

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

in

Materiali innovativi e Riabilitazione strutturale LS

**ANALISI NUMERICA DI VOLTE IN CAMORCANA E
GESSO RINFORZATE CON MATERIALI FRP**

CANDIDATO
Fabio Fabbri

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Andrea Benedetti

Anno Accademico 2009/10

Sessione I

Sommario

INTRODUZIONE.....	3
1. VOLTE IN CAMORCANNA	5
1.1 DEGRADO DELLE VOLTE IN CAMORCANNA	9
1.2 TECNICHE DI INTERVENTO	15
1.2.1 INTERVENTI SULLA STRUTTURA LIGNEA.....	18
1.2.2 INTERVENTI SULLA CONNESSIONE CENTINA- STUOIATO.....	20
1.2.3 INTERVENTI SULLA CAMORCANNA	21
2. MATERIALI COMPOSITI FIBROSI A MATRICE POLIMERICA (FRP).....	27
2.1 LA MATRICE	27
2.2 LE FIBRE	29
2.3 SISTEMI DI APPLICAZIONE DEI COMPOSITI.....	32
2.4 MECCANISMI DI CRISI DEI MATERIALI COMPOSITI.....	34
2.5 LE TENSIONI DI ROTTURA	37
2.6 LA DELAMINAZIONE	39
3. IL MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI	41
3.1 DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO	41
3.2 PROPRIETÀ MECCANICHE DEI MATERIALI.....	45
3.3 CREAZIONE DEL MODELLO.....	48
3.3.1 Volta originale.....	49
3.3.2 Volte rinforzate	54
3.4 ANALISI STATICA LINEARE.....	56
3.5 ANALISI STATICA NON LINEARE	65
4. CONCLUSIONI.....	98
5. BIBLIOGRAFIA	101

INTRODUZIONE

La presente tesi nasce come naturale continuazione di quella redatta in precedenza per la laurea triennale.

In essa erano stati trattati, in modo qualitativo, il recupero e l'adeguamento di coperture lignee in contesti sismici, con particolare attenzione alle volte realizzate con l'antica tecnica della camorcanna, molto diffusa in tutta Italia. Il loro rinforzo, nella attuale pratica, è eseguito con materiali compositi FRP, il più delle volte utilizzati con poca consapevolezza delle conseguenze apportate a livello strutturale e utilizzati ormai come una consuetudine, basandosi su lavori realizzati in precedenza con la stessa tecnica e del cui rendimento ci si fida forse perché non ancora sottoposti ad elevate sollecitazioni. Questo perché il tema del rinforzo di tali strutture, particolari per conformazione e varietà dei materiali utilizzati, non è stato sufficientemente trattato nella letteratura specifica. Solamente negli ultimi cinque anni vi sono stati studi sperimentali su provini in scala di questo tipo di volta. Si è cercato quindi di simulare l'effettivo comportamento delle volte in camorcanna rinforzate con strisce di FRP, valutando quale può essere la tecnica più affidabile con un effettivo beneficio in campo sismico.

Nella prima parte è stata descritta la tecnica realizzativa delle volte in camorcanna e le cause di degrado, con riferimento alla letteratura sul tema.

La seconda parte è una rapida panoramica sui materiali compositi, con relative proprietà meccaniche da considerare in fase di progettazione.

Infine la terza parte, la più importante, tratta la modellazione agli elementi finiti della volta originale e delle volte rinforzate con i relativi risultati, prendendo come riferimento la volta della chiesa di Santa Maria delle Grazie a Montecerignone (PU) che, nel tempo trascorso tra la presente tesi e la precedente, ha inesorabilmente continuato a crollare.

1. VOLTE IN CAMORCANNA

In molte chiese, dimore signorili e teatri facenti parte dell'edilizia storica e monumentale italiana sono presenti le volte leggere dette "*in camorcanna*", o false volte, realizzate con stuoiati di canne e intonaco appesi a centine lignee, che presentano all'intradosso pitture e decorazioni in stucco, spesso di elevato pregio.

Il nome di false volte sta a sottolineare che queste superfici sono realizzate con materiali diversi da quelli tradizionali, cioè i laterizi e la pietra, ottenendo lo stesso risultato con molto meno peso gravante sulle murature d'appoggio e con una più rapida esecuzione. Il nome deriva dal termine che Vitruvio usava per indicare queste false volte, cioè "*camera*" da cui "*camera-canna*" o "*camorcanna*".

La tecnica dell' "*incannicciata*", di cui si hanno esempi in chiese e palazzi signorili già dal 1200-1300, utilizzata dal 1500 anche in Francia, ebbe una rapida e maggiore diffusione nel 1800 poiché in questo periodo era ritenuta più gradevole alla vista una superficie voltata e decorata piuttosto che l'orditura lignea del tetto o del solaio. Per questo motivo era necessario disporre di una superficie leggera e modellata a volta su cui applicare l'intonaco da abbellire con pitture e stucchi.

Il sostegno della camorcanna consiste in una struttura lignea principale, con l'orditura secondo il lato più corto dell'ambiente da coprire: è formata dall'assemblaggio di più tavole collegate mediante sovrapposizione chiodata, in modo che l'insieme abbia la capacità di sostenersi autonomamente. Le orditure principali così formate prendono il nome di "*centine*". Esse poi appoggiano direttamente sulle murature perimetrali, fissate con zeppe di legno e malte alcuni centimetri sopra al livello dell'intradosso finito. Le tavole per le centine possono essere lunghe e alte e quindi sagomate ad arco, oppure corte e approssimanti la curva con una spezzata.

Le centine vengono poi controventate da tavole più piccole chiamate “*tambocci*”, che a volte si presentano di buona fattura con profili ben squadrate, altre volte sono ricavate da tavole irregolari fissate ad incastro forzato tra una centina e l’altra e fermate con chiodi infissi in obliquo. Spesso è presente anche un’ulteriore orditura, formata da assi in legno di piccola dimensione, chiamate “*paconcelli*”, disposte parallelamente alle centine tra un tamboccio e l’altro, che serve ad aumentare la superficie di aggancio dello stuoiato. Inoltre all’intradosso delle centine venivano chiodate le “*cantinelle*”, piccole assi di legno a cui veniva fissato lo stuoiato.

Subito sotto la struttura lignea così creata si sistema la stuoia di canne su cui è applicato l’intonaco. Le canne, che possono essere spezzate a metà o in più parti secondo l’asse longitudinale, o solamente schiacciate, venivano intrecciate tra loro formando una maglia regolare oppure appoggiate direttamente alla parte lignea, senza essere schiacciate, legate da giunchi flessibili o filo di rame tra di loro e, tramite chiodi a testa larga, ai tambocci e alle centine.

Lo stuoiato è così pronto per essere intonacato al suo intradosso, procedendo con gli strati del rinzafo, dell’arriccio e della lisciatura con malta fine. Poteva essere intonacato anche all’estradosso, per fornire protezione.

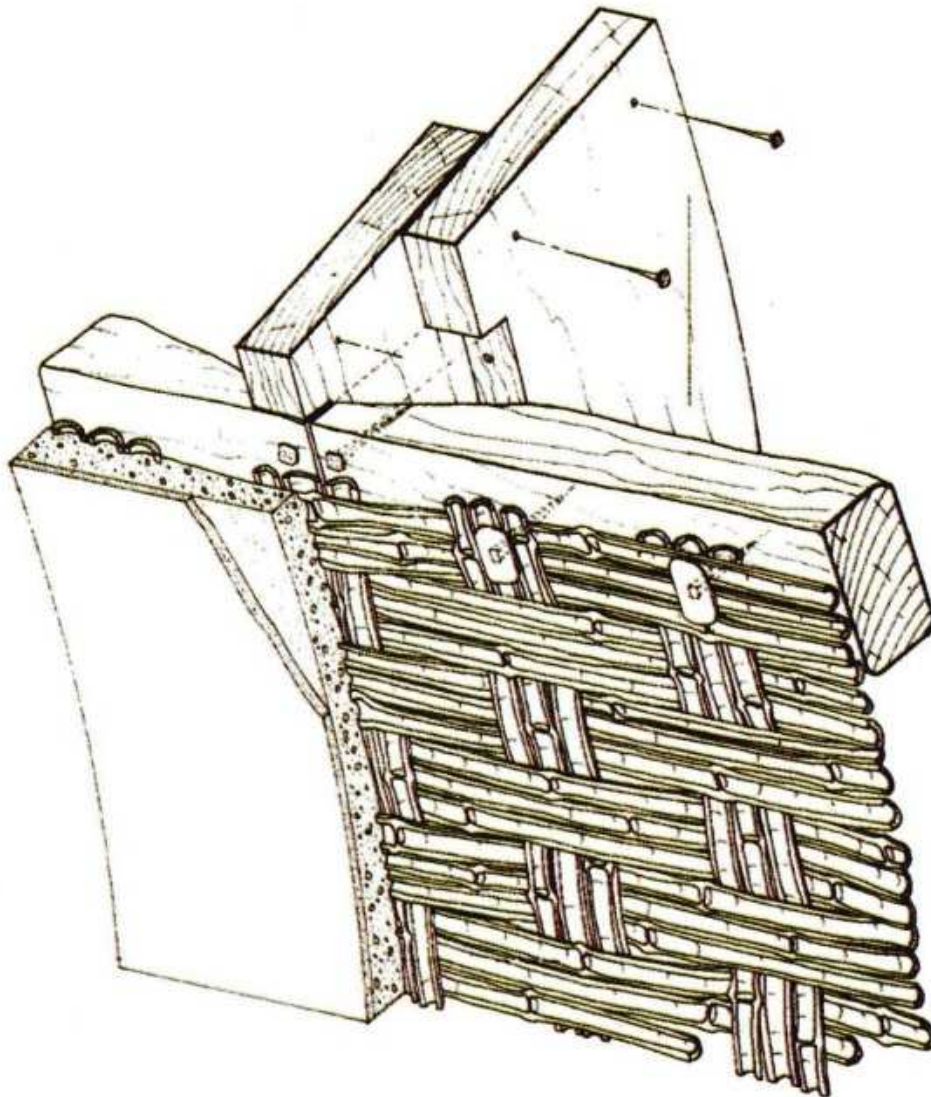


Fig. 1: Particolare di volta in camoscina con stuoiato a canne intrecciate

Nelle chiese sono generalmente presenti volte a botte, spesso con “unghie” in corrispondenza delle eventuali finestre, realizzate con centine perpendicolari all’asse della volta, disposte ad interassi di 60÷90 cm secondo la robustezza delle centine stesse, della qualità dei tambocchi e delle cantinelle e il peso degli stucchi delle decorazioni. Spesso erano utilizzate le volte in camoscina anche per ricoprire le cupole all’incrocio dei transetti e le semicupole delle absidi; in questo caso le centine venivano disposte

secondo lo stesso orientamento dei costoloni delle cupole in muratura, cioè tutte convergenti nella sommità della cupola stessa.



Fig. 2: Estradosso di volta a botte in camorcanna



Fig. 3: Estradosso di cupola in camorcanna

Sono presenti entrambe le tipologie di stuoiato: quella composta da un fascio di cannuce palustri del diametro di 5 mm circa, a cui viene tolto il rivestimento esterno, accostate tra loro e legate con giunchi flessibili, intrecciati perpendicolarmente alle canne ogni 10÷30 cm, e quella formata da canne di grosso diametro, circa 20÷25 mm, spaccate longitudinalmente in 2 o 4 parti di 2 cm di larghezza, e intrecciate tra loro per formare una maglia

a doppio ordito, formando riquadri di circa 8x8 cm; quest'ultimo stuoiato prende il nome di "arellato". La prima tipologia permette la realizzazione di un'orditura lignea di supporto ad interassi maggiori rispetto a quelli che si avrebbero nel caso del secondo tipo di stuoiato, in ragione della maggiore rigidità e quindi minore deformabilità.

1.1 DEGRADO DELLE VOLTE IN CAMORCANNA

Le principali cause di degrado delle volte in camorcanna possono essere raggruppate in due categorie: la prima raccoglie i fattori di danno interni al sistema, mentre la seconda le cause esterne indipendenti dal sistema.

