitta, in modo tale da avere anche in corrispondenza dell'interfaccia che successivamente sarà creata, una maggiore possibilità di interpretazione.

Viene mostrata quindi una figura che rappresenta la discretizzazione totale della parete con FRP.

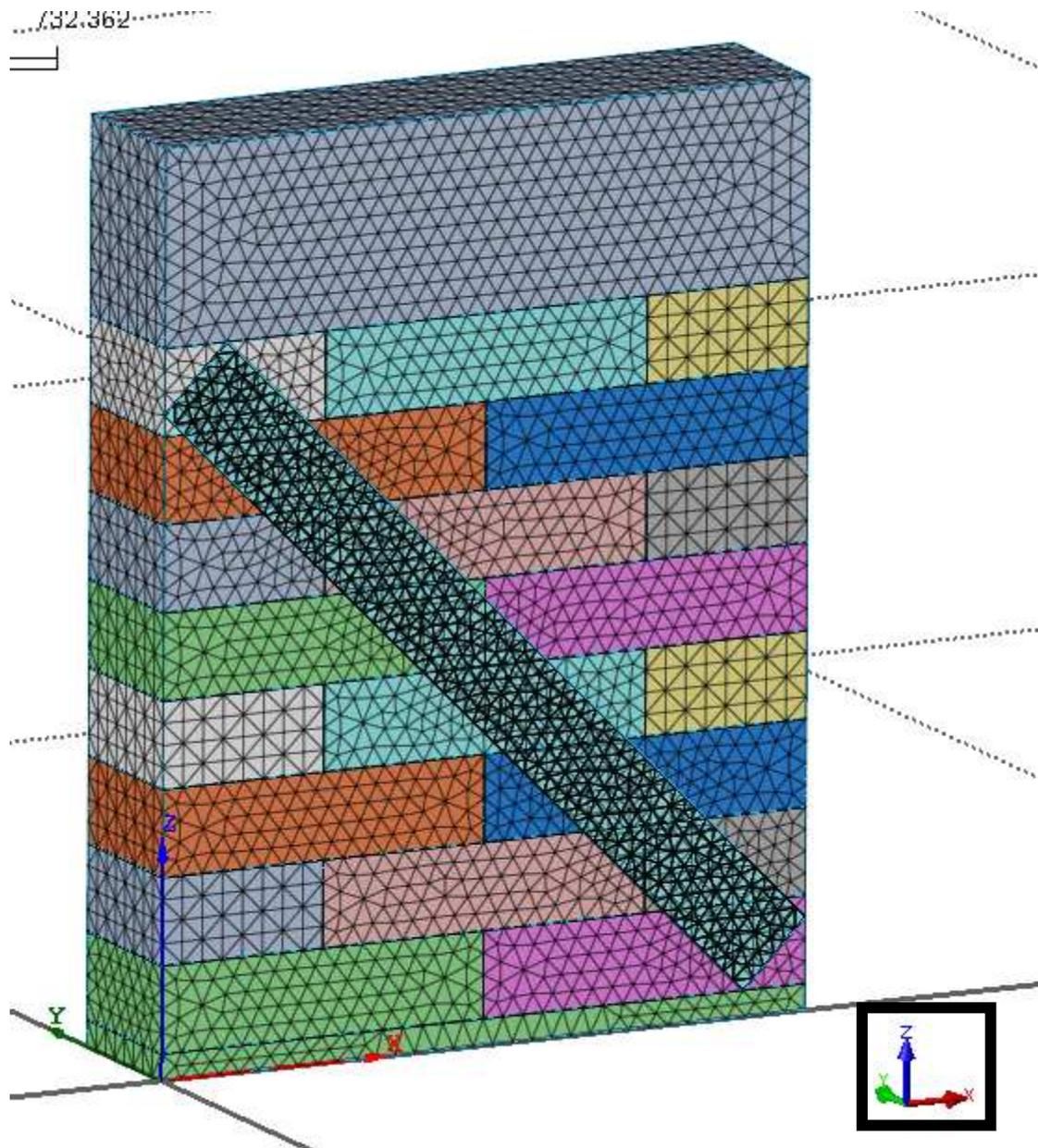


Figura 5.1.4 - Discretizzazione parete con rinforzo FRP.

La stessa lamina, sia dal punto di vista della geometria che dal punto di vista della discretizzazione è stata posizionata sulla faccia opposta a quella rappresentata in *figura 5.1.4*, poiché come verrà spiegato in seguito, la prova che è stata eseguita su questa parete è rappresentata da una prova a caricamento ciclico, e che quindi mentre durante il primo ciclo, caratterizzato dal solito spostamento impresso in sommità, in direzione $-x$, la diagonale compressa è in direzione delle x positive, durante il successivo ciclo,

caratterizzato da uno spostamento in direzione $+x$, la diagonale si creerà nella direzione opposta e di conseguenza le trazioni saranno in direzione opposta, ed è per questo motivo che sulla faccia mostrata in *figura 5.1.5*, la lamina è posizionata in verso contrario.

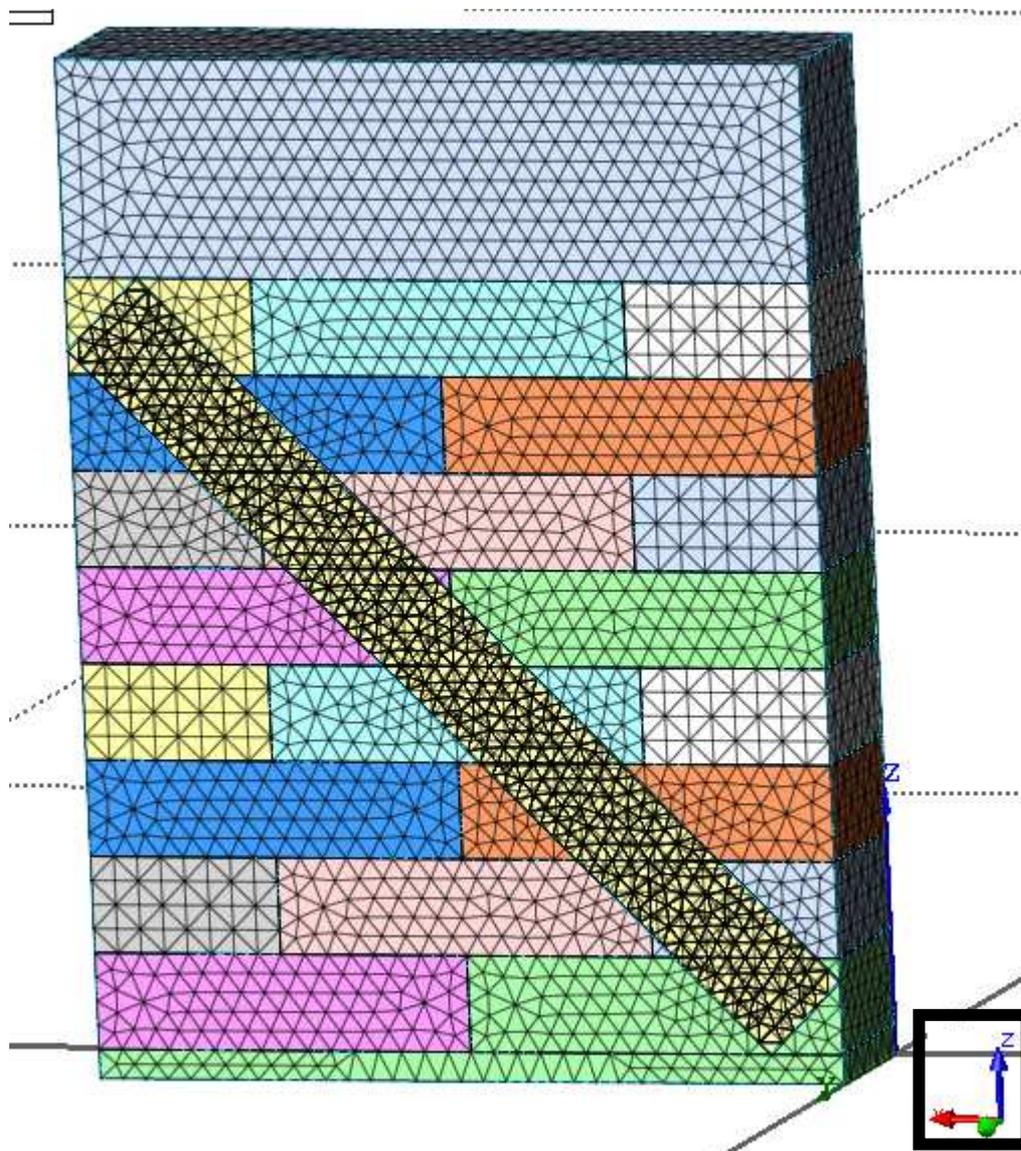


Figura 5.1.5 - Discretizzazione parete con rinforzo FRP(faccia posteriore).

Vedendo infatti il sistema di riferimento si può capire se si sta guardando la faccia anteriore o la faccia posteriore.

Poiché le prove relative alle pareti, come questa, sono prove che solitamente non riguardano soltanto un caricamento orizzontale, ma risultano essere, nella maggior parte dei casi, prove a caricamento ciclico, anche in questa situazione, quello che si è fatto è creare un'analisi a caricamento ciclico.

5.2 Interfaccia mattone- FRP

Riguardo l'interfaccia mattone – FRP, che è stata creata in questo modello, si sono ripresi i parametri riguardanti i primi due modelli, perché quello che si è voluto fare è stato essere coerenti con le assunzioni, in maniera tale da poter creare un'unica relazione che vada bene per ogni modello analizzato.

Quindi seguendo le stesse metodologie dal punto di vista del codice numerico, sono state create le due interfacce al di sotto della lamina, *Analysis > Material > Create > Interface*.

La legge *tau-slip* come detto in precedenza è sempre la stessa, ed è caratterizzata dai medesimi parametri, viene riportata quindi soltanto una figura che rappresenta il suo andamento.

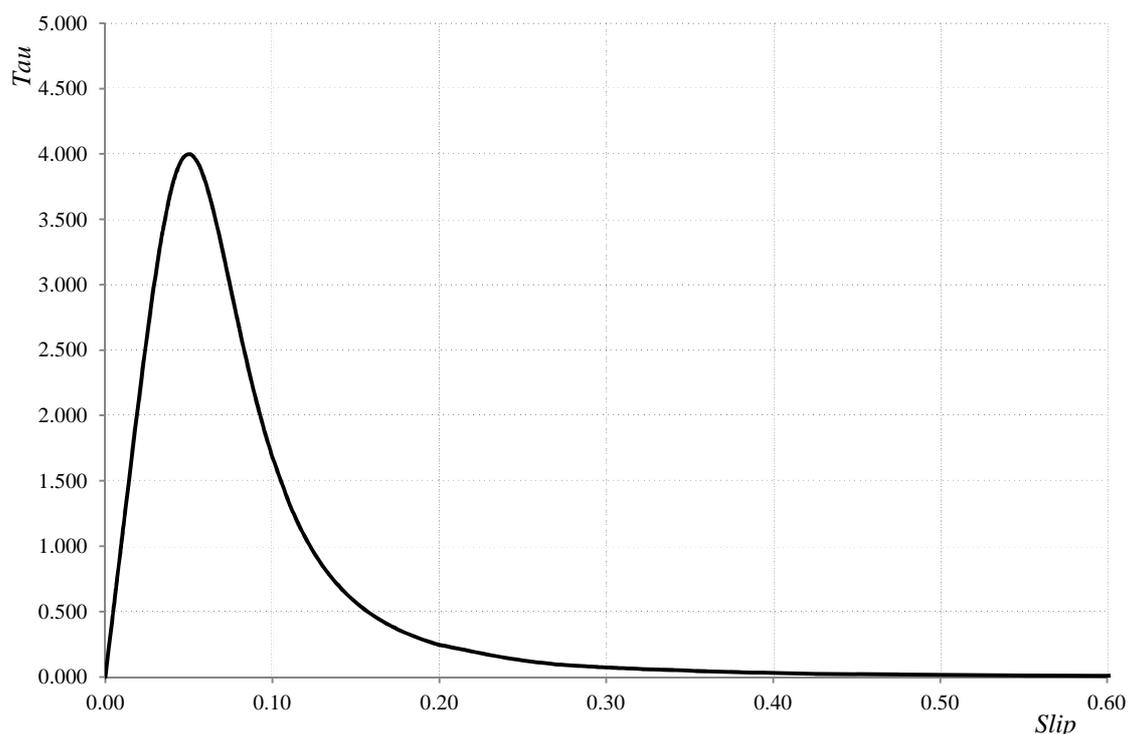


Figura 5.2.1 - Legge di interfaccia.