Quindi, tra i difetti propri del sistema si hanno:

- *difetti originali del legno;*
- *dimensionamento strutturale insufficiente delle strutture lignee;*
- *errori nelle connessioni tra le parti della volta;*

mentre le cause esterne di degrado sono:

- *eventi accidentali, come cedimenti differenziali delle murature d'appoggio, eventi sismici, incendi;*
- *infiltrazioni d'acqua;*
- *attacchi di insetti xilofagi e funghi;*
- *riscaldamento dell'ambiente sottostante con fenomeni di umidità nella volta per l'elevato gradiente termico.*

- *Difetti originali del legno:* il legno usato per la realizzazione delle centine e dei tambocchi in passato non veniva scelto con cura, si usavano spesso legnami di scarto, a causa della non fondamentale importanza strutturale che veniva attribuita alle volte in camorcanna. Non è raro, quindi, che i legni utilizzati presentino fin dall'origine vari difetti che riguardano sia la loro struttura che le proprietà fisiche e chimiche. Questi ultimi dipendono dall'attacco di insetti xilofagi e

funghi avvenuti prima della messa in opera; quelli che interessano la struttura possono essere così riassunti:

NODO	Si intende l'inserzione dei rami nei fusti arborei che dà luogo a discontinuità nell'andamento delle fibre. La presenza di nodi può contribuire in maniera importante al decadimento delle caratteristiche meccaniche dell'elemento, specialmente quando questi sono presenti in numero considerevole e di grandi dimensioni
CIPOLLATURA	Si intende il distacco parziale o totale degli anelli di accrescimento che provoca una riduzione della sezione e, di conseguenza, della resistenza dell'elemento
DEVIAZIONE DELLA FIBRATURA	Interessa generalmente i fusti di alberi cresciuti ad alta quota in particolari condizioni ambientali (ad esempio in zone molto ventose). Tale deviazione incide significativamente sulle caratteristiche meccaniche del materiale e può dar luogo a rotture e scorrimenti imprevisti a causa delle sollecitazioni di flessione e taglio a cui sono soggetti i vari elementi
FRATTURE	Interessano parte della sezione trasversale del fusto dell'albero; anche se tali fratture sono visibili in un primo momento all'esterno, il processo di rimarginazione può successivamente occultarle all'interno della sezione del fusto, comportando una grave menomazione alla capacità resistente, portando durante la fase di esercizio a rotture localizzate
TASCHE DI RESINA	Generalmente non molto estese, si possono localizzare lungo gli anelli di accrescimento dando luogo ad una riduzione della sezione resistente

- *errori nelle connessioni:* sono dovute all'insufficiente ed errata chiodatura tra le centine stesse, tra le centine e i tambocchi, tra il cannucciato e l'orditura lignea. Si manifestano con il distacco degli elementi tra di loro, in particolare dei tambocchi dalle centine quando non vengono infissi con chiodatura in obliquo ma da sotto, oppure

con notevoli rotture alle estremità delle tavole delle centine quando la chiodatura è stata eseguita in corrispondenza di difetti propri del legno o troppo vicina al bordo delle tavole. Rientra in questa categoria anche la scarsa presenza di “ponti” di malta, dovuta alla connessione troppo stretta tra le canne dello stuoiato; infatti i ponti sono dovuti al reflimento della malta tra una canna e l'altra, e servono a garantire la buona connessione tra intonaco e stuoiato e devono quindi essere numerosi;

- *dimensionamento insufficiente delle strutture lignee*: non è una vulnerabilità riscontrabile di frequente, perché le conoscenze pratiche dei costruttori del passato, seppur non del livello di quelle attuali basate su sperimentazioni scientifiche, erano sufficienti a evitare il sotto-dimensionamento degli elementi lignei e a garantire la loro messa in opera con schemi statici adeguati. Comporta comunque deformazioni permanenti dell'intera volta, con possibilità di rotture e crolli. Questi possono essere dovuti a un aumento di carico, non preventivato, in tempi successivi a quelli di realizzazione per l'aggiunto di sovrastrutture gravanti sulla volta;
- *attacchi di insetti xilofagi e funghi*: l'azione degli insetti xilofagi comporta un'asportazione di legno dalla centina con conseguente diminuzione della sezione resistente senza modificarne però la struttura e la composizione chimica delle rimanenti parti. Non è quindi facile quantificarne il danno causato. Gli insetti che danneggiano il legno appartengono all'ordine dei Coleotteri, tra cui l'Anobio (o tarlo), il Capricorno e il Lyctus, e all'ordine degli Isotteri, tra i quali i più pericolosi sono le Termiti. Le centine sono attaccate principalmente dal Capricorno, in quanto predilige i legni più duri e resistenti. E' molto pericoloso perché, così come le termiti, le sue larve si introducono all'interno del legno e ne corrodono la struttura interna senza lasciare alcun segno sulle facce esterne. Dopo 3-7 anni le larve, trasformandosi in coleotteri, escono dal legno

lasciando fori ovoidali di 0,5÷1 cm, che sono l'unico segno che ci permette di scoprirne l'esistenza all'interno.

Anche i funghi diminuiscono la resistenza meccanica del legno, in particolare la resistenza all'urto. I funghi proliferano in condizioni di umidità iniziale superiore al 20% e temperatura compresa tra 10° e 26°. La principale categoria di funghi che attacca il legno è quella dei basidiomiceti, i quali scompongono le sue tre componenti: le celle fibrose di cellulosa, la lignina, l'emicellulosa. Il più pericoloso è il "Marilium Lacrimans" in quanto si diffonde e attacca ogni parte degli elementi lignei, si riconosce dalle spore marroni. In questa categoria rientrano anche la Carie bianca (per il colore chiaro che assume il legno attaccato) e la Carie bruna, che allo stato avanzato prende il nome di Carie a cubetti per la particolare disposizione delle fessure. Essi agiscono a temperature comprese tra i 25° e i 30° e con un'alta umidità del legno; corrodono soprattutto la lignina e la cellulosa (danno la resistenza e la rigidità) e comportano la completa distruzione del legno. La pericolosità è accentuata dal fatto che non è facile individuarli, infatti agiscono senza lasciare effetti evidenti all'esterno, come la Carie bruna che può produrre una diminuzione del 60÷70% delle prestazioni strutturali di una trave con una riduzione del suo peso di appena il 3%.

Un terzo fattore di degrado è il marcimento per mancata aerazione. Si ha nei punti di connessione delle centine con la muratura quando, a discapito della regola dell'arte, il legno è a diretto contatto su tutte le facce con la muratura: non essendoci spazi liberi l'aria non può liberamente circolare e quindi si accumula nel legno l'umidità che gli viene trasmessa dalla muratura, sia direttamente che per capillarità. Innalzandosi a livelli molto elevati l'umidità relativa del legno, i funghi trovano le condizioni ideali per proliferare e causano in tempi relativamente brevi la disgregazione della parte di trave ammorsata nella muratura, senza che nella parte visibile vi sia il

minimo segno dell'attacco. Di conseguenza si arriva alla rottura della trave in modo improvviso, prima di poter eseguire qualsiasi intervento;

- *infiltrazioni d'acqua*: le volte in camorcanna sono poste al di sotto della copertura. Questa spesso presenta delle sconessioni e delle fessure e può quindi causare l'infiltrazione di acqua piovana che va ad accumularsi negli elementi della volta. L'umidità che si accumula nelle centine e nei tambocchi rappresenta la condizione ideale per il proliferare degli insetti xilofagi e soprattutto dei funghi, che comportano il loro degrado. Invece l'incannucciato con l'umidità tende a sfaldarsi con perdita della connessione tra le canne; questo, unito alla rottura dei chiodi tra lo stuoiato stesso e le centine a causa dell'ossidazione, comporta molti avvallamenti della volta con distacchi del cannucciato e dell'intonaco intradossale. Il degrado delle malte dell'intonaco e delle decorazioni avviene più lentamente: infatti esse tendono ad assorbire l'acqua e a rilasciarla poco alla volta verso l'estradosso, che rappresenta il lato a maggior permeabilità, dove si accumula. Essendo però le malte realizzate nella maggior parte dei casi con leganti a base di gesso (rapporto 1:1:2 o 1:1:3, cioè una parte di calce, una di gesso e 2 o 3 di sabbia), esse a contatto con l'acqua aumentano il proprio volume a causa dell'elevato grado di igroscopicità del gesso, con rottura dello strato dipinto o decorato. Si ha la disgregazione della malta anche nel caso di leganti diversi dal gesso, a causa dei sali igroscopici che contengono e che comportano una ricristallizzazione continua in superficie con la formazione di muffe e il distacco della pittura;
- *riscaldamento dell'ambiente sottostante*: l'acqua può agire sulla struttura anche sotto forma di vapore. Le volte sono elementi posti a separazione dell'ambiente sottotetto da quello vissuto dalle persone, cioè l'interno della chiesa. Separano quindi ambienti con temperature diverse di 10÷20°C e differenti valori di umidità

relativa. In queste condizioni il vapore che si forma all'interno della chiesa tende a salire verso le volte e a condensare poi sulle pareti più fredde, cioè l'estradosso della camorcanna. L'acqua viene, così, accumulata nel periodo invernale per essere poi rilasciata in quello caldo di primavera e estate. Si verificano accumuli d'acqua che innescano processi di "scurimento" delle volte nelle zone con minore permeabilità. Lo scurimento è più accentuato se gli ambienti sottostanti le volte vengono riscaldati: il movimento dell'aria causato dal riscaldamento fa salire più velocemente verso le volte le particelle di vapore che vengono assorbite dalle zone più umide, in particolare in corrispondenza delle centine lignee, causando spesso delle quadrettature scure sulle volte che rendono visibili la struttura delle centine e dei tambocchi. Le zone scure rappresentano i punti di possibile degrado futuro;

- *eventi accidentali*: tutte le osservazioni compiute su edifici colpiti dal terremoto hanno portato a ricondurre a due sole tipologie i danni che una camorcanna può subire: le fessurazioni dell'intonaco intradossale e i distacchi tra gli elementi lignei e il cannucciato con caduta di porzioni d'intonaco. Quindi in caso di terremoto i danni più rilevanti riguardano esclusivamente lo stuoiato e l'intonaco. Gli elementi della struttura lignea non presentano mai lesioni causate dal sisma. Questo è spiegabile considerando la conformazione strutturale delle centine: essendo formate dall'unione con chiodi di più tavole, possono essere schematizzabili come tante aste unite da cerniere interne in corrispondenza delle unioni chiodate, poiché queste possono essere considerate delle connessioni non rigide, permettendo quindi la rotazione relativa tra le tavole. E questa è proprio una delle caratteristiche principali del sistema a camorcanna. Inoltre la chiodatura puntuale dello stuoiato alla struttura lignea garantisce una collaborazione solo parziale dei due elementi, di conseguenza le canne hanno una certa libertà di adattamento alle

sollecitazioni trasmesse, potendo anche “distendersi” grazie al legame non rigido che c’è tra una canna e quella adiacente. Quindi non si può avere il crollo di una volta in camorcanna per sisma, se non intervengono altri fattori, come la caduta delle capriate o altri elementi della copertura sulla volta, ma solo eventuali lesioni nello strato dell’intonaco.

1.2 TECNICHE DI INTERVENTO

L’intervento di recupero delle volte in camorcanna è costituito da più fasi in quanto queste strutture presentano un sistema costruttivo complesso. Le fasi del recupero interessano dapprima le strutture portanti, quindi centine e tambocci, poi lo stuoiato, l’intonaco, gli stucchi e infine le pitture e le decorazioni se la volta presenta ornamenti di pregio.

Per poter agire in modo mirato e consapevole è necessario come prima cosa accertarsi delle condizioni della struttura, procedendo contemporaneamente anche con un accurato rilievo e mappatura delle decorazioni e del loro stato di conservazione. Questa prima fase può quindi essere così articolata:

- pulizia completa delle parti lignee, con spazzolatura, raschiatura del legno degradato, aspirazione di tutti i residui di deposito, polvere e sporco. Si può procedere anche con sabbiatura a pressione controllata per eliminare completamente le fibre degradate raggiungendo così la parte più interna di legno sano;
- controllo visivo e strumentale dello stato di conservazione di tutti gli elementi, per poter definire le zone in cui intervenire successivamente. La stessa cosa vale anche per le decorazioni dell’intonaco;
- eventuali analisi di laboratorio per determinare le proprietà dei materiali presenti, in modo da poter operare con interventi compatibili, evitando così di utilizzare materiali e sostanze che

potrebbero alterare chimicamente e fisicamente gli elementi originali.

Completata la fase conoscitiva si può procedere con quella del consolidamento, partendo dalle strutture principali, le centine, passando poi ai tambocchi e infine allo stuoiato.

Prima di procedere con questa fase è però necessario intervenire per contrastare le cause del degrado del legno, cioè insetti e funghi: si devono quindi trattare le centine, i tambocchi e il cannucciato con sostanze insetticide e biocide, applicate per impregnazione, a rullo, a pennello o con spruzzo in quantità proporzionali alla capacità di assorbimento dei vari tipi di legno. Inoltre per evitare il ristagno dell'aria umida con conseguente proliferazione di funghi e marcimento, è consigliabile lasciare nicchie o aperture nelle pareti del sottotetto, cioè tra la copertura dell'edificio e la camorcanna, per consentire una buona ventilazione dell'aria e tenere così una umidità del legno inferiore al 20%. Questa soluzione era consigliata da diversi autori di manuali del Settecento e Ottocento e, infatti, oggi è possibile vedere nei timpani delle facciate delle chiese e nelle pareti dei palazzi alcune aperture che venivano realizzate per questo scopo.

Il consolidamento si divide quindi in:

- *consolidamento delle centine*: nel caso in cui la centina è completamente degradata si deve procedere alla sua sostituzione con una di legno nuovo agganciata alle murature con barre filettate o con un supporto metallico, inserendo poi degli agganci puntuali per unirli alla camorcanna. Se la centina non è interamente danneggiata è consigliabile non sostituirla, intervenendo solo sulla parte ammalorata con protesi lignee fissate con barre e resine epossidiche alla parte sana.

Se si constata che la sezione delle centine è insufficiente, questa può essere aumentata aggiungendo ulteriori tavole in legno chiodandole a fianco di quelle esistenti, oppure inserendo dei profilati metallici.

Nel caso in cui oltre al degrado delle centine si ha anche quello delle connessioni centina-camorcanna, si provvede alla fasciatura parziale o totale della centina stessa, risvoltando poi il tutto sulla camorcanna, con un sistema a base di resine epossidiche e fibre di vetro;

- *consolidamento dei tambocci*: essendo il loro compito quello di controventare le centine e fornire ulteriore supporto per la chiodatura dello stuoiato, non sono soggetti a grandi sollecitazioni, quindi si trovano spesso in buono stato. Se presentano un degrado possono essere sostituiti con legni nuovi;
- *consolidamento del cannucciato e degli aggrappi con l'intonaco*: nei punti in cui lo stuoiato è molto degradato o dove ne sono venute meno intere parti, è possibile sostituirlo con un nuovo cannucciato che deve essere ben ammorsato a quello sano esistente.

Per rinforzare i ponti di malta si può procedere con interventi puntuali con malte o resine epossidiche e fibra di vetro. In passato venivano molto usati la tela di juta e il gesso, il vantaggio risiedeva nella similitudine con il materiale originario, lo svantaggio era però quello dell'elevato aumento di peso sulla camorcanna (pari anche al 100%) e l'elevata igroscopicità del gesso.

La terza fase è quella del recupero dell'intonaco intradossale. Per contrastare il suo degrado è necessario procedere con iniezioni puntuali di resine riempitive miste a inerti. In questo modo si contrastano le fessurazioni della malta e il distacco tra gli strati di applicazione dell'intonaco. Poi si stuccano le fessure e i buchi con una malta che deve avere il più possibile caratteristiche uguali a quella dell'intonaco originale, per non creare dei punti di discontinuità fisica o chimica.

L'ultima fase è quella del restauro delle pitture e delle decorazioni, compito affidato al restauratore.

Vediamo ora più nel dettaglio i vari interventi possibili.

1.2.1 INTERVENTI SULLA STRUTTURA LIGNEA

Nel caso in cui le centine presentino un lieve degrado, possono essere consolidate applicando un rinforzo composto da una resina epossidica in aderenza ai fianchi delle centine nell'angolo di contatto tra le centine stesse e la camorcanna. E' consigliabile usare resine a basso peso specifico per limitare il peso sulla camorcanna, e con modulo elastico simile a quello del legno per ottenere un sistema elastico collaborante alle deformazioni, evitando che tutti gli sforzi vengano contrastati solo dalla resina di supporto.

Se le centine sono maggiormente degradate, possono essere interamente rivestite sulla loro superficie, per 3 cm di spessore, con la stessa resina vista prima, eventualmente armata in senso longitudinale con barre in vetroresina e fibre di vetro, che viene così a costituire un supporto a U rovesciata che ingloba l'intera centina, svolgendo quindi per intero il compito strutturale che la vecchia centina non è più in grado di assicurare.

La stessa funzione, nel caso in cui le centine non presentino più i requisiti di resistenza, svolta dal profilo a U in resina, può essere ottenuta con l'impiego di profilati metallici in acciaio imbullonati ai lati delle centine ed eventualmente collegati con tiranti alla struttura lignea della copertura sovrastante. Invece degli elementi in acciaio possono essere utilizzate anche nuove tavole di legno affiancate a quelle originali, e ad esse collegate con chiodatura o bullonatura.



Fig. 4: Consolidamento centine con nuove tavole e nuovi tambocchi

In molti casi può essere utile migliorare i collegamenti esistenti tra le tavole delle centine, inserendo elementi trasversali filettati in acciaio con dadi e rondelle, oppure pioli in vetroresina.



Fig. 5: Miglioramento dei collegamenti tra le tavole

Se alcune parti delle centine risultano molto degradate è possibile sostituirle con parti realizzate in resina epossidica armata, se necessario, con barre in vetroresina o con fibre di vetro; però vista la discontinuità che si viene a creare dal punto di vista delle resistenze e delle rigidità, è preferibile utilizzare protesi di legno nuovo invece che il materiale plastico; il nuovo legno deve avere caratteristiche simili a quello originale.

1.2.2 INTERVENTI SULLA CONNESSIONE CENTINA-STUOIATO

Servono a ripristinare e migliorare le connessioni tra la struttura lignea e la stuoia di canne. Sono necessari quando la chiodatura fra stuoiato e centine non è più efficiente e quindi si rischia il distacco della camorcanna dalla struttura portante. Vista l'impossibilità di praticare nuove chiodature dall'intradosso, per la presenza dell'intonaco, è necessario operare all'estradosso con collanti.

Un possibile intervento consiste nell'applicare spezzoni di legno di circa 20 cm incollati con resina epossidica ai lati delle centine e alla superficie dello stuoiato, ottenendo collegamenti puntuali che non vanno a interferire con la capacità traspirante della camorcanna.

In alternativa possono essere praticate applicazioni a bassa pressione di una resina epossidica "tixotropica", con modulo elastico molto basso ed elevato potere adesivo. La resina può essere applicata anche in corrispondenza dei tambocci e dei paconcelli. Utilizzando un prodotto tixotropico non c'è il rischio che la resina fuoriesca all'intradosso macchiando la superficie decorata; infatti questi materiali hanno la proprietà di essere gelinosi a riposo, diventare liquidi se agitati, e ritornare subito gelinosi non appena finisce l'agitazione.

Infine possono essere eseguiti raccordi angolari, tra elementi lignei e stuoiato, o con l'applicazione a tratti di un cordone di 1,5 cm di lato di resina epossidica, oppure con stuoie di fibre di vetro impregnate di resina.

1.2.3 INTERVENTI SULLA CAMORCANNA

Sono quegli interventi che servono a migliorare o ripristinare i collegamenti fra lo stuoiato e l'intonaco sottostante.

Se il degrado della stuoia è di piccola dimensione, si può stendere un nuovo tessuto di canne da ammorsare al cannucciato sano, collegandolo all'intonaco intradossale con resine o malte. Il nuovo stuoiato può essere realizzato anche con materiali moderni come le fibre di vetro immerse in resine epossidiche.

Se i ponti di malta sono scarsi è possibile ricorrere ad applicazioni puntuali di malte di calce idraulica additivate con resine, per consolidare l'intonaco e fissarlo alle canne.

IL SISTEMA A FASCIATURE O A “CAPPE” ESTRADOSSALI

Se il collegamento tra stuoiato e intonaco è danneggiato per una zona relativamente estesa, è possibile creare una solettina di calce estesa a tutto l'estradosso. Questa “cappa” estradossale, di 1÷2 cm di spessore, ricrea il collegamento fra l'intonaco refluito tra le canne e le canne stesse; deve essere applicata dopo l'accurata pulizia della superficie e dopo il trattamento biocida eseguito sul cannucciato, inoltre può essere steso anche dell'adesivante sul cannucciato per migliorarne il collegamento con la cappa.

Il sistema più utilizzato in passato per la realizzazione della cappa era costituito dall'impiego di tela di juta e gesso: venivano applicati alternati uno strato di tela, eventualmente risvoltato sulle centine, e uno di gesso, ricoprendo l'intera volta. Gli svantaggi di questo sistema, oggi in disuso, risiedono nelle modifiche alla traspirabilità della camorcanna una volta ricoperta dalla cappa, e nell'elevata igroscopicità del gesso; inoltre la volta originale risulta molto appesantita da questo intervento che spesso prevede spessori della fasciatura anche maggiori di quello dell'intonaco sottostante.

L'alternativa a questa tecnica è rappresentata dall'impiego dei moderni materiali compositi, cioè gli FRP (Fiber Reinforced Plastic) che, grazie alle loro elevate proprietà meccaniche, possono essere applicati con spessori di soli alcuni millimetri, non andando così a incrementare eccessivamente il carico gravante sulla camorcanna.

Le fibre di vetro sostituiscono la tela di juta e le resine epossidiche sostituiscono il gesso, evitando i problemi di igroscopicità e peso di quest'ultimo.

L'intervento consiste nell'applicazione di più strati consolidanti e le fasciature, se risvoltate sulle centine, possono svolgere anche il compito di rinforzo strutturale per quest'ultime, fino a poter anche arrivare a ricoprire tutta la volta, formando una cappa estradossale.

Dopo aver pulito lo stuoiato si applica una resina ad alta penetrazione che serve a consolidare e rendere antipolvere la superficie d'appoggio. Poi si stende uno strato di 2÷3 cm di resina epossidica adesiva e vi si immerge a fresco uno strato di tessuto di fibre di vetro. Si applica poi un ulteriore strato di resina. Se necessario si ripete stendendo un secondo strato di fibre di vetro e resina.



Fig. 6: Stesura del primo strato di materiale composito FRP



Fig. 7: Consolidamento a fasce mediante FRP

Il vantaggio di questa tecnica risiede nella maggior leggerezza e minor rigidità rispetto al sistema a tela di juta e gesso.

Gli svantaggi che si presentano sono:

- la bassissima permeabilità che presentano questi materiali compositi, che possono portare quindi a una non corretta traspirazione del sistema, in particolare se tale intervento viene eseguito a cappa continua, ricoprendo l'intera volta. La permeabilità del gesso è infatti dell'ordine di $270 \text{ g/m}^2 \text{ 24h}$; quella degli FRP è invece di $38 \text{ g/m}^2 \text{ 24h}$ circa, che diventano $76 \text{ g/m}^2 \text{ 24h}$ se nella resina si creano, tramite elementi a perdere, forature pari all'1,5% della superficie ricoperta. E' consigliabile quindi ricorrere a fasciature parziali o puntuali della volta, lasciando libero il più possibile il cannucciato;
- se la cappa viene estesa all'intera volta, si crea un irrigidimento di tutte le connessioni fra gli elementi della struttura, con conseguente cambiamento del comportamento strutturale, passando da un sistema in cui la camorcanna si trova semplicemente appesa alle centine, a

uno dal comportamento unitario in cui la camorcanna, a parità di carico sia statico che dinamico, viene maggiormente sollecitata e deve svolgere compiti strutturali assenti nel sistema originale. Infatti i piccoli spostamenti provocati da un sisma, e comunque da qualsiasi carico, sono assorbiti senza troppo danno dalla camorcanna, grazie alla deformabilità delle strutture lignee, la flessibilità delle membrature e la duttilità delle connessioni. Proprio le elevate deformabilità dei collegamenti garantiscono un'adeguata risposta all'evento sismico: la possibilità di scorrimenti relativi permette una parziale indipendenza tra lo stuoiato e le centine che trasmettono l'azione sismica, così questa arriva smorzata all'intonaco decorato che quindi non si danneggia. Quindi, per questi motivi, deve essere evitata la copertura a cappa continua estradossale con FRP. Allo stesso modo è da evitarsi anche la fasciatura solo tra le centine senza risvoltarla su quest'ultime. Infatti dalle sperimentazioni numeriche eseguite (Quagliarini, D'Orazio; Università Politecnica delle Marche) risulta che l'intervento che meglio si riconduce al comportamento originale della camorcanna, comportando le minori variazioni dello stato tensionale rispetto al sistema originale non consolidato, è quello che prevede il consolidamento a fasce risvoltate sulle centine, come si può vedere dalle seguenti elaborazioni:

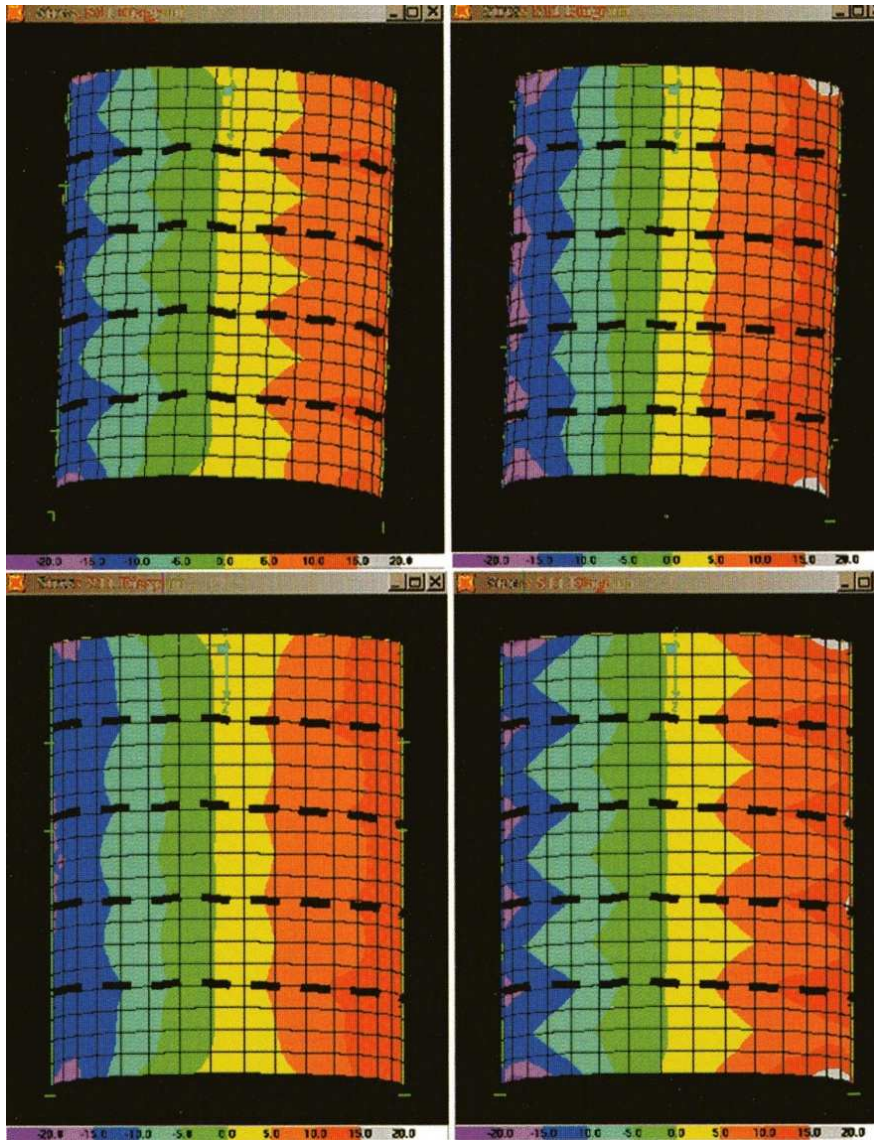


Fig. 8: Tensioni all'intradosso di volta a botte caricata da peso proprio e sisma in direzione X, parallelo alle centine (linee tratteggiate). In senso orario: situazione originaria non consolidata; consolidamento con FRP a cappa continua su tutto l'estradosso; consolidamento con FRP a fasce tra le centine; consolidamento con FRP a fasce risvoltate sulle centine