5.3 Vincolamento e condizioni di carico

Il vincolamento utilizzato in questo modello è il medesimo che nel caso della parete senza rinforzo, mentre per il carico applicato si è utilizzato un metodo diverso, poiché come già è stato accennato, in questo caso si è voluto fare riferimento ad un caricamento ciclico, di conseguenza sono stati applicati diversi step di carico.

Il percorso con cui sono stati creati i diversi step di carico è lo stesso che è stato seguito anche in tutti gli altri modelli, con l'unica differenza che in questo caso è stato ripreso il concetto di *Construction stage* già utilizzato in precedenza.

Si vuole specificare come lo spostamento sia applicato sempre sulla stessa superficie, sia che esso sia in direzione delle x positive, sia in direzione opposta.

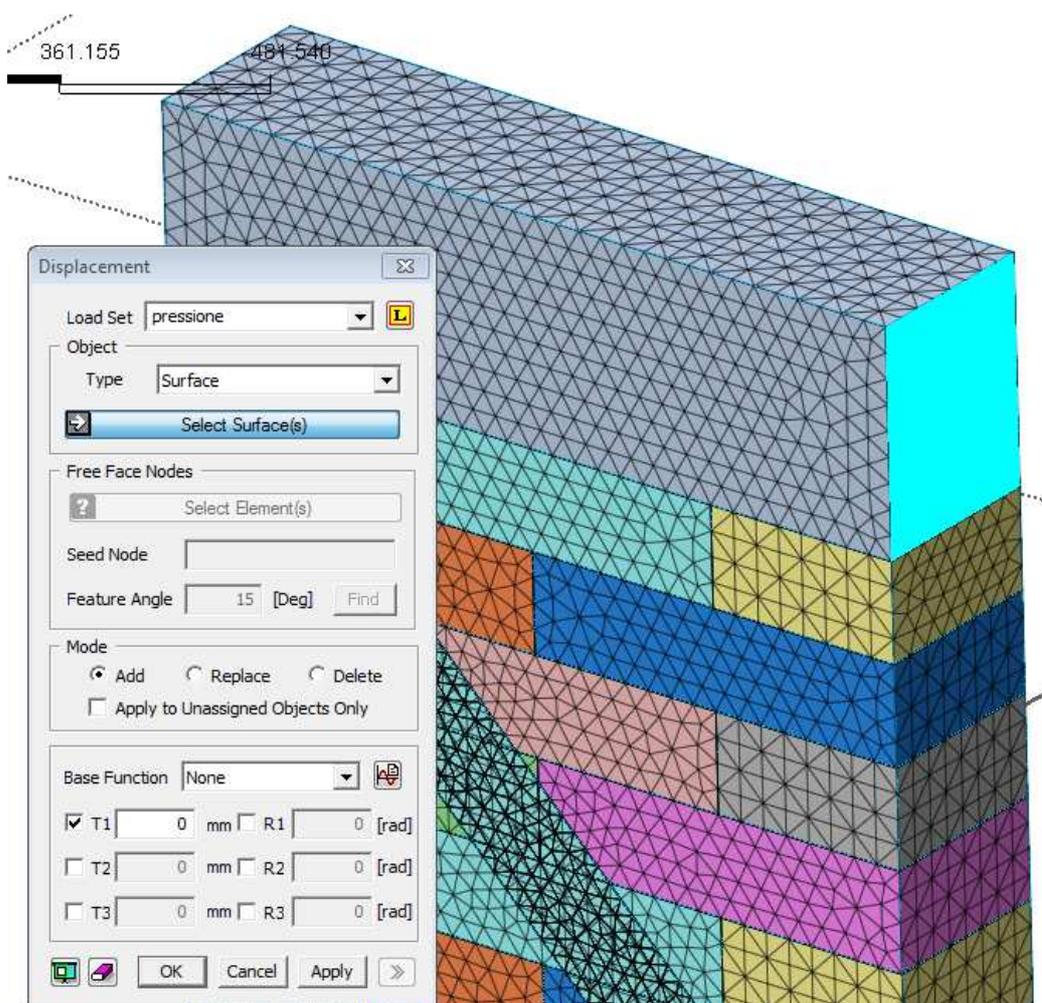


Figura 5.3.1 - Load set.

Viene quindi riportata per maggior chiarezza, una tabella in cui sono riassunti i diversi step di carico applicati.

	Spostamento applicato
<i>Step1</i>	<i>-1mm</i>
<i>Step2</i>	<i>+1mm</i>
<i>Step3</i>	<i>-2mm</i>
<i>Step4</i>	<i>+2mm</i>
<i>Step5</i>	<i>-3mm</i>
<i>Step6</i>	<i>+3mm</i>
<i>Step7</i>	<i>-5mm</i>
<i>Step8</i>	<i>+5mm</i>
<i>Step9</i>	<i>-10mm</i>
<i>Step10</i>	<i>+10mm</i>

Tabella 5.3.1 - Step di spostamento.

In realtà questi non risultano essere i reali spostamenti applicati alla parete, in quanto essi rappresentano gli spostamenti assoluti, mentre gli spostamenti che io applico alla testa superiore della parete sono gli spostamenti relativi, quindi ad esempio se come spostamento assoluto applico prima $-3mm$ e poi $+3mm$, significa che io per passare da uno step all'altro devo applicare uno spostamento relativo di $+6mm$, ed è proprio questo che io inserisco come valore nell'apposita schermata.

5.4 *Analisi non lineare*

Così come è stato fatto anche nel modello della singola parete, anche in questa situazione si è effettuata un'analisi *Construction Stage*, e che quindi per ogni delucidazione riguardo la corretta introduzione dei parametri, si fa riferimento al *paragrafo 4.7*.

Rispetto al modello precedente, quello che cambia è che sono stati creati diversi stage di carico, e non solamente due, uno per la pressione in direzione verticale, ed uno per lo spostamento impresso in orizzontale, infatti in questa analisi, come detto, si sta facendo riferimento ad un caricamento ciclico, e quindi sono stati creati i diversi stage a seconda dei diversi step di carico che si è voluto analizzare.

Quindi ciò che è stato fatto variare ad ogni stage di carico è soltanto lo spostamento impresso, a seconda dello step a cui si faceva riferimento (*tabella 5.3.1*).

In realtà una prima analisi è stata effettuata allo stesso modo di quella eseguita nel modello C, per poter confrontare il contributo dal punto di vista della rigidità della lamina FRP.

5.5 Elaborazione ed analisi dei risultati numerici

La prima cosa che si è andata a valutare riguardo questo modello, risulta essere il diagramma Forza-spostamento, per poter quindi confrontare il diverso comportamento della parete a seconda che ci sia o meno l'FRP, quindi in maniera tale da valutare il suo effettivo contributo.

Quindi viene proposto di seguito il solo grafico F-u della parete con FRP, e successivamente il confronto con la parete priva del rinforzo; è inoltre necessario specificare che per la creazione di questa curva non è stata effettuata un'analisi ciclica di spostamento, ma è stato applicato un unico spostamento pari a 20mm .

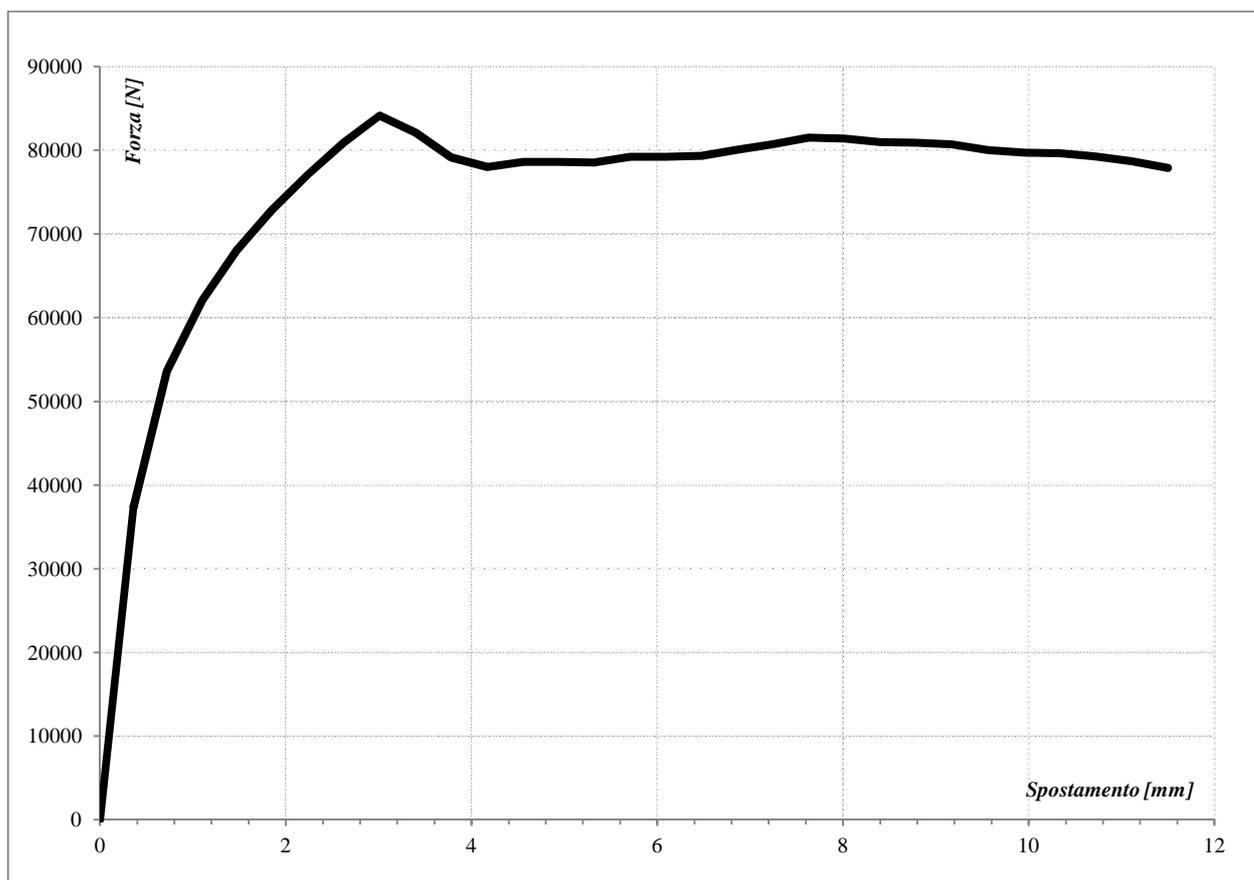


Figura 5.5.1 - Forza-spostamento parete con rinforzo.

Come si può notare il valore massimo di forza che viene raggiunto in questo modello risulta essere pari a 85000 N , con uno spostamento massimo di 11.5 mm .

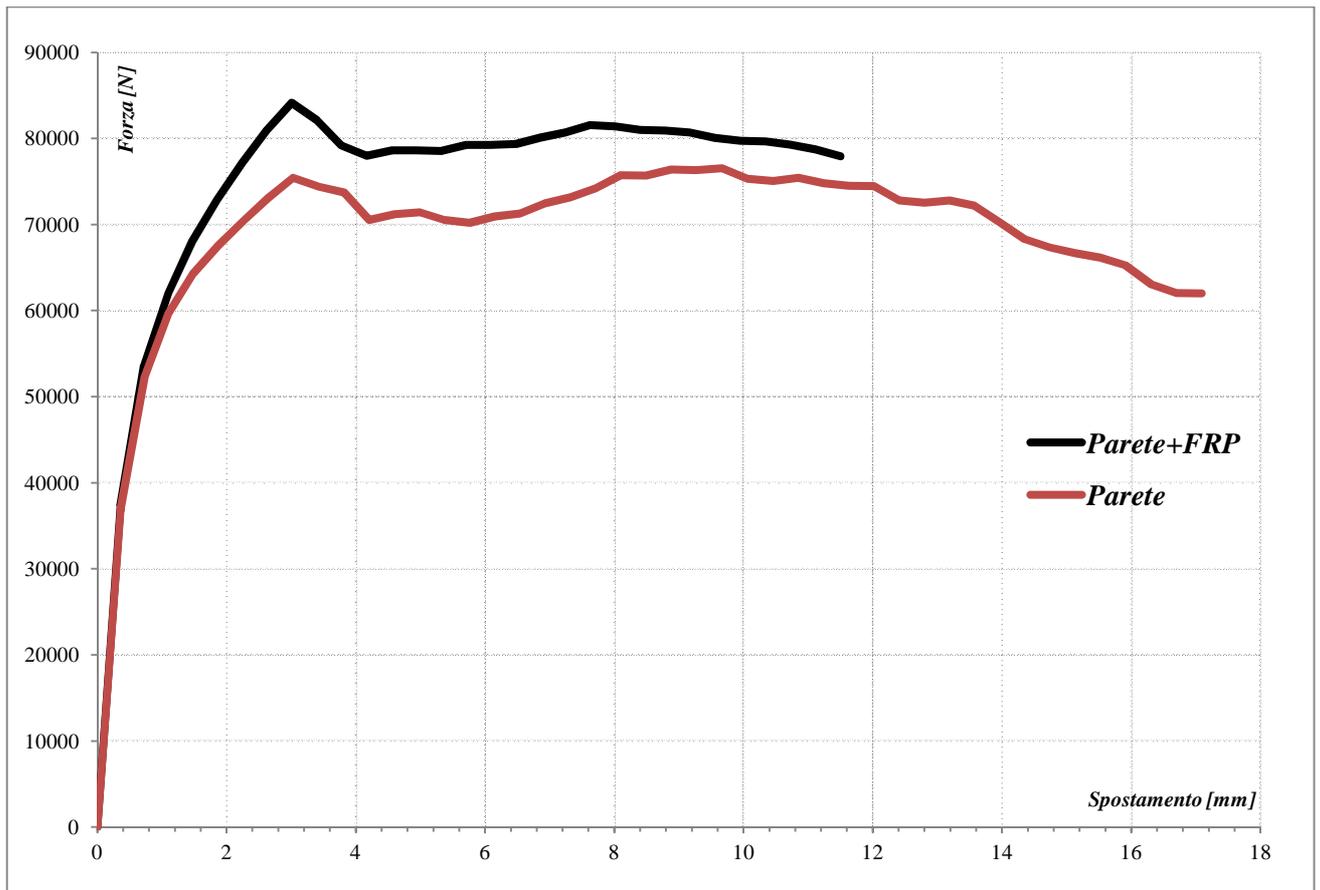


Figura 5.5.2 - Confronto diagrammi forza-spostamento.

Dal confronto mostrato nella figura mostrata sopra (*figura 5.5.2*), è possibile vedere come nel caso in cui ci sia la presenza della lamina FRP, il valore di picco della forza raggiunta risulta ovviamente superiore rispetto a quello della parete senza rinforzo, pur tuttavia essendo stato raggiunto in corrispondenza di un simile, se non uguale, spostamento, circa 3 *mm*.

Oltre il picco di forza è visibile un certo ramo plastico, per entrambe le pareti, sia quella con rinforzo, che quella priva del rinforzo; se in corrispondenza dei 6 *mm*, le due curve risultano essere piuttosto distanti, è possibile vedere come a partire dagli 8 *mm*, in poi, la curva con il rinforzo tende ad unirsi a quella senza.

Questo spiega, il processo, che anche intuitivamente si riesce a capire, che se, in corrispondenza dei 6 *mm*, il distacco tra le due curve risulta ancora essere grande vuol dire che la lamina riesce ancora a tenere e a garantire ciò per cui è stata introdotta, quando si arriva agli 8 *mm*, e quindi le due curve tenderebbero a diventarne una sola, ciò implica il fatto che la lamina non è più in grado di sopportare ulteriori tensioni di trazione, ragion per

cui, la parete non si comporta più per come è stata progettata, ovvero come parete con rinforzo, ma tende ad essere più che altro, una parete in cui la lamina si inizia sempre più a staccare dai mattoni, e quindi è come se anche questa parete si comportasse come una parete senza rinforzo.

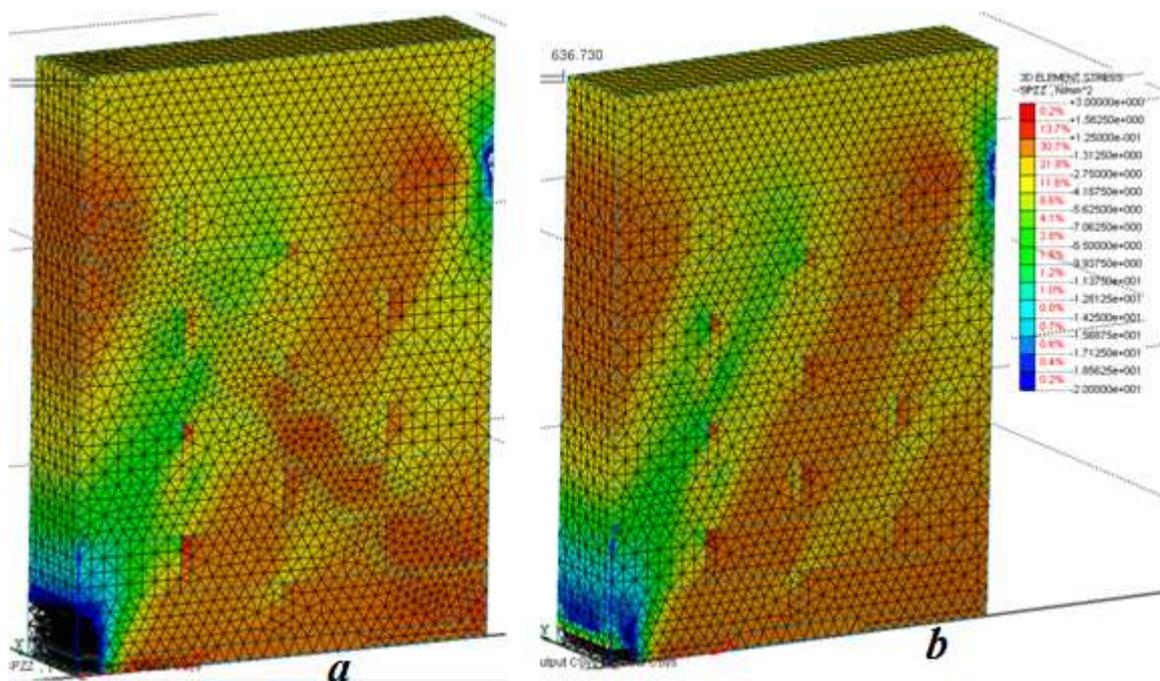


Figura 5.5.3 - Confronto tensioni SPZZ(a=con rinforzo,b=senza rinforzo).

Dal confronto mostrato nella figura mostrata sopra (*figura 5.5.3*), è possibile vedere come a parità di scala di colori nella legenda, come sia possibile raggiungere maggiori valori di tensione, sia in corrispondenza della porzione di parete in basso a sinistra, sia come nel complesso della parete la zona diagonale oltre ad essere di maggior larghezza risulta anche essere maggiormente sollecitata.

Come si può vedere dalle figure sottostanti, la lamina risulta, ovviamente, essere l'elemento maggiormente sollecitato, ed inoltre vedendo le tensioni nelle tre direzioni, si può notare come le tensioni lungo x e lungo z risultano essere di egual valore, mentre il valore della tensione lungo y risulta essere sensibilmente più basso.

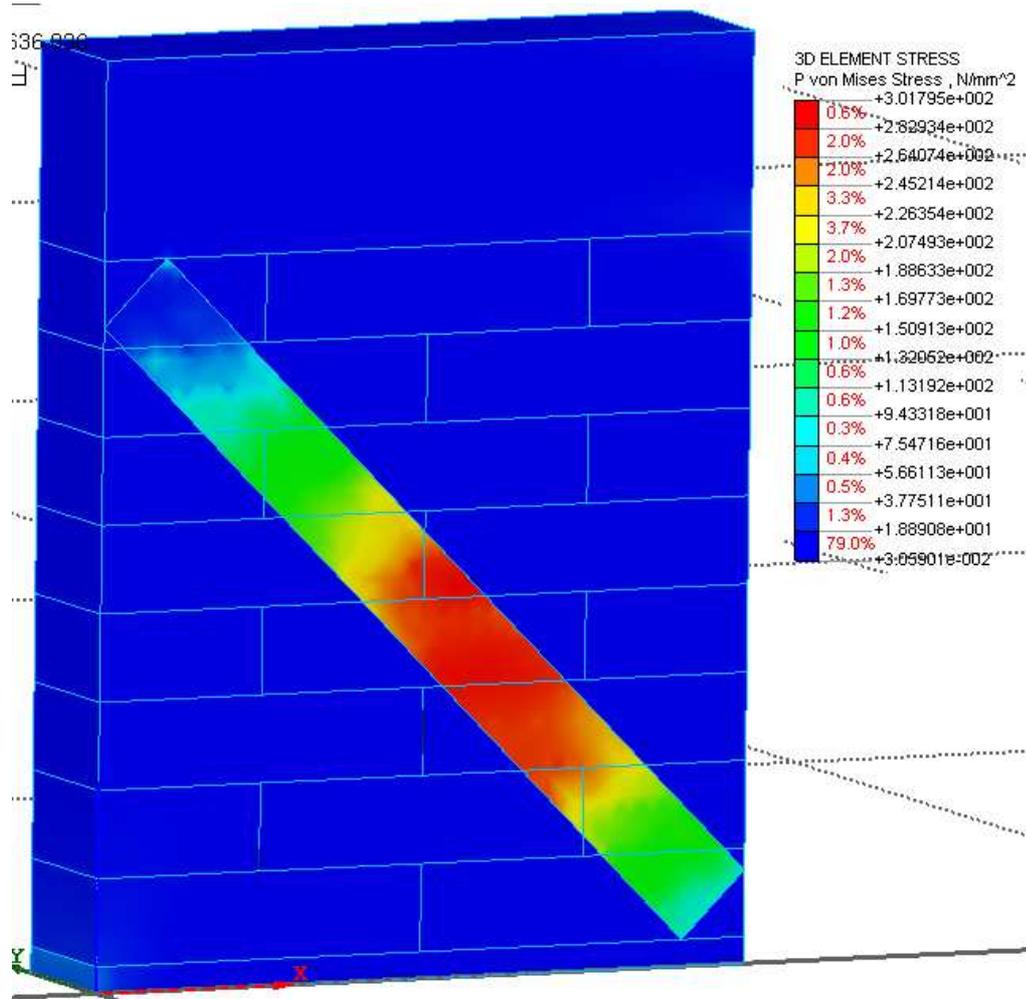


Figura 5.5.4 - Tensioni Von Mises lungo parete e rinforzo.