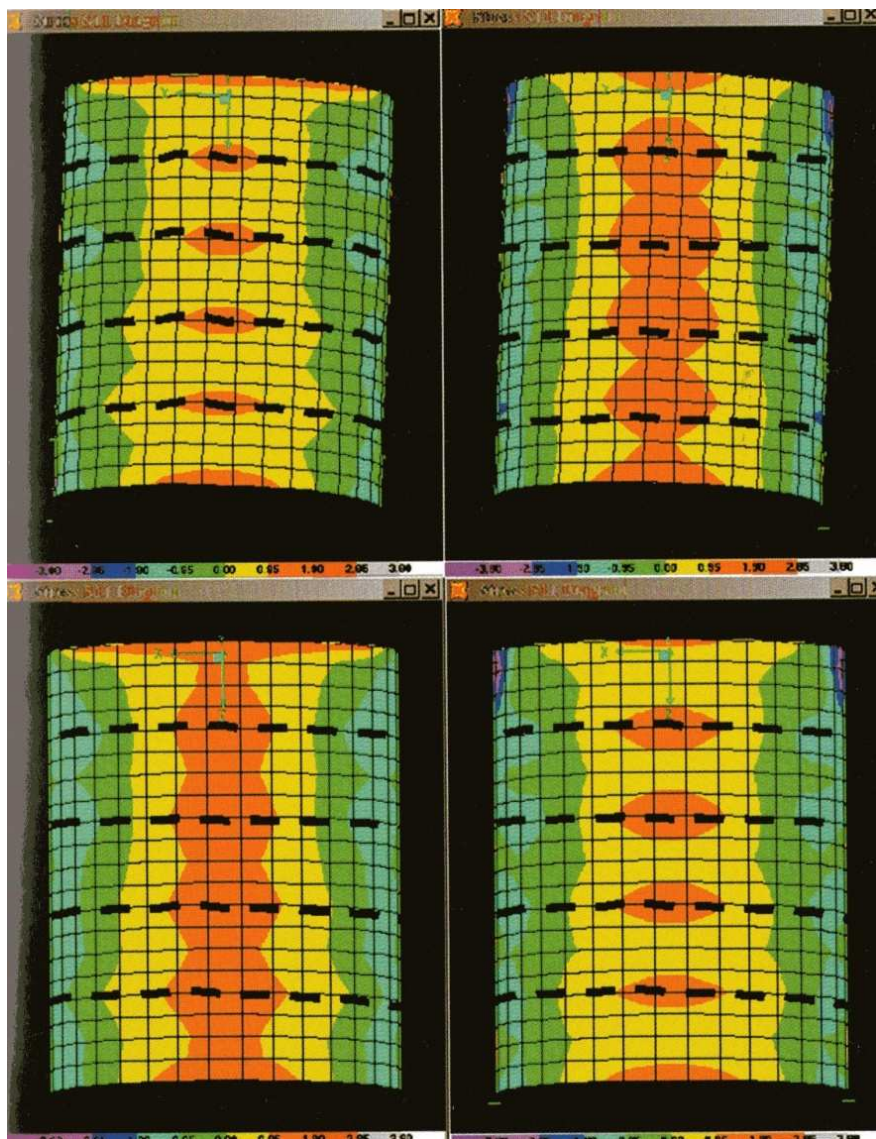


Fig. 9: Tensioni all'intradosso di volta a botte caricata da peso proprio e sisma in direzione Z, perpendicolare alle centine. In senso orario: situazione originaria non consolidata; consolidamento con FRP a cappa continua su tutto l'estradosso; consolidamento con FRP a fasce tra le centine; consolidamento con FRP a fasce risvoltate sulle centine

2. MATERIALI COMPOSITI FIBROSI A MATRICE POLIMERICA (FRP)

I materiali compositi fibrosi a matrice polimerica FRP (fiber reinforced polymers) sono formati da una matrice polimerica organica nella quale vengono annegate le fibre, rigidamente connesse ad essa. Sono eterogenei ed anisotropi e mostrano un comportamento prevalentemente elastico lineare fino al collasso.

I materiali FRP sono nati negli anni '40 per la realizzazione di manufatti in ambiti navale, meccanico ed aerospaziale, utilizzando le fibre di vetro (vetroresina). Negli anni '60 si è iniziato ad utilizzare le fibre di carbonio e negli '70 le fibre in aramide (kevlar).

La matrice mantiene le fibre unite, le protegge dall'ambiente circostante e permette il trasferimento delle sollecitazioni esterne e la collaborazione tra le fibre stesse.

Le fibre, che svolgono la funzione resistente del composito, possono essere discontinue o continue. Nel primo caso le fibre sono corte e disposte generalmente in modo casuale all'interno della matrice. Nel secondo caso sono allineate secondo un'unica direzione per formare nastri, tessuti e lamine; con il loro orientamento definiscono così la direzione privilegiata di resistenza del materiale composito, e si parla di composti unidirezionali e si ottengono proprietà del materiale particolarmente anisotrope.

I compositi formati da un solo strato di fibre prendono il nome di lamine, hanno uno spessore di qualche decimo di millimetro; più lamine sovrapposte costituiscono un laminato.

2.1 LA MATRICE

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione dei compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti. Tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano

liquide o pastose a temperatura ambiente. Per miscelazione con un opportuno reagente esse polimerizzano (reticolano) fino a diventare un materiale solido vetroso; la reazione può essere accelerata agendo sulla temperatura. I vantaggi da esse presentati sono diversi: sono caratterizzate da una bassa viscosità allo stato fluido e quindi da una relativa facilità di impregnazione delle fibre, da ottime proprietà adesive, dalla possibilità di avere formulazioni che reticolano a temperatura ambiente, da una buona resistenza agli agenti chimici, dall'assenza di una temperatura di fusione, ecc. I principali svantaggi sono invece rappresentati dall'ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa, dalla modesta tenacità a frattura (comportamento "fragile") e dalla sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più diffuse nel settore civile sono le epossidiche. Anche impiegate sono le resine poliestere o vinilestere.

Poiché il materiale viene miscelato a partire dai diversi componenti direttamente in cantiere e assume le sue caratteristiche strutturali finali attraverso una reazione chimica, esso dovrebbe sempre essere applicato da personale specializzato.

Sono anche disponibili materiali compositi fibrorinforzati con matrici polimeriche termoplastiche, che possono richiedere tecniche di applicazione diverse dalle precedenti.

Resine epossidiche

Le resine epossidiche sono caratterizzate da una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici ed inoltre presentano ottime proprietà adesive. Sono perciò particolarmente indicate per la realizzazione di compositi da impiegare nel settore civile.

La temperatura massima di esercizio dipende dalla formulazione e dalla temperatura di reticolazione. Per temperature di esercizio superiori a 60 °C, la resina deve essere opportunamente selezionata tenendo conto delle

competenti variazioni delle sue caratteristiche meccaniche. Al contrario non sussistono, di solito, limiti significativi per la temperatura minima di esercizio. La reazione è esotermica e può essere condotta sia a temperatura ambiente, sia ad elevata temperatura, a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà finali desiderate.

Resine poliesteri

Le resine poliesteri sono caratterizzate da una viscosità inferiore rispetto a quella delle epossidiche e presentano una notevole versatilità ed un'elevata reattività. La resistenza meccanica e le proprietà adesive sono solitamente inferiori rispetto alle analoghe esibite dalle resine epossidiche.

La reazione è esotermica e può essere condotta sia a temperatura ambiente, sia ad elevata temperatura, a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà finali desiderate.

Le proprietà meccaniche delle matrici polimeriche termoindurenti comunemente utilizzate per la realizzazione degli FRP sono:

<i>modulo di Young</i>	2,7÷3,6 GPa
<i>resistenza a trazione</i>	40÷82 Mpa
<i>deformazione a rottura</i>	1,4÷5,2 %

2.2 LE FIBRE

Le fibre più utilizzate per la realizzazione dei materiali compositi sono quelle di vetro, di carbonio ed aramidiche.

Sono costituite da filamenti continui molto sottili (10µm) e quindi difficili da manipolare singolarmente. Per questo sono disponibili in commercio in varie forme:

- cavo di filatura (*tow*): formato da migliaia di filamenti paralleli tra loro assemblati senza torsione, destinato ad essere filato o ritorto, oppure strappato per essere utilizzato come fibra discontinua;

- filo o filato (*spun yarn*): ottenuto da migliaia di filamenti assemblati fra di loro con torsione;
- filo assemblato (*roving*): filo ottenuto assemblando senza torsione un certo numero di *spun yarn* disposti parallelamente fra loro.

L'unità di misura di massa lineare, o *titolo*, secondo la norma ISO 2974:2000(E) è il TEX, equivalente ad 1 grammo per km di fibra.

Fibre di vetro

Le fibre di vetro sono usate soprattutto in campo navale ed industriale per realizzare compositi con prestazioni meccaniche medio-alte.

Presentano un modulo di elasticità inferiore a quello delle fibre in carbonio ed aramidiche (circa 70GPa) ed una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cautela nella manipolazione durante l'impregnazione con le resine. Sono caratterizzate anche da una bassa resistenza allo scorrimento viscoso e ai fenomeni di fatica. Gli FRP con fibre di vetro sono indicati con la sigla GFRP.

Fibre di carbonio

Sono fibre usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si distinguono per il loro alto modulo di elasticità normale e per la loro elevata resistenza. Esibiscono un comportamento a rottura intrinsecamente fragile caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto, anche se le tensioni di rottura sono elevate.

A confronto con le fibre di vetro e con quelle aramidiche, le fibre di carbonio risultano essere le meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (*creep*) e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine. Gli FRP composti con fibre di carbonio sono indicati con la sigla CFRP.

Sono disponibili in commercio fibre di carbonio di due tipi:

- fibre alta resistenza con $E=240$ GPa
- fibre alto modulo (HM) con $E=640$ GPa

Fibre arammidiche

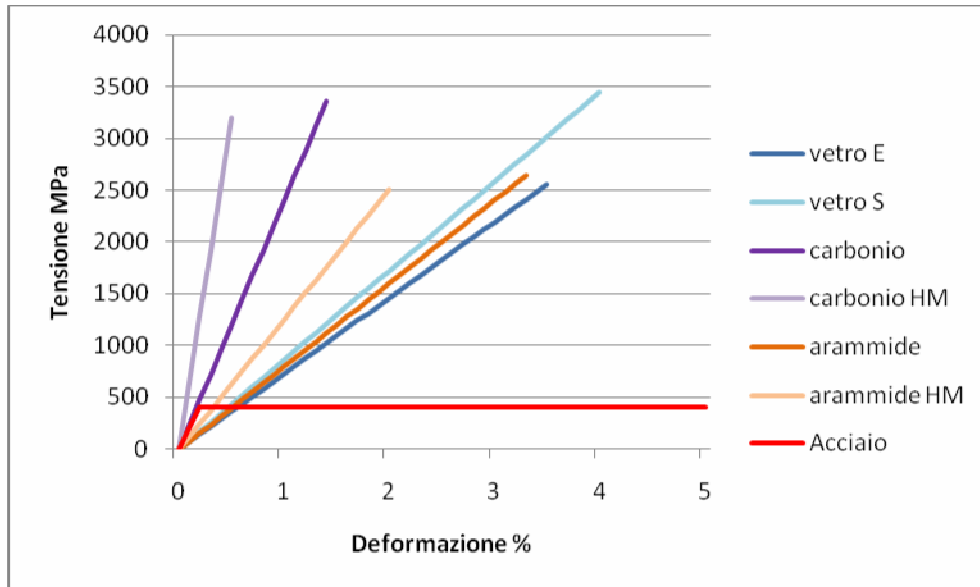
Le fibre arammidiche (o aramidiche) sono fibre di natura organica.

Introdotte per la prima volta nel 1971, esse si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alle operazioni di manipolazione. Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e quelli delle fibre di carbonio. La loro resistenza a compressione è di norma pari a circa 1/8 di quella a trazione: infatti, a causa dell'anisotropia della struttura della fibra, i carichi di compressione favoriscono lo snervamento localizzato con conseguente instabilità e formazione di piegature (*kinks*). Le fibre arammidiche possono degradarsi per esposizione prolungata alla luce solare, con perdita della resistenza a trazione fino al 50%. Inoltre possono risultare sensibili all'umidità. Il comportamento viscoso (*creep*) è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime la resistenza a rottura è molto più elevata. Anche la resistenza a fatica flessionale è più elevata di quella delle fibre vetro. Gli FRP a base di fibre arammidiche prendono il nome di AFRP.