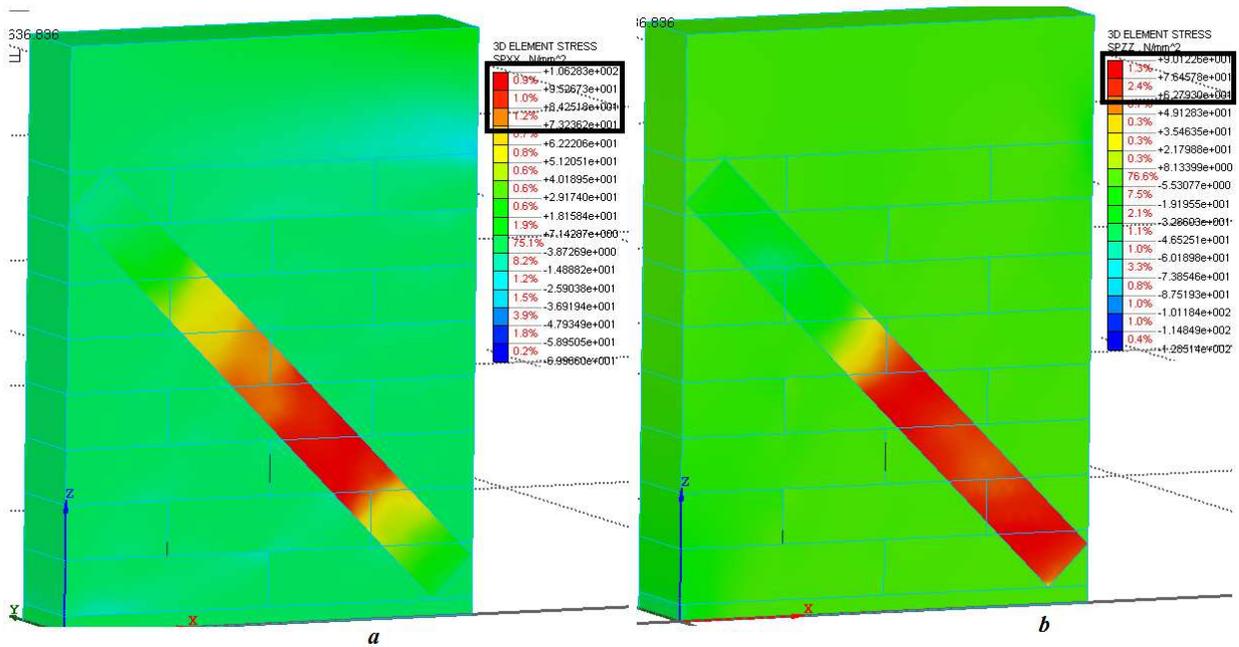


Figura 5.5.5 - Tensioni Von Mises (a=componenteSPXX,b=componenteSPZZ).

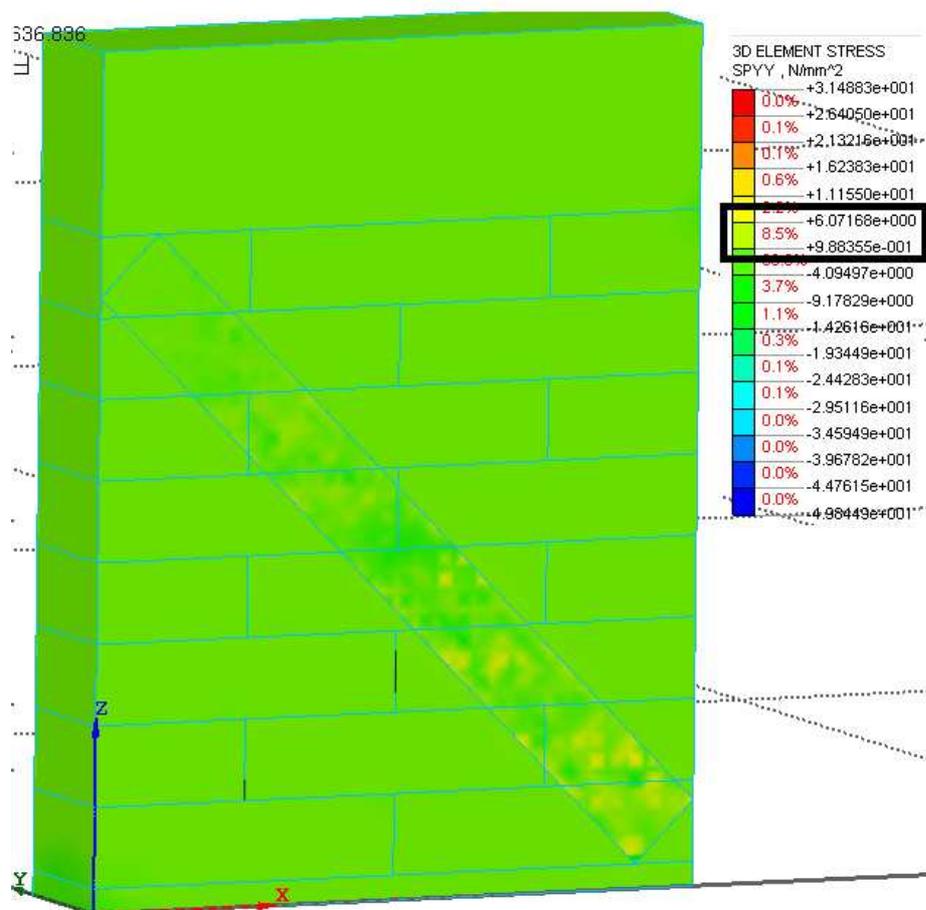


Figura 5.5.6 - Tensioni Von Mises componente SPYY.

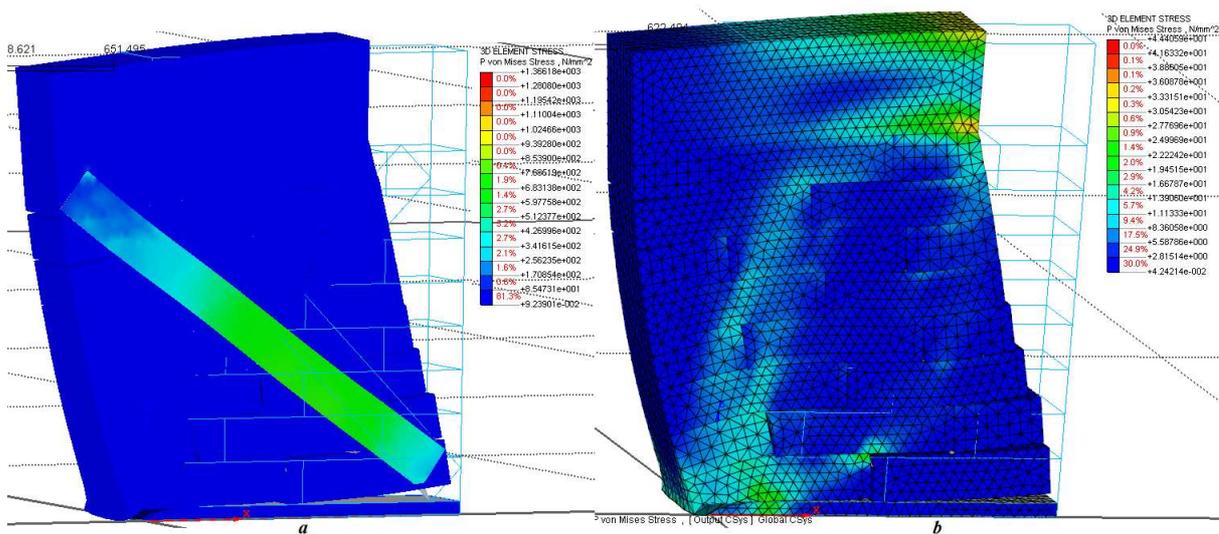


Figura 5.5.7 - Confronto tensioni SPZZ(a=con rinforzo,b=senza rinforzo).

Per valutare il valore della deformazione lungo la lamina, è stato opportuno effettuare una somma di vettori, tra le deformazioni lungo x , e quelle lungo z , in questo modo si sono ottenute le deformazioni lungo la lamina nel sistema di riferimento locale.

Vengono quindi mostrate di seguito a diversi step di carico i valori sia per le deformazioni in x che per quelle in z .

Come si può vedere dalle figure sottostanti, la lamina risulta, ovviamente, essere l'elemento maggiormente sollecitato, ed inoltre vedendo le tensioni nelle tre direzioni, si può notare come le tensioni lungo x e lungo z risultano essere di egual valore, mentre il valore della tensione lungo y risulta essere sensibilmente più basso.

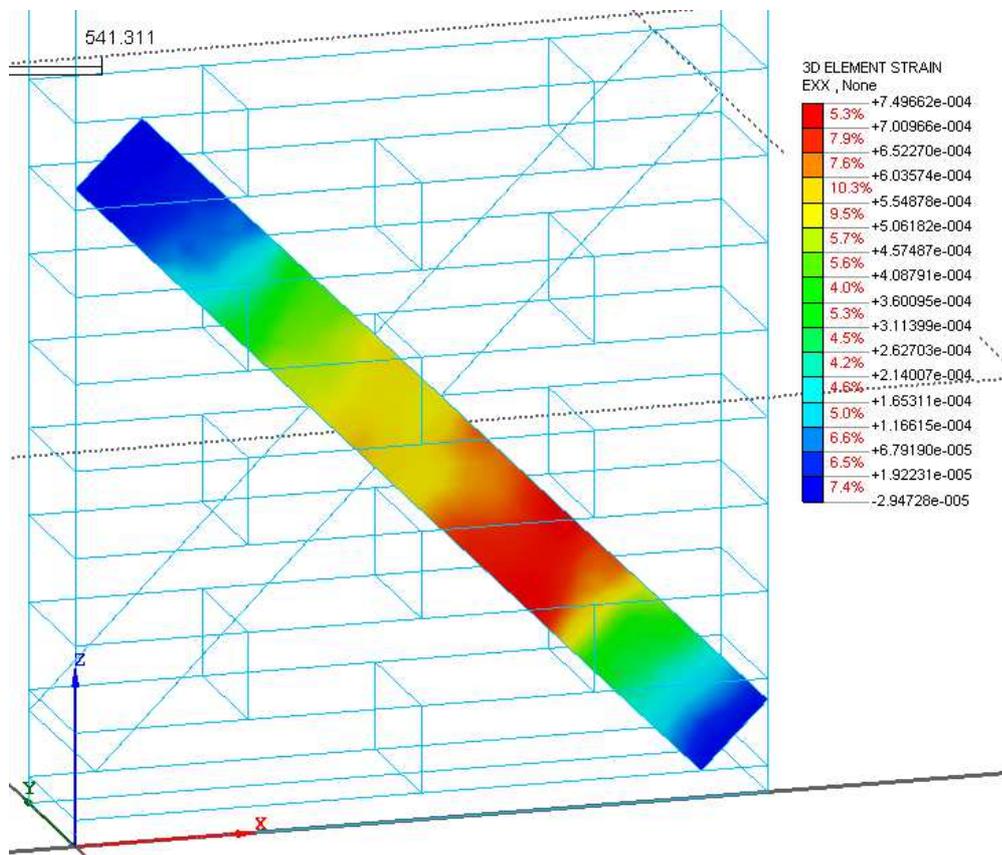


Figura 5.5.8 - Deformazioni EXX (pre-picco).

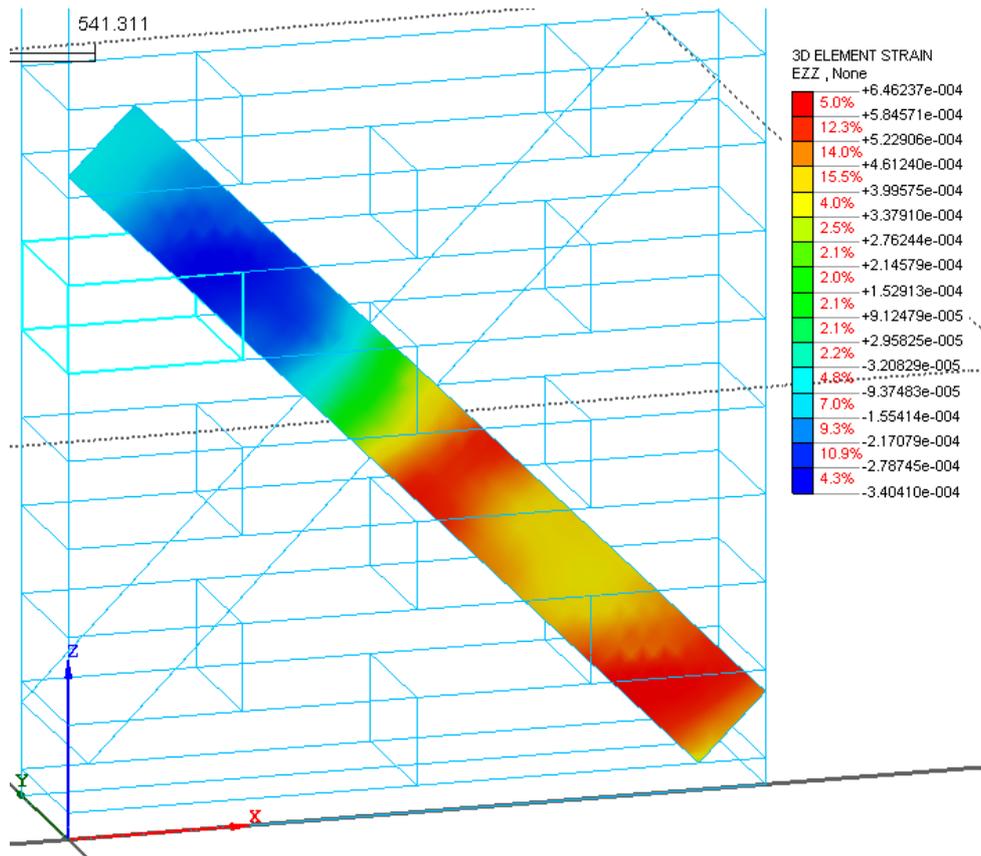


Figura 5.5.9 - Deformazioni EZZ (pre-picco).

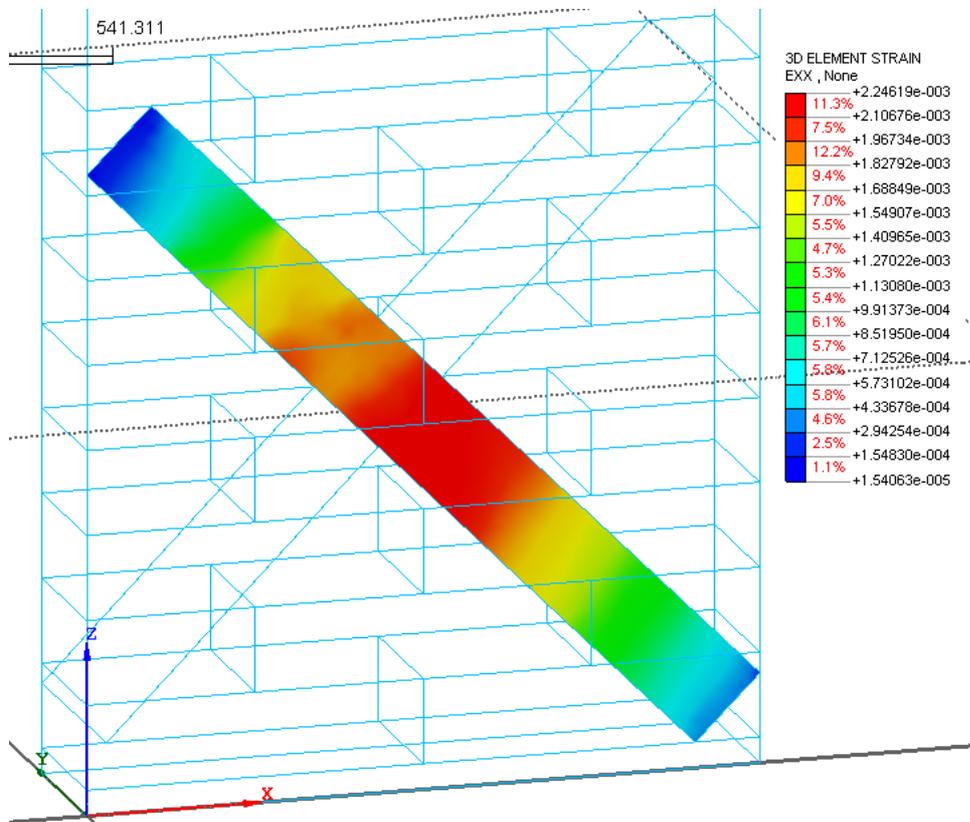


Figura 5.5.10 - Deformazioni EXX (picco).

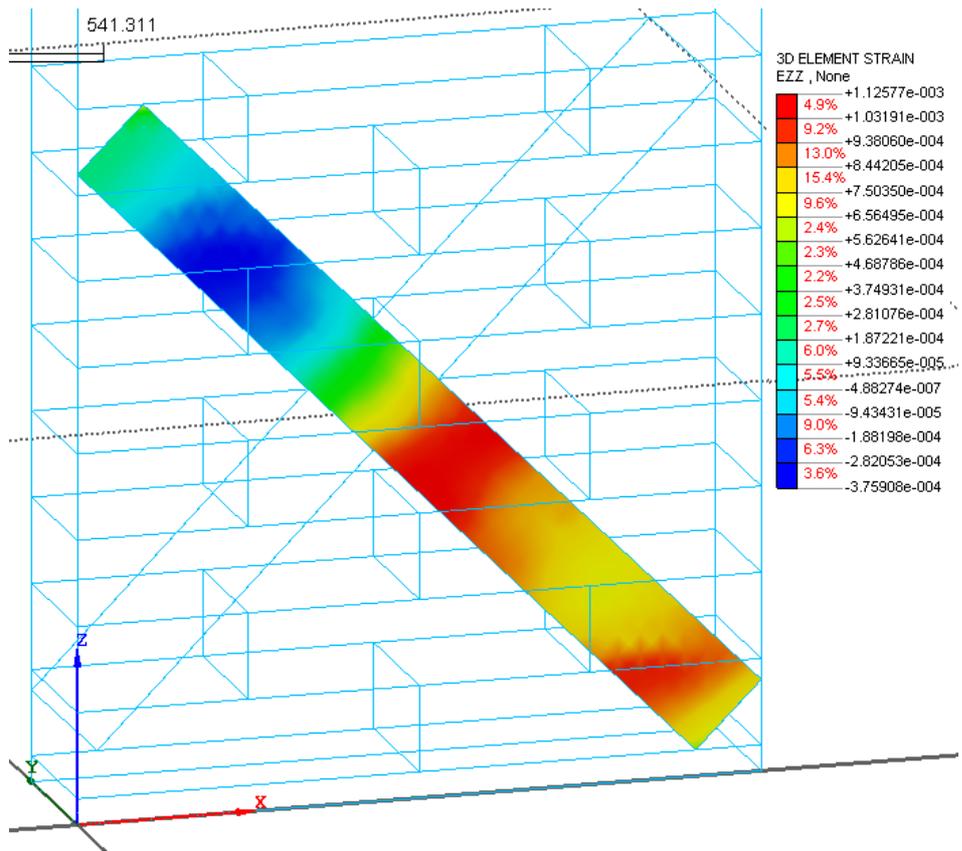


Figura 5.5.11 - Deformazioni EZZ (picco).

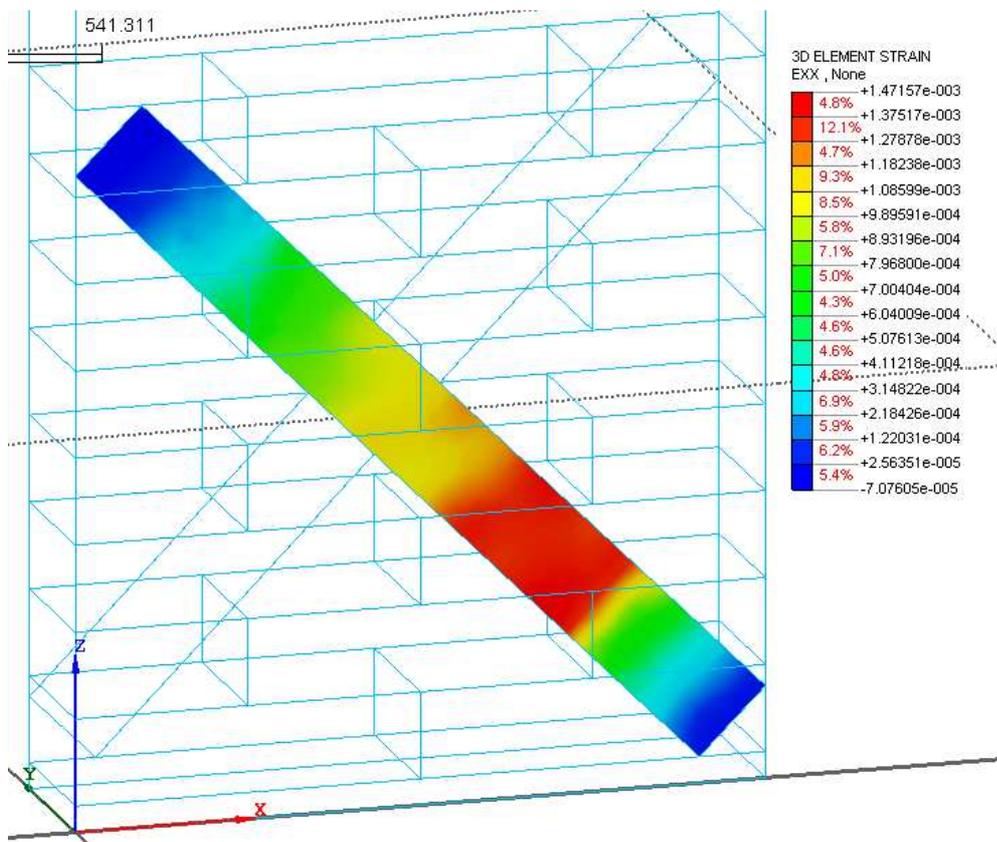


Figura 5.5.12 - Deformazioni EXX (post-picco).

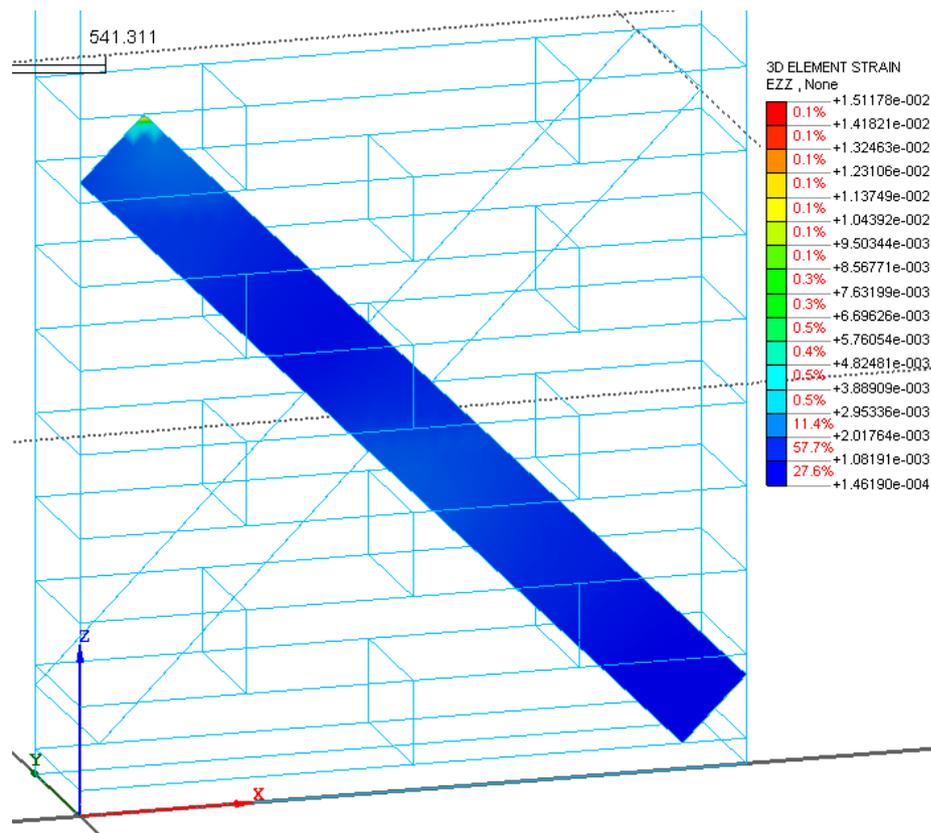


Figura 5.5.13 - Deformazioni EZZ (post-picco).