Le proprietà meccaniche dei 3 tipi di fibre sono riportate nella seguente tabella, alla quale, per confronto, è stato aggiunto l'acciaio da costruzione:

Tipo fibra	Densità	Resistenza a trazione	Modulo elastico	Allungamento a rottura	Assorbimento umidità
	g/cm ³	MPa	GPa	%	%
Vetro E	2,58	2000	73	3,5	0,5
Vetro S	2,58	3500	86	4	0,3
Carbonio	1,78	3400	240	1,4	0,1
Carbonio HM	1,83	1900	640	0,5	0,1
Aramide	1,44	2800	80	3,3	4,5
Aramide HM	1,45	2800	125	2	2,5
Acciaio	7,85	300	200	25	-

I legami costitutivi delle fibre e dell'acciaio sono rappresentati nel seguente grafico:



2.3 SISTEMI DI APPLICAZIONE DEI COMPOSITI

I rinforzi sono generalmente costituiti da fogli di fibre unidirezionali o multi direzionali o da tessuti che vengono forniti allo stato secco e impregnati in situ con la resina, la quale ha funzione anche di adesivo con il substrato sottostante. In altri casi si utilizzano lamine piatte realizzate mediante pultrusione.

Laminazione manuale in situ

- a) **Valutazione preventiva del substrato:** prima di effettuare il rinforzo mediante incollaggio esterno, è necessario verificare le condizioni della superficie del substrato, al fine di accertarne l'idoneità ad essere esternamente rinforzato con nastri o lamine in FRP ed in particolare la possibilità di trasferimento delle tensioni mediante un'efficace aderenza all'interfaccia resina-substrato. Questo aspetto è di fondamentale importanza nelle applicazioni "per aderenza", come i rinforzi a flessione e a taglio, mentre è meno

importante nelle applicazioni “per contatto”, come nel caso di colonne prevalentemente compresse confinate con nastri in FRP.

- b) Preparazione della superficie:** nelle applicazioni per aderenza la superficie esterna dell'elemento strutturale va adeguatamente preparata, in modo da assicurare la perfetta adesione del materiale composito. In particolare bisogna fare attenzione ad eventuali porzioni di materiale danneggiato o scadente, che vanno rimosse e sostituite con malta od altri materiali idonei; eventuali fessure e vuoti di dimensioni rilevanti vanno opportunamente riempiti con resina epossidica. Se la superficie presenta asperità superiori a 10 mm è opportuno eseguire un livellamento con stucco epossidico (putty) compatibile, che deve essere applicato a non più di 48 ore dall'applicazione del primer. Successivamente la superficie sulla quale andrà applicato il materiale composito deve essere trattata con sabbiatura, spazzolatura o altri trattamenti tali da renderla pulita e ruvida. Infine è necessario lasciarla asciugare bene. La superficie finale deve essere sufficientemente liscia, in modo tale che lo strato di collante risulti uniforme. Generalmente è necessario applicare un primer per migliorare le proprietà meccaniche dello strato superficiale e facilitare l'aderenza degli strati successivi.
- c) Applicazione di resina e rinforzo:** la resina di impregnazione va preparata attraverso la miscelazione di tutti i suoi componenti nelle giuste quantità e poi applicata in modo uniforme sulla superficie da rinforzare. Quando si usano le resine bicomponenti si versa il componente B (indurente) nel recipiente del componente A (prepolimero). Poi sullo strato di resina si posiziona il rinforzo in FRP, curando l'allineamento delle fibre. Mediante rullatura si provoca la penetrazione della resina tra le fibre, eliminando l'aria intrappolata. Successivamente si applica un altro strato di resina e si rulla ulteriormente per completare l'impregnazione e per fare in modo che le fibre siano ben protette dalla resina. Per resine

epossidiche le resistenze finali si ottengono dopo circa 15 giorni, ma già dopo circa 7 giorni a 20°C raggiungono valori pari al 60-70% di quelli finali.

2.4 MECCANISMI DI CRISI DEI MATERIALI COMPOSITI

Trazione parallela alle fibre

La crisi può avere inizio con la rottura di singole fibre nella loro sezione più debole. Ciò può avvenire anche a partire da tensioni molto inferiori a quelle di crisi, a causa della presenza di difetti. Infatti già dall'inizio della vita del composito sono normalmente presenti interruzioni di alcune fibre, ed altre si possono rompere a causa di tensioni localizzate dopo che il composito stesso è stato applicato. Inoltre nella matrice può esserci della porosità dovuta sia a bolle d'aria rimaste dall'impregnazione, sia ai gas che si sviluppano durante la polimerizzazione della resina. Vi possono essere anche fratture nella resina causate dal ritiro che si verifica durante la polimerizzazione e da tensioni di origine termica.

Il fenomeno della crisi riguarda inizialmente una piccola parte di fibre; contemporaneamente la resina, lavorando a taglio, trasmette lo sforzo alle fibre adiacenti. In questo modo anche le fibre rotte possono contribuire alla resistenza dell'FRP per quasi tutta la loro lunghezza, consentendo al composito di mantenere intatte le proprietà meccaniche.

La crisi si verifica quando il fenomeno si propaga in maniera instabile con 2 possibili modalità:

- *Propagazione in direzione trasversale*: la resina che unisce le 2 estremità di una fibra rotta subisce una crisi localizzata e la frattura giunge alle fibre adiacenti, provocando in esse un incremento localizzato di tensione che ne provoca la rottura. Questa modalità di crisi si verifica di solito in FRP con piccole frazioni volumetriche di fibra.
- *Propagazione in direzione longitudinale*: è una crisi provocata dall'insorgere di tensioni tangenziali all'interfaccia tra fibra e

resina (*taglio intralaminare*) oppure nella resina stessa. Questa modalità di crisi si riscontra in FRP con elevate frazioni volumetriche di fibra e nel caso in cui le fibre siano distribuite, durante l'impregnazione, in modo non uniforme.

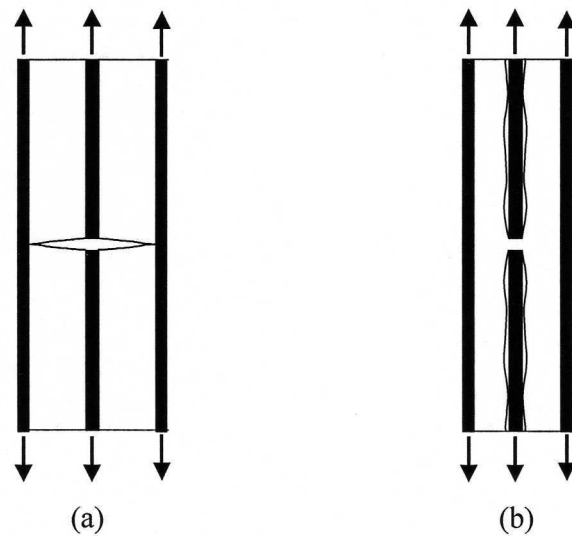


Fig. 10: meccanismi di crisi in un composito unidirezionale a fibre continue;
 (a) propagazione trasversale, (b) propagazione longitudinale.

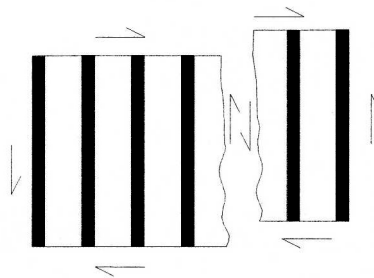


Fig. 11: crisi per taglio nel piano: *taglio intralaminare*

Spesso si verificano inizialmente rotture normali alle fibre nella matrice. Successivamente si verifica la frattura intralaminare, dapprima in zone limitate e in seguito in modo più diffuso, fino all'instabilità del fenomeno con conseguente collasso del composito. Le fasi precedenti il collasso non danno luogo ad un sensibile scostamento dalla linearità del

legame tensione-deformazione, e la crisi si manifesta in modo improvviso, da cui la scarsa duttilità tipica dei materiali compositi.

Se il composito è sollecitato a trazione ortogonalmente alle fibre, la crisi avviene per il raggiungimento della tensione ultima di trazione della matrice, a valori molto minori (anche di due ordini di grandezza) della trazione ultima in direzione longitudinale alle fibre, vista la minore resistenza della resina rispetto alle fibre.

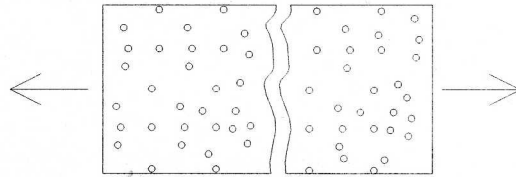


Fig. 12: crisi del composito unidirezionale per trazione ortogonale alla fibre

Compressione

Nei compositi unidirezionali sollecitati a compressione nella direzione delle fibre, la crisi può avvenire per compressione longitudinale con distacchi tra fibre e matrice, oppure per instabilità delle fibre a causa della loro elevata snellezza, che solo in parte la matrice può contrastare. In ogni caso la resistenza a compressione del composito è molto inferiore rispetto a quella a trazione.

Per compressione ortogonale alle fibre la crisi avviene per raggiungimento del valore di resistenza a compressione della matrice, con la formazione di superfici di scorrimento inclinate.

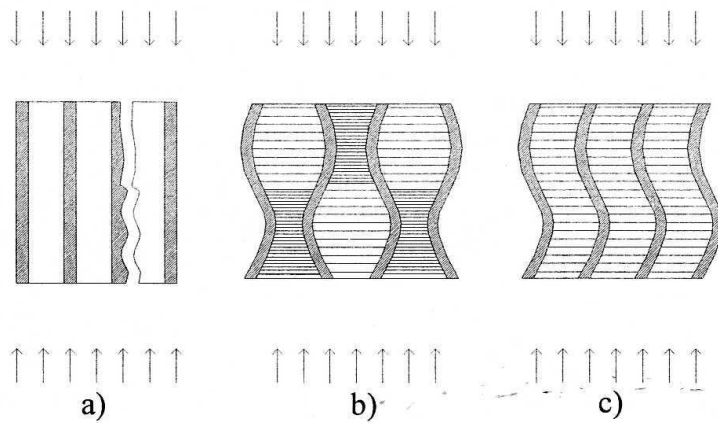


Fig. 13: Meccanismi di crisi di un composito unidirezionale per compressione parallela alle fibre; (a) distacco tra fibra e matrice, (b)(c) instabilità per snellezza delle fibre

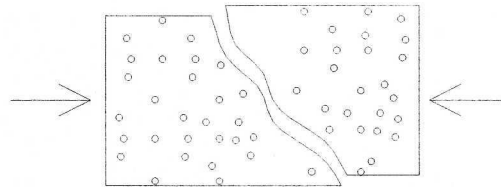


Fig. 14: crisi per compressione ortogonale alle fibre

2.5 LE TENSIONI DI ROTTURA

I tipi di fibre di più comune impiego nei materiali compositi a matrice polimerica presentano un comportamento elastico lineare fino alla rottura. Anche il comportamento della matrice è quasi lineare. Di conseguenza il composito ha anch'esso un comportamento lineare fino alla crisi, che quindi avviene in modo fragile.

Consideriamo le seguenti grandezze:

f_l	resistenza a trazione del composito nella direzione delle fibre
f_f	resistenza a trazione delle fibre
f_m	resistenza a trazione della matrice
ϵ_{fu}	deformazione ultima delle fibre
ϵ_{mu}	deformazione ultima della matrice

$\sigma_m(\varepsilon_{fu})$ tensione nella matrice quando le fibre raggiungono la loro deformazione ultima e vanno in crisi (se $\varepsilon_{mu} > \varepsilon_{fu}$).

Si possono presentare tre casi:

- 1) $\varepsilon_{mu} > \varepsilon_{fu}$
- 2) $\varepsilon_{mu} = \varepsilon_{fu}$
- 3) $\varepsilon_{mu} < \varepsilon_{fu}$

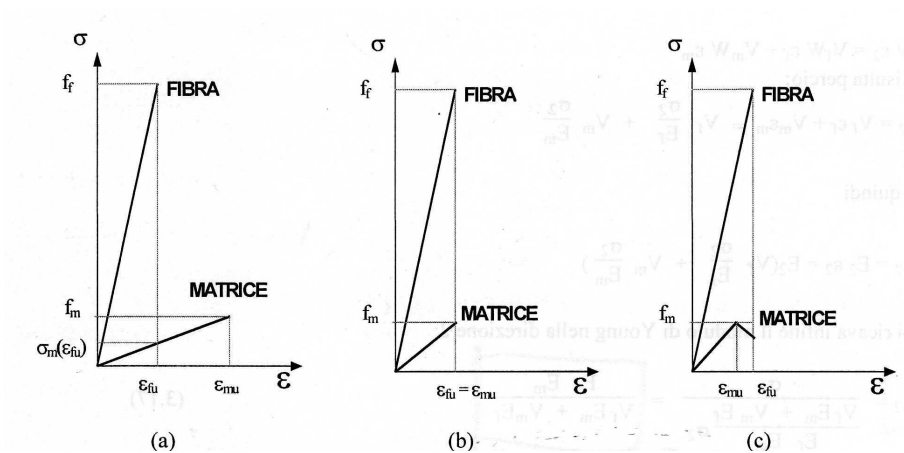


Fig. 15: legami costitutivi delle fibre e della matrice

La resistenza f_1 del composito nella direzione delle fibre è il valore della tensione σ_1 che provoca la rottura delle fibre. Quindi il valore f_1 viene raggiunto quando la tensione nelle fibre vale f_f . Con riferimento ai tre casi il valore può essere così esplicitato:

- 1) $\varepsilon_{mu} > \varepsilon_{fu}$

Al momento della rottura delle fibre (ε_{fu}) la matrice non ha ancora raggiunto la sua deformazione ultima (ε_{mu}) e quindi fornisce ancora completamente il suo contributo alla resistenza del composito. Questo comportamento vale normalmente per i CFRP, in quanto le fibre di carbonio presentano valori molto bassi di deformazione ultima. Il valore della resistenza ultima del composito è quindi dato da:

$$f_1 = f_f V_f + \sigma_m(\varepsilon_{fu}) V_m$$

$$2) \quad \varepsilon_{mu} = \varepsilon_{fu}$$

Al momento della rottura delle fibre la matrice ha raggiunto la sua deformazione ultima. La tensione nella matrice è quindi pari al valore ultimo di resistenza f_m . La resistenza ultima del composito vale quindi:

$$f_1 = f_f V_f + f_m V_m$$

$$3) \quad \varepsilon_{mu} < \varepsilon_{fu}$$

Al momento della rottura delle fibre la matrice ha superato la sua deformazione ultima. Il suo contributo alla resistenza del composito non si annulla in quanto la matrice, anche se fessurata, continua a svolgere un ruolo di collegamento tra le fibre e di trasmissione degli sforzi caratterizzata da un ramo discendente di softening. Questo comportamento è tipico dei GFRP, poichè le fibre di vetro hanno un elevato valore di deformazione ultima. In questo caso la resistenza del composito sarà intermedia ai valori:

$$f_f V_f < f_1 < f_f V_f + f_m V_m$$

E' importante notare che nella progettazione dei rinforzi strutturali in FRP è consuetudine, per determinare il valore della resistenza f_1 del composito e il suo modulo elastico, assumere come contributo resistente del rinforzo solo quello della fibra, trascurando quello della matrice, commettendo un errore di approssimazione inferiore all'1%.