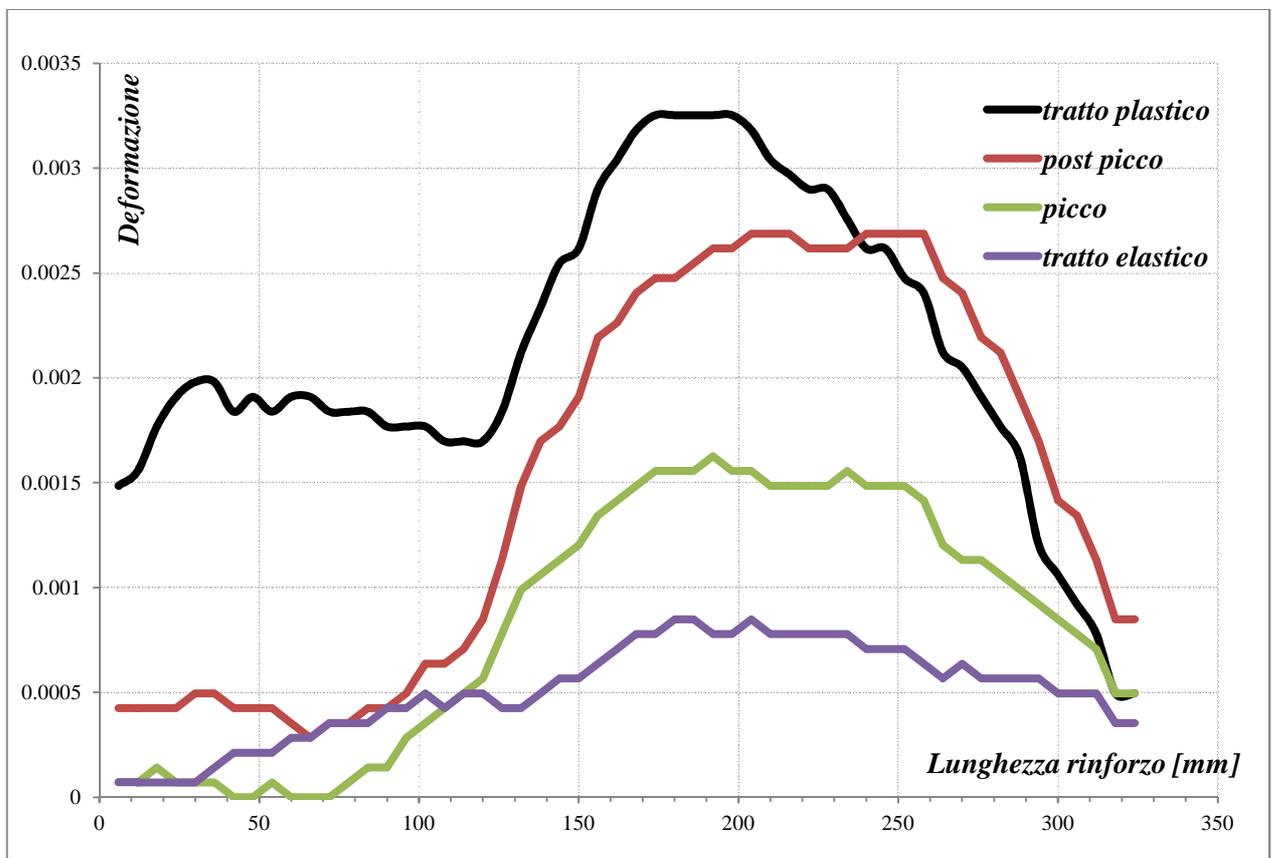


Figura 5.5.14 - Deformazioni lungo la lamina.

Si può vedere dalla figura 5.5.14 come il valore della deformazioni ha evidenti trasferimenti di deformazione, inoltre dal passaggio del picco, al successivo step corrispondente al tratto discendente, non ci sono significative differenze, ulteriore osservazione sta nel fatto che il valore delle deformazioni risulta essere piuttosto basso se messo a confronto a quanto ottenuto per il muretto, di conseguenza si può pensare che l'analisi sia terminata non per distacco della lamina ma per altri cause.

Vengono inoltre riportate delle figure riguardanti il valore della tensioni tangenziale in corrispondenza dell'interfaccia lamina parete.

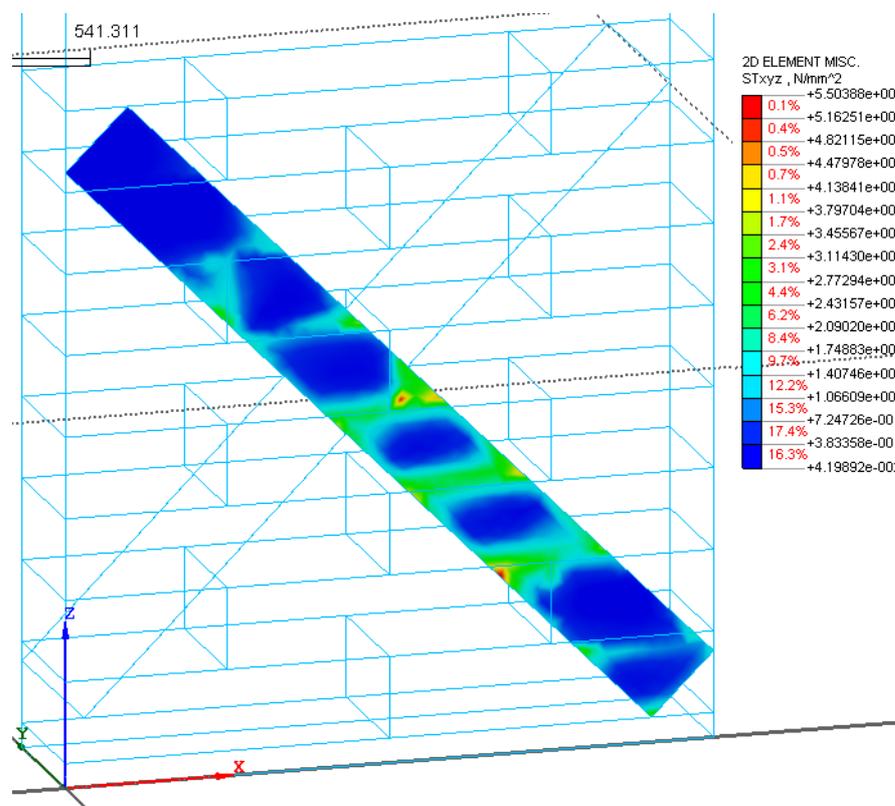


Figura 5.5.15 - Tensioni tangenziali interfaccia (pre-picco).

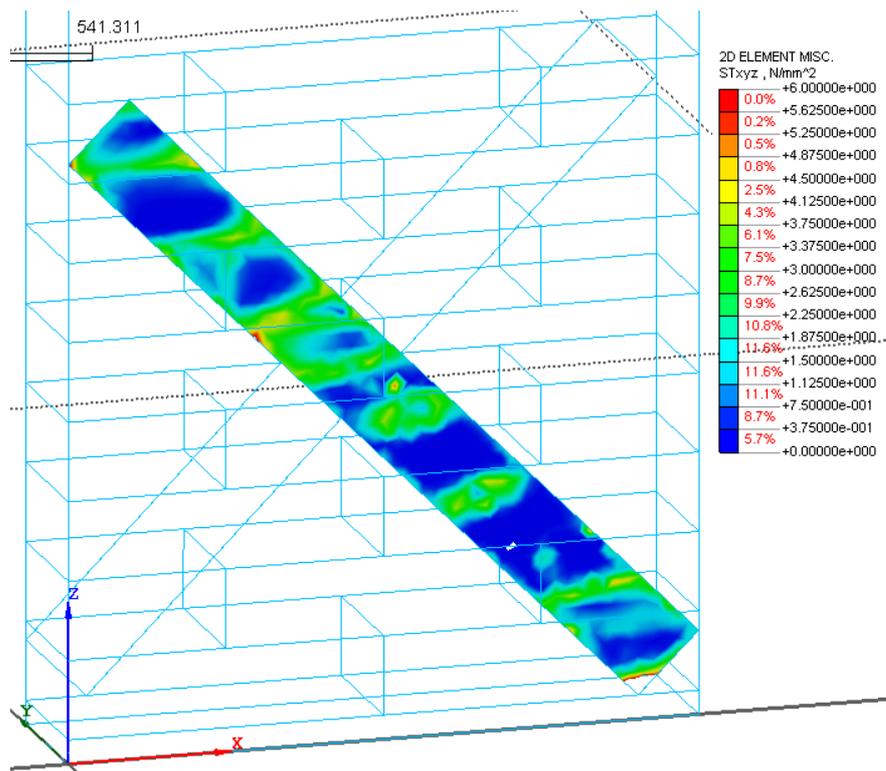


Figura 5.5.16 - Tensioni tangenziali interfaccia (post-picco).

È stato effettuato un tentativo di caricamento ciclico, e vengono riportate di seguito diverse figure che mostrano l'andamento delle sollecitazioni.

Tuttavia come poi viene riportato di seguito, questa opzione di caricamento non ha condotto a risultati soddisfacenti, e quindi non è stato approfondito ulteriormente questo aspetto.

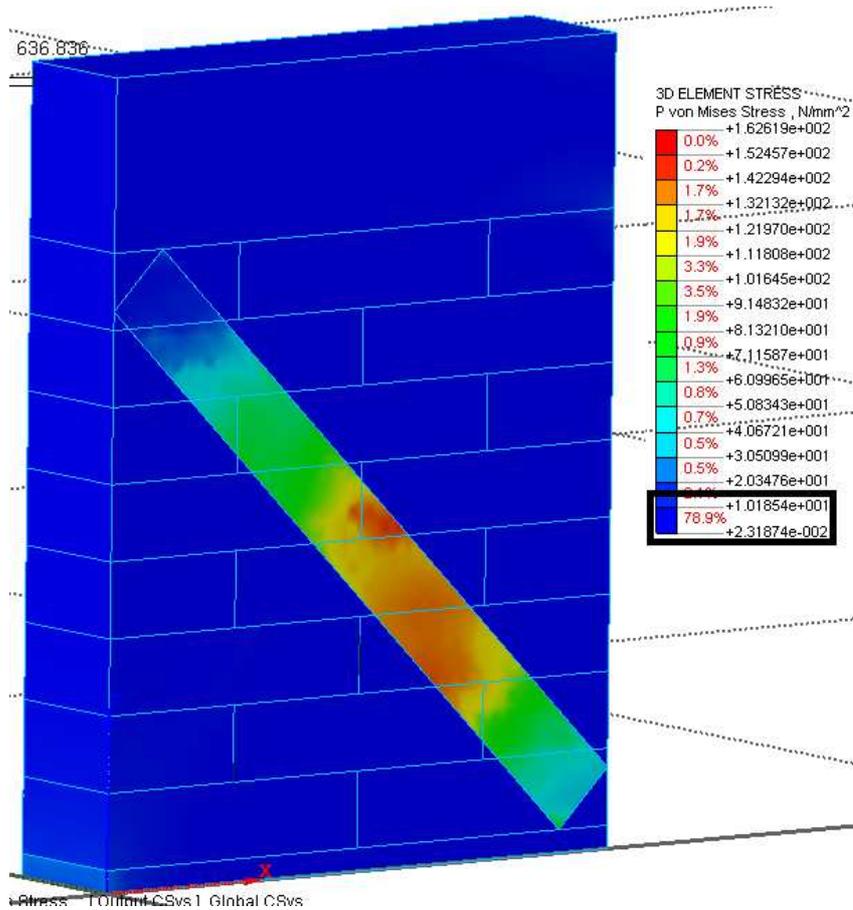


Figura 5.5.17 - Tensioni Von Mises (Step 2).

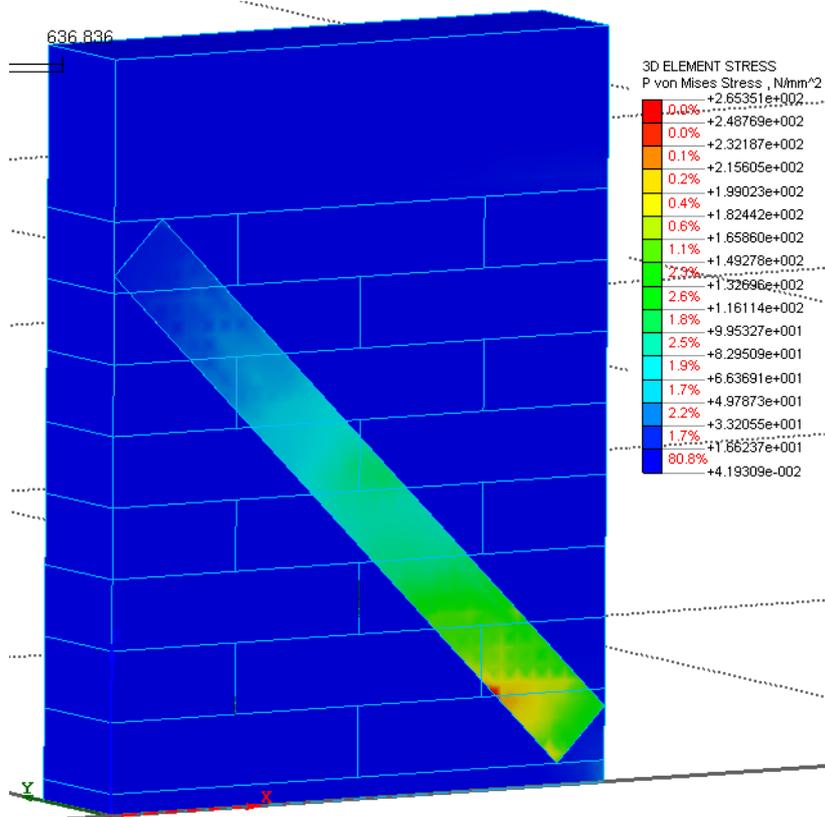


Figura 5.5.18 - Tensioni Von Mises (Step 3).

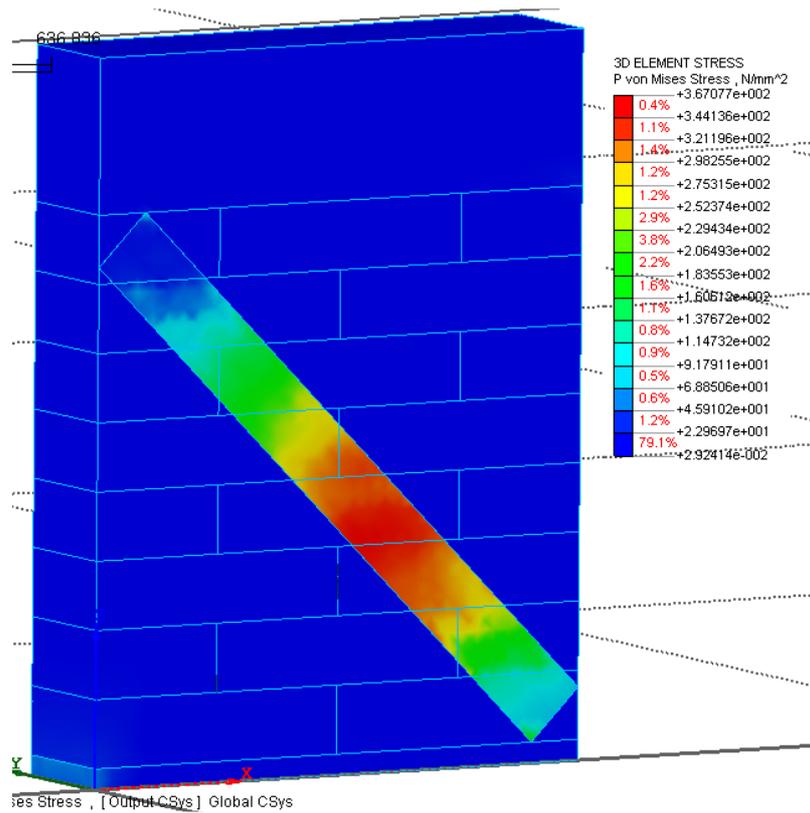


Figura 5.5.19 - Tensioni Von Mises (Step 4).

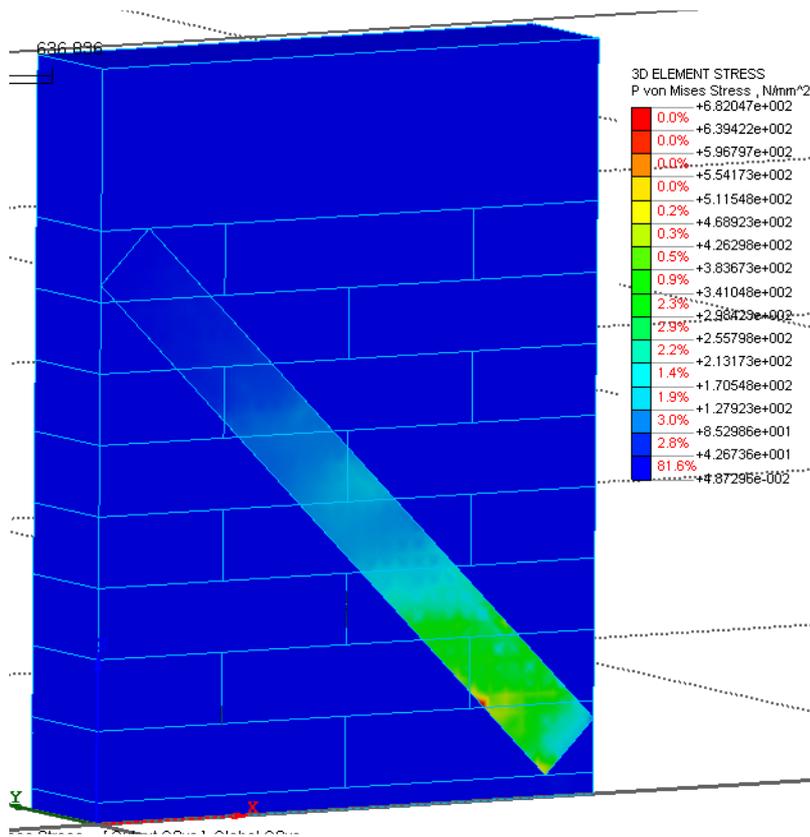


Figura 5.5.20 - Trnsioni Von Mises (Step5).

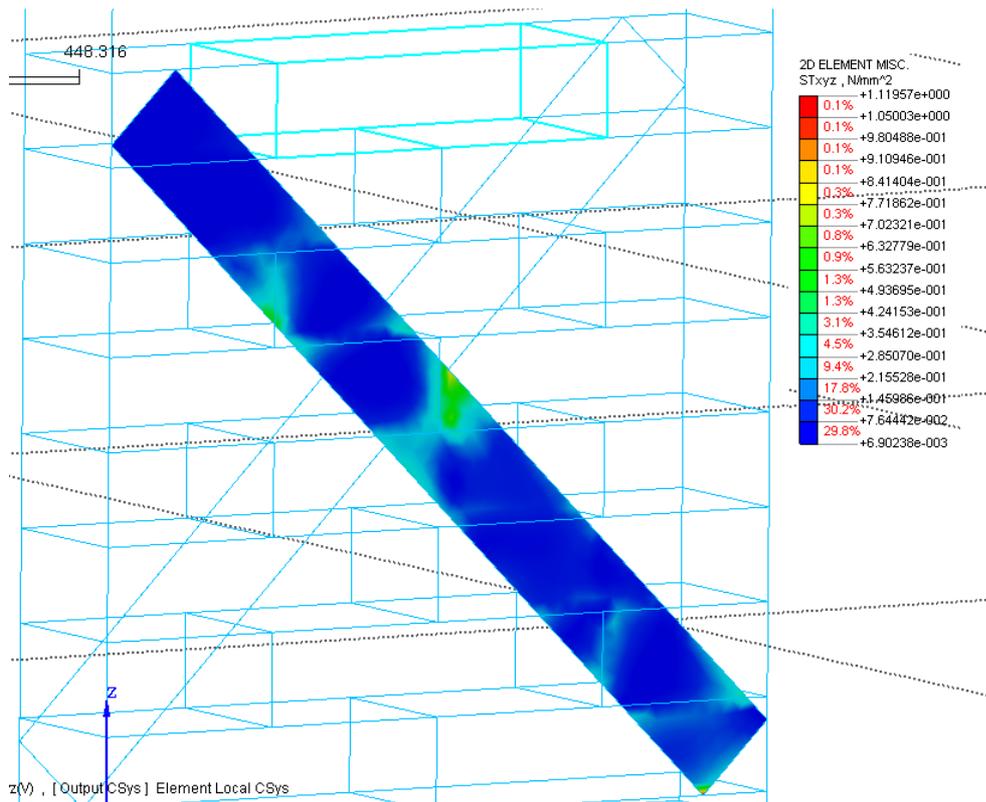


Figura 5.5.21 - Tensioni tangenziali interfaccia (Step 2).

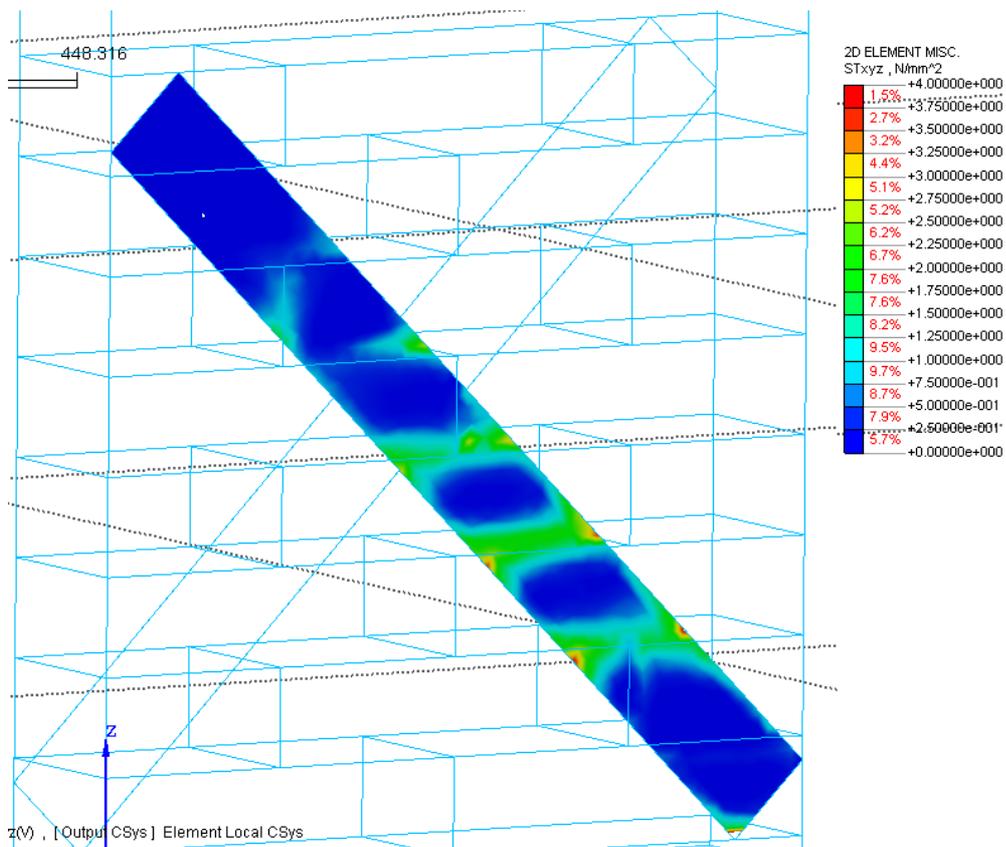


Figura 5.5.22 - Tensioni tangenziali interfaccia (Step 4).