2.6 LA DELAMINAZIONE

Nel rinforzo di elementi inflessi mediante lamine o tessuti di materiale composito, il ruolo dell'aderenza tra supporto e composito assume grande importanza in quanto il meccanismo di rottura per delaminazione (perdita di aderenza) è di tipo fragile. Nello spirito del criterio di gerarchia delle resistenze tale meccanismo di crisi non deve precedere il collasso per flessione o per taglio dell'elemento rinforzato.

I modi di collasso per delaminazione di lamine o tessuti utilizzati per il rinforzo a flessione possono essere classificati nelle seguenti quattro categorie:

- Modalità 1 (Delaminazione di estremità);
- Modalità 2 (Delaminazione intermedia, causata da fessure per flessione nella trave);
- Modalità 3 (Delaminazione causata da fessure diagonali da taglio);
- Modalità 4 (Delaminazione causata da irregolarità e rugosità della superficie del substrato).

La modalità che qui più interessa è la modalità 1: le zone terminali del rinforzo, chiamate ad assolvere ad una funzione di ancoraggio di quest'ultimo, sono soggette ad elevate tensioni tangenziali di interfaccia per una lunghezza di circa 100÷200 mm. Inoltre, nel caso di rinforzo con lamine, la competente rigidità flessionale può indurre anche significative tensioni di trazione in direzione normale all'interfaccia (tensioni di *peeling*). Queste ultime possono ridurre sensibilmente il valore dell'azione tangenziale trasmissibile. La modalità di collasso per delaminazione alle estremità del rinforzo è particolarmente fragile.

Con riferimento ad una delaminazione che coinvolga i primi strati del materiale da rinforzare e per lunghezze di ancoraggio maggiori o uguali a quella ottimale, la tensione di progetto del rinforzo, f_{dd} , ovvero il valore della massima tensione alla quale il rinforzo può lavorare nella sezione terminale di ancoraggio - una volta avvenuto il trasferimento degli sforzi dal substrato al rinforzo di FRP - vale:

$$f_{dd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_m}} \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma}{t_f}}$$

con: $\gamma_{f,d}$ coefficiente parziale come indicato in Tabella 3-2 nelle istruzioni CNR-DT 200/2004

γ_m coefficiente parziale che dipende dal materiale da rinforzare

E_f modulo elastico delle fibre

t_f spessore delle fibre

Γ energia specifica di frattura del materiale da rinforzare

3. IL MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI

3.1 DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO

La volta studiata appartiene alla navata centrale della chiesa di Santa Maria delle Grazie nel territorio del comune di Monte Cerignone (PU), che oggi si trova in stato di abbandono e a rischio di crollo. La camorcanna, come è possibile vedere dalle parti non crollate e dai frammenti caduti a terra, è sorretta da centine formate da due tavole affiancate sfalsate e collegate da chiodi. Le tavole sono lunghe circa 120 cm, alte 14 cm e spesse 2,5 cm l'una; inoltre sono tagliate in modo da avere una certa curvatura, permettendo così di usarne un numero limitato. Le centine hanno un interasse di circa 50 cm. Le estremità sono collegate alle murature delle pareti laterali ad un'altezza di circa 7,60 m dal piano del pavimento, nel punto dove la parete si restringe; in questo modo l'intradosso della volta si trova precisamente a filo della parete. Perpendicolari alle centine vi sono i tambocchi: questi sono realizzati con tavole più piccole rispetto a quelle delle centine, alle quali sono fissati con chiodi battuti in obliquo (metodo detto "alla traditora"); hanno un interasse di circa 100 cm. Al di sotto dei tambocchi è posizionato lo stuoiato, come è possibile vedere nella parte di camorcanna non crollata, che è stato poi intonacato e decorato con stucchi. Dalle macerie all'interno della chiesa e dall'esame visivo della volta superstite è possibile determinare il tipo di cannucciato: è composto da canne di piccolo diametro (circa 1 cm di diametro) accostate tutte tra loro e legate con giunchi flessibili, ordite perpendicolarmente alle centine e quindi secondo il lato longitudinale della navata.

La volta ha un diametro di circa 8 m ed un profilo quasi semi-circolare.