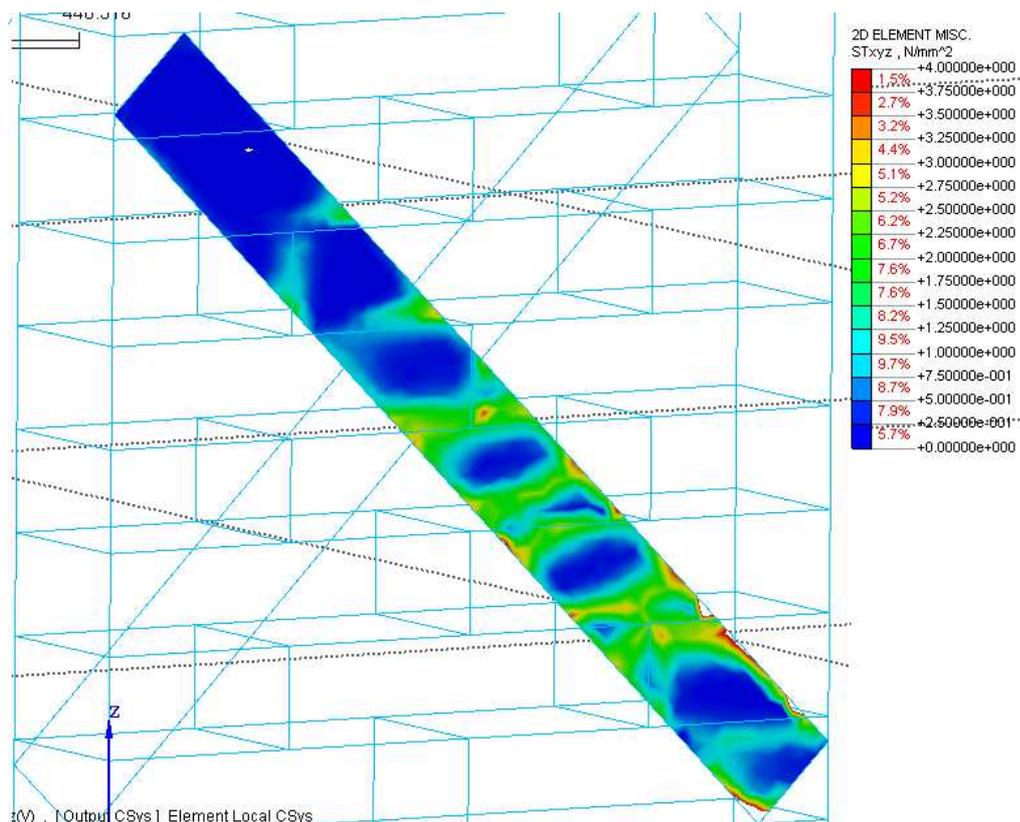


Figura 5.5.23 - Tensioni tangenziali interfaccia (Step6).

Come si può vedere a partire dalla *figura 5.5.17*, fino alla *figura 5.5.20*, il valore della tensione sull'interfaccia varia a seconda che si faccia riferimento ad un carico in direzione delle x positive o negative, infatti per il primo step, in cui come riportato dalla *tabella 5.3.1*, si fa riferimento ad un carico di $-1mm$, il carico di trazione è in buona parte preso dalla lamina anteriore, mentre per quanto riguarda il carico successivo, o comunque tutti quei carichi che hanno direzione opposta al primo, la tensione di trazione è a carico dell'altra lamina, ovvero quella posizionata nella faccia posteriore, e quindi nel FRP anteriore non si scorgono significativi sforzi, come è ben visibile dalle *figure 5.5.18* e *5.5.20*.

Per quanto riguarda invece le *figure 5.5.21- 5.5.22* e *5.5.23*, viene mostrato l'andamento delle tensioni tangenziali di interfaccia mattone-lamina, al crescere del carico, in questo caso si fa riferimento solamente agli step di carico che sollecitano la lamina anteriore, vale comunque sia lo stesso anche per l'altra lamina.

Si può notare come per ogni step di carico, il valore della tensione tangenziale tenda ad essere maggiore in corrispondenza delle zone perimetrali del mattone, mentre nella porzione centrale tende a diminuire, questo vale sia all'inizio, che alla fine del caricamento.

Come è stato presentato anche per tutte le altre analisi effettuate fino a questo momento, anche in questa situazione viene mostrato il diagramma forza spostamento, in cui è possibile vedere i diversi cicli effettuati dalla parete.

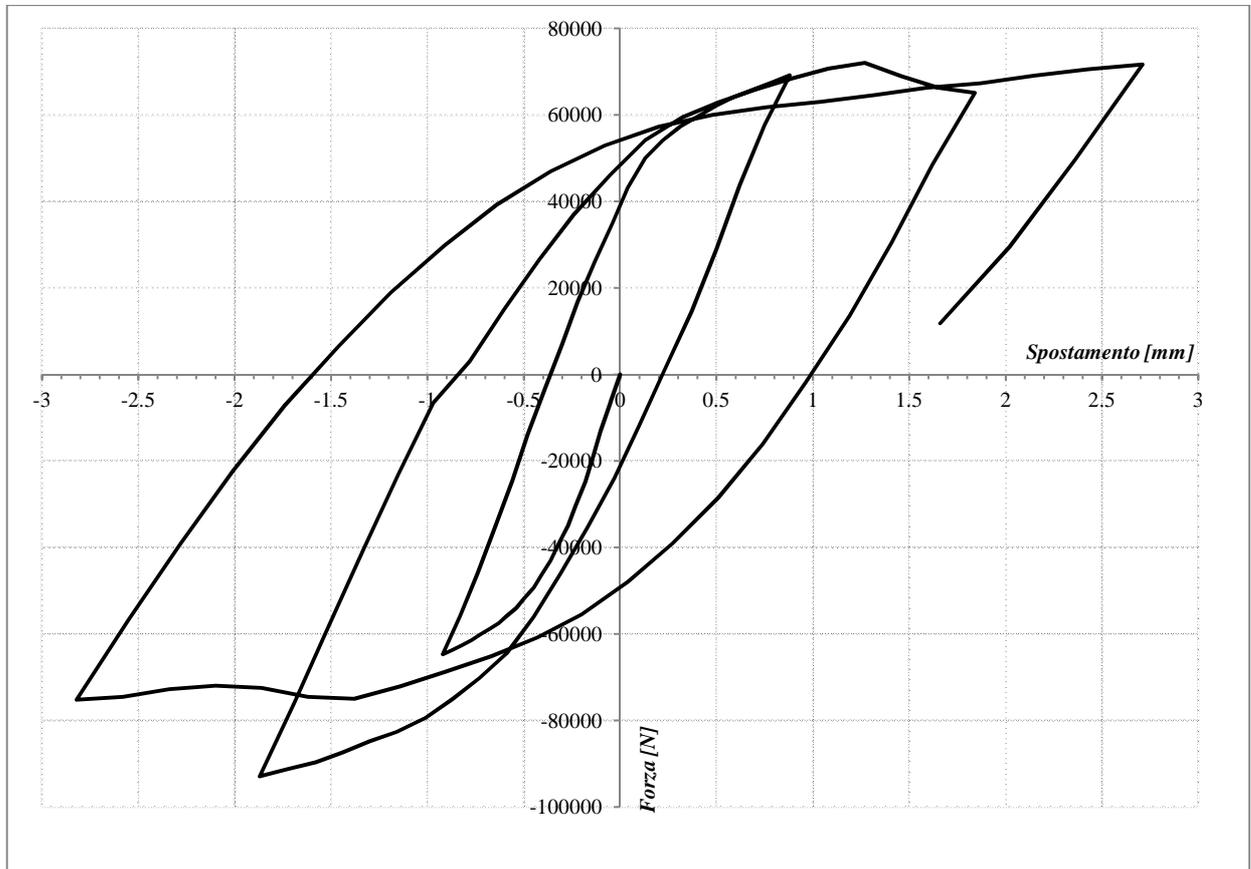


Figura 5.5.11 - Diagramma Forza-spostamento (caricamento ciclico).

Come si vede dal grafico il comportamento della parete sottoposta ad un carico ciclico, risulta essere simile ad un comportamento di un acciaio, infatti la parete sembra non subire danni al variare del caricamento.

Di conseguenza la strada del caricamento ciclico è stata abbandonata non essendo realistici i risultati ottenuti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bellini Alessandro (2011) - Tesi di laurea - *“Prove di aderenza su mattoni e muretti in laterizio rinforzati con GFRP”*
- [2] Sacco Elio, Benedetti Andrea (2005) - *“Rinforzo di strutture murarie”*
- [3] Sacco Elio, Grande Ernesto, Imbimbo Maura (2007) – Workshop Reluis – *“Analisi di pannelli murari rinforzati con FRP soggetti a sollecitazioni di taglio”*
- [4] Milani G., Rotunno T., Sacco E., Tralli A. (2005) - *“Sulla capacità portante di pannelli in muratura fibrorinforzati: confronto fra modellazione numerico e risultati sperimentali”*- Associazione Italiana per l’analisi delle sollecitazioni - XXXIV Convegno Nazionale
- [5] Ing. Segala Paolo (2011) - *“Structural Modeling 4”* – Magazine in Ingegneria Strutturale
- [6] Milani Gabriele (2011) - *“Kinematic FE limit analysis homogenization model for masonry walls reinforced with continuous FRP grids”*
- [7] Gabor A., Benanni A., Jacquelin E., Lebon F. (2006) - *“Modelling approaches of the in-plane shear behaviour of unreinforced and FRP strengthened masonry panels”*
- [8] Valluzzi M.R., Tinazzi D., Modena C. (2002) – *“Shear behaviour of masonry panels strengthened by FRP laminates”*
- [9] Fedele R., Milani G. (2011) – *“Three-dimensional effects induced by FRP- from masonry delamination”*
- [20] Fedele R., Milani G. (2011) - *“A numerical insight into the response of masonry reinforced by FRP strips. The case of perfect adhesion”*
- [11] Yu Su, Chengqing Wu, Michael C. Griffith (2011) - *“Modelling of the bond-slip behavior in FRP reinforced masonry”*
- [12] Paulo B. Lourenco, Jan G. Rots, and Johan Blaauwendraad (1998) – *“Continuum Model for Masonry: parameter estimation and validation”*
- [13] Yasser Korany and Robert Drysdale. (2006) - *“Rehabilitation of masonry walls using unobtrusive FRP techniques for enhanced out-of-plane seismic resistance”*
- [14] Ernesto Grande, Gabriele Milani, Elio Sacco (2007) - *“Modelling and analysis of FRP-strengthened masonry panels”*

- [15] Sayari A., Donchev T., Limbachiya M.C., Kew Hy. (2010) - “*Out-of-plane behaviour of frp strengthened masonry walls*”
- [16] G. Milani, T. Rotunno, E. Sacco and A. Tralli (2006) - “*Failure load of FRP strengthened masonry walls: experimental results and numerical model*”
- [17] Luisa Berto, Anna Saetta, Roberto Scotta, Renato Vitaliani (2004) – “*Shear neaviour of masonry panel:parametric FE analysis*”
- [18] Andrea Prota, Gaetano Manfredi, and Fabio Nardone (2008) – “*Assessment of design formulas for in-plane FRP strengthening of masonry walls*”
- [19] Y. Zhuge (2010) - “*FRP-retrofitted URM walls under in-plane shear:review and assessment of available models*”
- [20] A. A. Tasnimi, E. Zomorodi (1998) - “*The effect of Onplane behavior on Inplane interaction of URM infilled RC frame under lateral loads*”
- [21] Sassan Eshghi, Khashaiar Pourazin (2009) – “*In-plane behavior of confined masonry walls-with and without opening*”
- [22] Ghassan K. Al-Chaar and Armin Mehrabi (2008) - “*Constitutive models for nonlinear finite element analysis of masonry prism and infill walls*”
- [23] Paulo B. Lourenco and Jan G. Rots (1997) - “*Multisurface interface model for analysis of masonry structures*”
- [24] Andreas Stavridis and P.B. Shing (2010) - “*Finite-element modelling of nonlinear behaviour of masonry-infilled RC frames*”