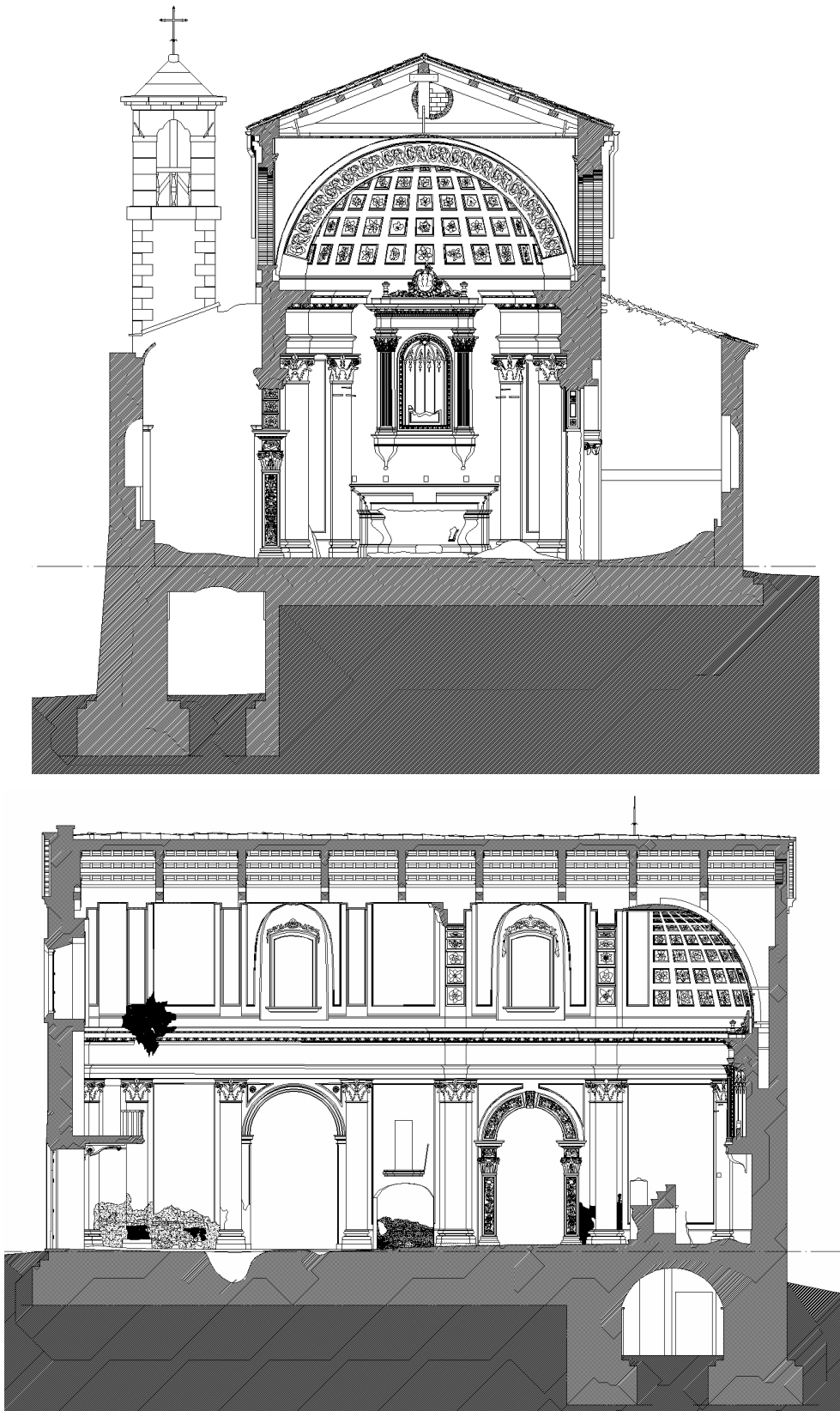


Fig. 16: sezioni trasversale e longitudinale



Fig. 17: Vista delle centine della camorcanna crollata e stuoiato di canne

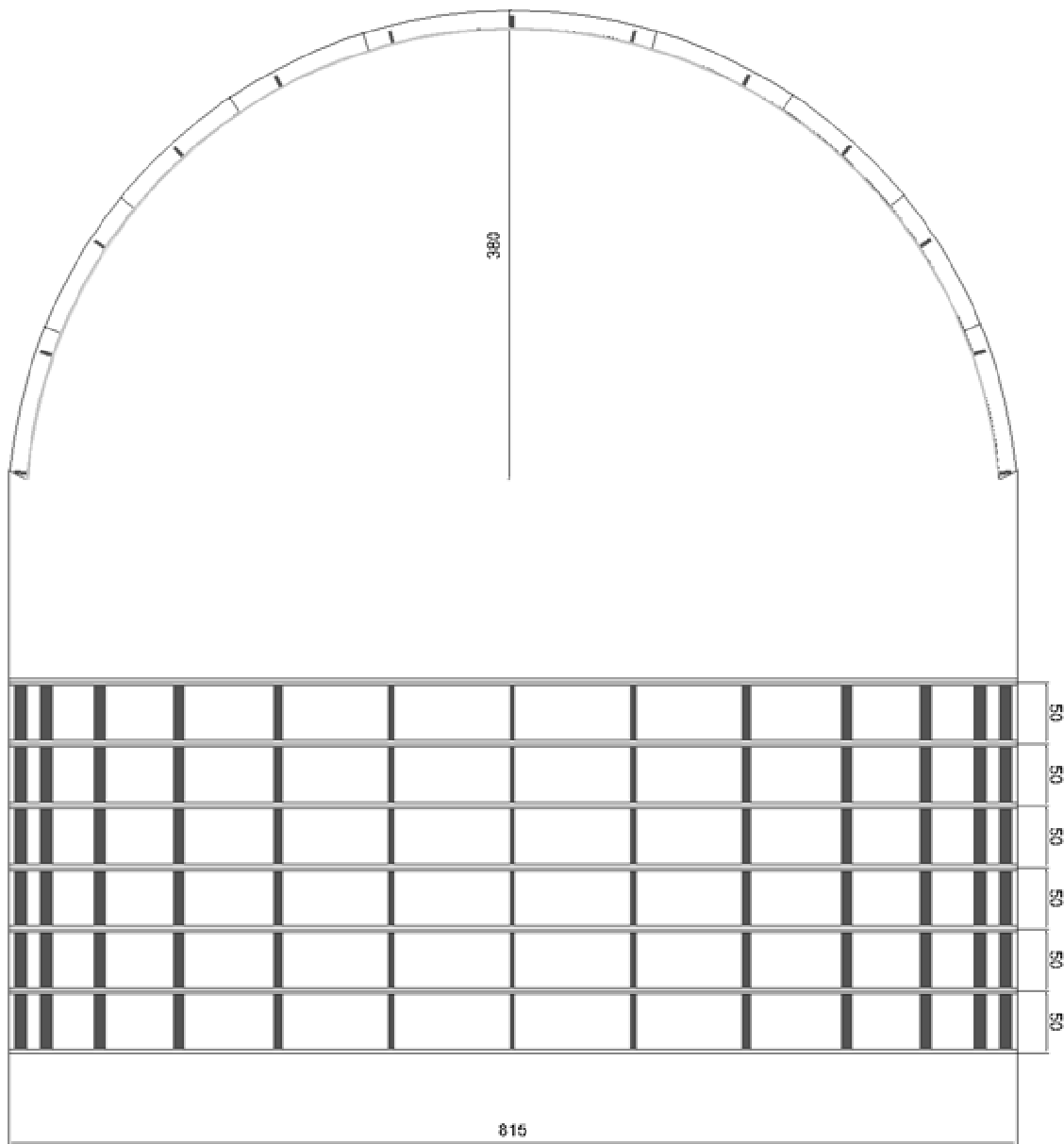


Fig. 18: Sezione trasversale della volta in camorcanna e prospetto dall'alto

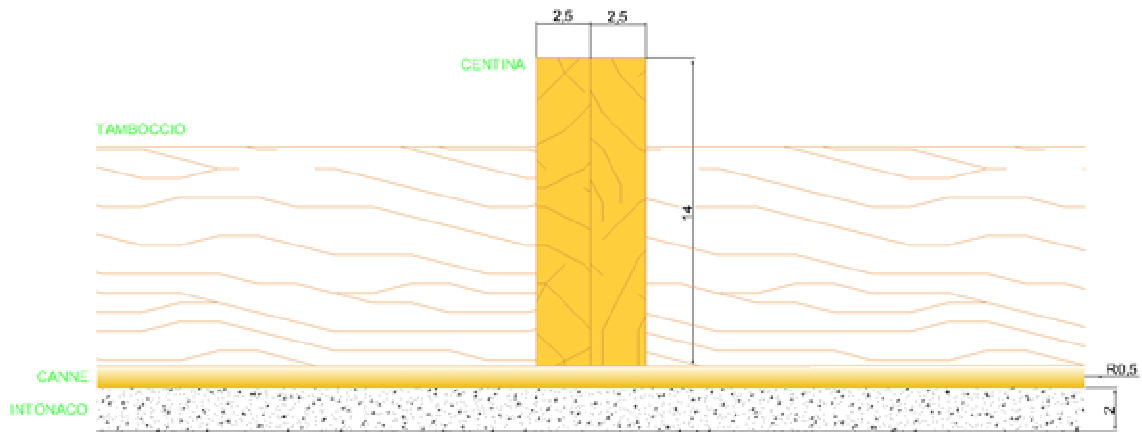


Fig. 19: sezione della centina

3.2 PROPRIETÀ MECCANICHE DEI MATERIALI

Centine e tambocchi

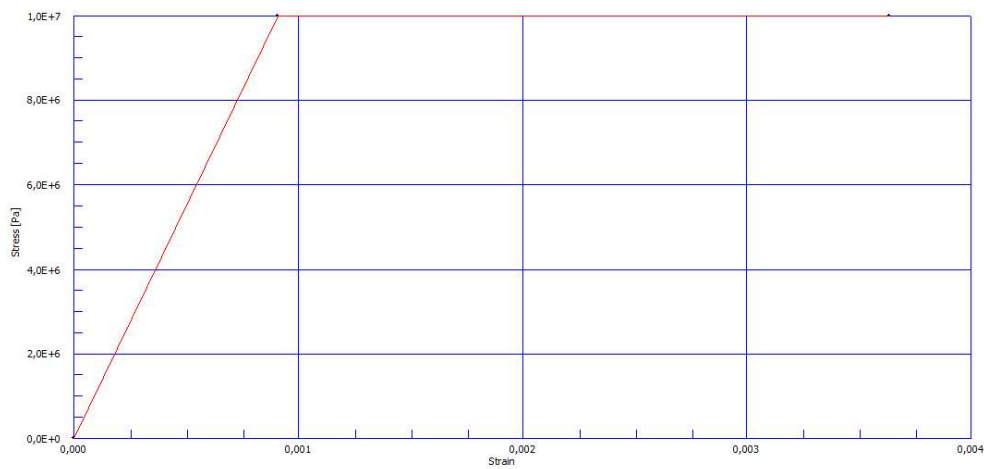
Legno d'abete:

$$E_1 = \text{modulo elastico legno} = 1,1 \cdot 10^4 \text{ MPa}$$

$$\nu_1 = \text{coefficiente di Poisson legno} = 0,3$$

$$\gamma_1 = \text{peso specifico legno} = 0,0006 \text{ Kg/cm}^3$$

Si è considerato un comportamento elasto-plastico con una tensione al limite elastico di 10 MPa.



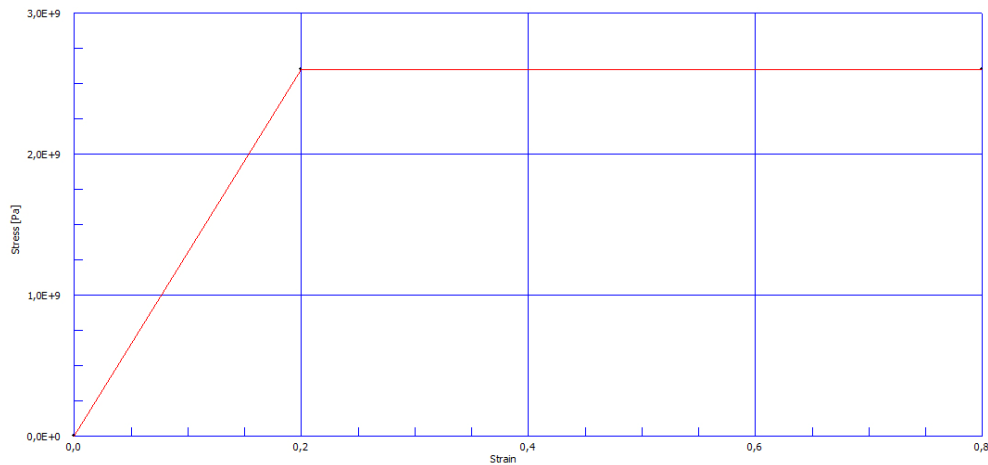
Canne

$$E_{ca} = \text{modulo elastico canne} = 1,3 \cdot 10^4 \text{ MPa}$$

$$\nu_{ca} = \text{coefficiente di Poisson canne} = 0,43$$

$$\gamma_{ca} = \text{peso specifico canne} = 0,0006 \text{ Kg/cm}^3$$

Dal seguente legame costitutivo si può vedere il comportamento elasto-perfettamente plastico assegnato al materiale:



Intonaco

$$E_i = \text{modulo elastico intonaco} = 1,3 \cdot 10^4 \text{ MPa}$$

$$\nu_i = \text{coefficiente di Poisson intonaco} = 0,19$$

$$\gamma_i = \text{peso specifico intonaco} = 0,0016 \text{ Kg/cm}^3$$

Anche il comportamento dell'intonaco è stato considerato elasto-plastico, con un criterio di rottura alla Mohr-Coulomb. Considerando quindi valori di resistenza a rottura a compressione di 5 MPa e a trazione di 0,4 MPa, sono stati ricavati i seguenti parametri:

$$\varphi = \text{angolo di attrito interno} = \sin^{-1} \left(\frac{f_c - f_t}{f_c + f_t} \right) = 58,4^\circ$$

$$c = \text{coesione} = \frac{\sqrt{f_c \cdot f_t}}{2} = 0,7071 \text{ MPa}$$

Pad deformabile

Si è considerato un comportamento isotropo.

$$E_p = \text{modulo elastico pad} = 50 \text{ MPa}$$

$$G_p = \text{modulo elastico tangenziale pad} = 17 \text{ MPa}$$

$$\nu_p = \text{coefficiente di Poisson pad} = 0,49$$

$$\gamma_p = \text{peso specifico pad} = 0 \text{ Kg/cm}^3$$

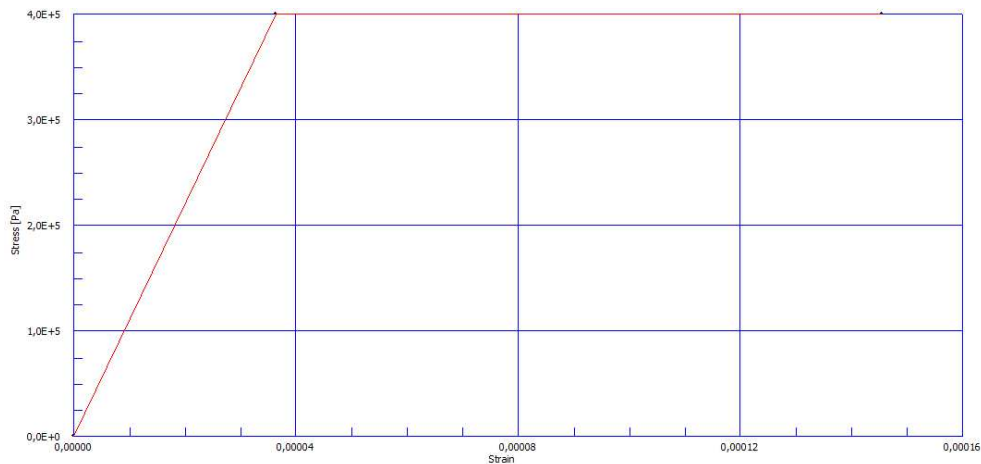
Chiodatura centine-canne

Si è considerato il chiodo come elemento di sezione 5x5 cm con le stesse proprietà del legno ma con massa nulla e con comportamento elastico fino al valore di resistenza a trazione del legno in direzione perpendicolare alle fibre (0,4 MPa), poi perfettamente plastico. La forza necessaria per lo sfilamento del chiodo è di conseguenza pari a 100 kg.

$$E_c = \text{modulo elastico chiodatura} = 1,1 * 10^4 \text{ MPa}$$

$$\nu_c = \text{coefficiente di Poisson chiodatura} = 0,3$$

$$\gamma_c = \text{peso specifico chiodatura} = 0 \text{ Kg/cm}^3$$



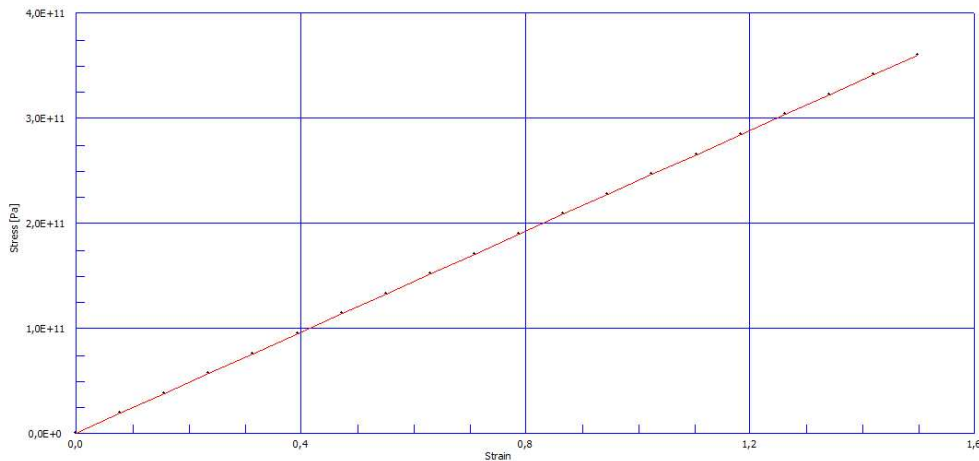
FRP

Il composito considerato nel modello è formato da fibre di carbonio e resina epossidica, per uno spessore di fibra di 0,22 mm.

$$E_f = \text{modulo elastico FRP} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$\nu_f = \text{coefficiente di Poisson FRP} = 0$$

$$\gamma_f = \text{peso specifico FRP} = 0,00178 \text{ Kg/cm}^3$$



3.3 CREAZIONE DEL MODELLO

Il modello agli elementi finiti della volta è stato creato con il programma di calcolo Straus7 della G+D Computing.

Si è cercato di riprodurre con il maggior dettaglio possibile la volta del caso di studio, con tutti gli elementi che la compongono e le relative dimensioni. La forma è stata approssimata ad una semi-circonferenza con un raggio di 4 m.

Vista la notevole complessità del modello e l'elevato numero di nodi di cui è composto si è deciso, per evitare tempi di calcolo eccessivi, di considerare un'estensione longitudinale della volta di 2 m. Così facendo si ottengono risultati soddisfacenti per quanto riguarda le sollecitazioni trasversali allo sviluppo longitudinale della volta, cioè nel piano dell'arco,

ma non veritiere per le sollecitazioni esterne dirette secondo l'asse della volta stessa e che, quindi, non sono state studiate.

Il sistema di riferimento utilizzato presenta gli assi X e Y giacenti nel piano dell'arco e in direzione rispettivamente orizzontale e verticale, e l'asse Z diretto secondo la direzione longitudinale di sviluppo della volta.

La volta è stata considerata vincolata alla base, in corrispondenza delle murature laterali: alle centine sono state impedito le traslazioni DX, DY, DZ e consentite le rotazioni, in quanto sono ammorsate per pochi centimetri nella muratura laterale e presentano quindi un basso grado di resistenza alle rotazioni; allo strato d'intonaco sono stati impedito le traslazioni trasversali e verticali, cioè DX e DY , lasciandolo libero di "distendersi" lungo la direzione longitudinale z poiché questo movimento è contrastato solamente dall'attrito tra l'intonaco e la muratura su cui è semplicemente appoggiato.

3.3.1 Volta originale

Centine

Le centine sono state modellate come elementi beam, cioè elementi monodimensionali con comportamento a trave, con sezione pari alle 2 tavole affiancate e lunghezza di circa 5 cm, questo per far sì che le dimensioni degli elementi fossero tra loro confrontabili, senza cioè che una dimensione fosse molto maggiore delle altre con conseguente perdita di accuratezza in fase di calcolo.

La connessione chiodata tra le centine, che si presenta a metà di ogni singola tavola in quanto, ricordiamo, composte da due tavole affiancate sfalsate, è stata considerata come una connessione rigida. Quindi non sono state inserite cerniere, ma in corrispondenza delle chiodature si è considerato uno spessore della beam ridotto, pari ad una singola tavola, cioè 2,5 cm invece di 5 cm.

Tambocci

I tambocci sono elementi trasversali alle centine, servono come controventamenti per evitare lo sbandamento delle centine fuori piano e per fornire una superficie maggiore per l'aggancio del sottostante stuoiato di canne. Sono fissati alle centine con chiodi, solitamente uno solo, infissi in obliquo. Di conseguenza la rigidità rotazionale di questo collegamento è molto bassa e per questo i tambocci sono stati modellati come elementi truss, cioè delle beam con cerniere alle estremità dove sono quindi lasciate libere le rotazioni. La sezione assegnata agli elementi è di 2,5 cm x 10 cm.

Canne

Lo strato delle canne presenta comportamenti diversi nelle 2 direzioni: uno nella direzione delle canne, un altro in quella ad essa ortogonale. Ha quindi un comportamento ortotropo. Si è deciso però di trascurare la resistenza nella direzione trasversale fornita dalla legatura con giunchi flessibili. Le canne sono state quindi modellate con beam di sezione quadrata 2,65 cm x 2,65 cm, ottenuta ripartendo, in un unico elemento, l'area di canne tra 2 chiodature successive che collegano le canne stesse alle centine, pari ad una distanza di 14 cm.

Chiodatura centine-canne

La chiodatura tra le canne e le centine deve consentire un certo movimento alle canne, in quanto le canne non vengono perfettamente bloccate contro la soprastante centina e riescono quindi a ruotare e a distendersi parzialmente in corrispondenza della chiodatura. Per questo motivo, invece di collegare direttamente le beam delle canne alle beam delle centine con un nodo comune ad entrambe, la chiodatura è stata rappresentata mediante una ulteriore beam a collegare i nodi delle centine e delle sottostanti canne, con l'estremità in corrispondenza delle canne lasciata libera di ruotare attorno ai 3 assi.

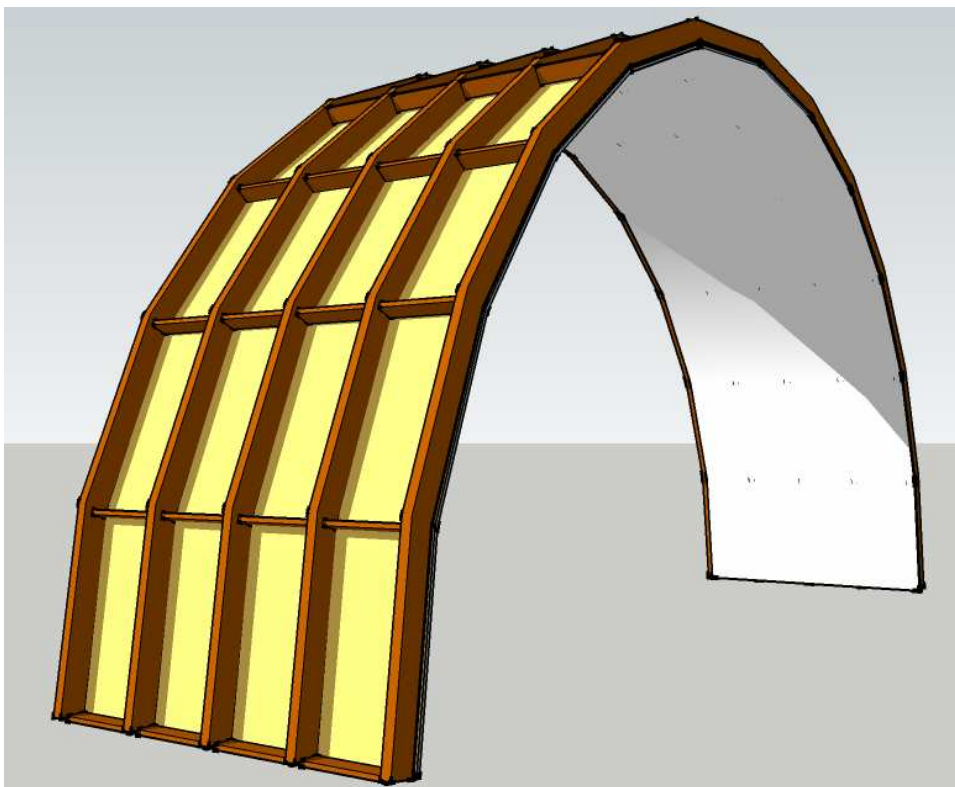
Intonaco

Lo strato di intonaco è stato modellato con elementi plate di dimensioni 5 cm x 7 cm e uno spessore di 2 cm. Il comportamento assegnato è di tipo membranale, trascurando così le componenti flessionali di sforzo, in virtù dell'esiguo spessore dello strato. I plates dell'intonaco non sono direttamente collegati alle beam delle soprastanti canne, ma tramite uno strato chiamato pad deformabile.

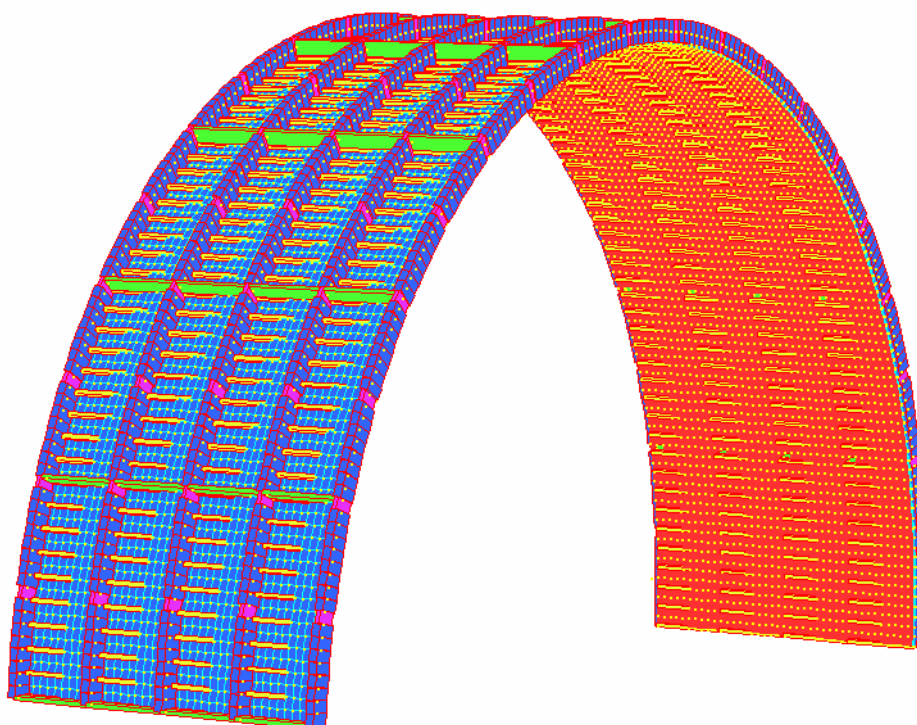
Pad deformabile

Tra le canne e l'intonaco è stato inserito uno strato di elementi brick a quattro nodi. Questo perchè durante le sollecitazioni le canne hanno la possibilità di distendersi nella direzione ad esse ortogonali e così, unitamente ai ponti di malta formati dal refluento dell'intonaco tra una canna all'altra, non trasmettono direttamente gli sforzi allo strato dell'intonaco, ma arrivano ad esso in modo smorzato. I valori utilizzati per la caratterizzazione meccanica degli elementi brick del pad deformabile sono stati ricavati da sperimentazioni effettuate dal prof. Enrico Quagliarini presso l'Università Politecnica delle Marche. La sperimentazione consisteva nel sottoporre a scorrimento un campione di intonaco e canne e misurare la relativa resistenza a taglio (Quagliarini-D'Orazio, *Recupero e conservazione di volte in camorcanna*, pag.149/ Quagliarini, *Il plafone del teatro dei Filarmonici di Ascoli Piceno*, pag.117).

Rappresentazione grafica della volta originale in 3 dimensioni:



Vista del modello realizzato per le analisi:



Model: camorcanna_canne05cm_orto_nuovo_piccola2

Bill of materials

Selected groups:

- Model
- Model\pad deformabile
- Model\canne
- Model\centine
- Model\chiodatura centine-canne
- Model\tambocci
- Model\intonaco

Included mass:

Structural Mass

	Mass kg	Volume cm ³	Length cm	Area cm ²	Count	Material	Type	Section
Grand total:	1,166250x10 ³	1,438722x10 ⁶	2,997806x10 ⁴	2,506959x10 ⁵				
Beam properties:								
1: centine	2,401660x10 ²	4,002766x10 ⁵	5,718237x10 ³		805		Beam	Solid Rectangle
2: chiodatura centine-canne	0,000000x10 ⁰	7,962500x10 ⁴	3,185000x10 ³		455		Beam	Solid Rectangle
3: tambocci	3,300000x10 ¹	5,500000x10 ⁴	2,200000x10 ³		44		Truss	Solid Rectangle
4: canne	7,668570x10 ¹	1,278095x10 ⁵	1,820000x10 ⁴		364		Beam	Solid Rectangle
6: chiodatura centine	1,417128x10 ¹	2,361880x10 ⁴	6,748230x10 ²		95		Beam	Solid Rectangle
Total	3,640229x10 ²	6,863299x10 ⁵	2,997806x10 ⁴		1763			
Plate properties:								
2: intonaco	8,022269x10 ²	5,013918x10 ⁵		2,506959x10 ⁵	7200	Isotropic	3D Membrane	
Total	8,022269x10 ²	5,013918x10 ⁵		2,506959x10 ⁵	7200			
Brick properties:								
1: pad deformabile	0,000000x10 ⁰	2,510005x10 ⁵			7200	Orthotropic		
Total	0,000000x10 ⁰	2,510005x10 ⁵			7200			

Straus7 Release 2.3.2 [Licenced to BuAaLoG7 (Im)]
 Model file: C:\Users\Fabio\Documents\Universita'\Testi specialistica\Modello in straus\prima prova\camorcanna_canne05cm_orto_nuovo_piccola2.st7
 4 giugno 2010 5:11:pm

Lista dei materiali usati nel modello e relativi pesi

3.3.2 Volte rinforzate

Sono state studiate 3 tipologie di volte rinforzate con FRP:

- volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine **R1**
- volta rinforzata con FRP a fasce sulle centine **R2**
- volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine e sulle centine **R3**

Per simulare le fasce di FRP tra le centine sono stati utilizzati elementi beam di larghezza 20 cm e spessore 0,22 mm collegati ai nodi del pad deformabile. Quest'ultimo, in presenza delle fasce di materiale composito rigidamente connesso ad esso, acquisterà maggiore rigidità in quanto il distendersi delle canne sarà impedito rispetto alla situazione originale. Quindi i valori utilizzati per il pad deformabile in questo caso diventano:

$$E_p = \text{modulo elastico pad} = 750 \text{ MPa}$$

$$G_p = \text{modulo elastico tangenziale pad} = 168 \text{ MPa}$$

$$\nu_p = \text{coefficiente di Poisson pad} = 0,49$$

Le strisce di FRP sono state disposte con un interasse di 50 cm, esattamente a metà tra 2 centine consecutive, ed estese per tutta la semi-circonferenza della volta.

Per quanto riguarda le strisce di FRP sulle centine non si sono utilizzati gli elementi beam come nel caso precedente, ma si è ricavata con la “regola delle miscele” (rule of mixtures) una sezione omogenea per la “nuova” centina formata da legno e materiale composito, ottenendo cioè un nuovo coefficiente elastico e una nuova area equivalente:

$$A_{\text{legno}} = 14 \times 5 = 70 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{FRP}} = 2(14,044 \times 0,044) + (5 \times 0,044) = 1,45 \text{ cm}^2$$

$$E_1 = \frac{E_l \cdot A_l}{(A_l + A_{\text{FRP}})} + \frac{E_{\text{FRP}} \cdot A_{\text{FRP}}}{(A_l + A_{\text{FRP}})} = \frac{11.000 \times 70}{(70 + 1,45)} + \frac{240.000 \times 1,45}{(70 + 1,45)} \cong 15000 \text{ MPa}$$

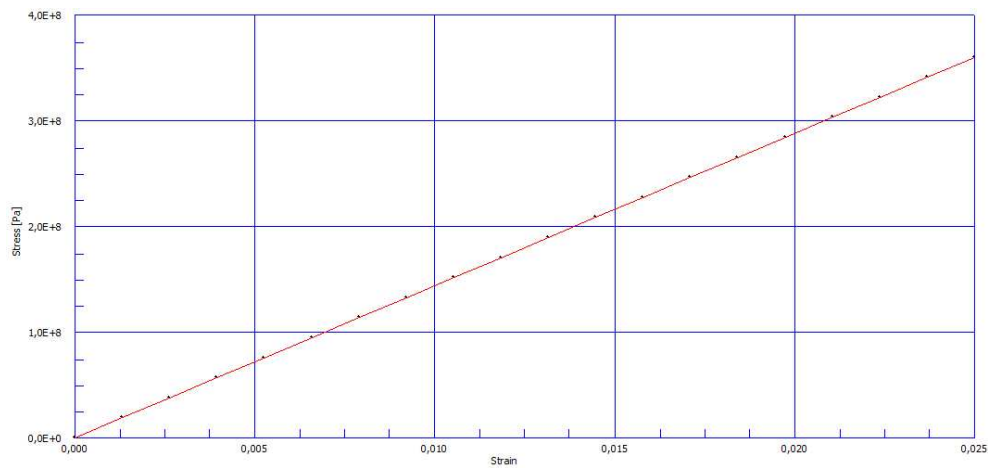
$$E_{\text{legno}} \cdot A_{\text{legno}} + E_{\text{FRP}} \cdot A_{\text{FRP}} = E_1 \cdot A_1 \rightarrow A_1 = 75 \text{ cm}^2$$

quindi la nuova sezione ha dimensioni 5 x 15 cm.

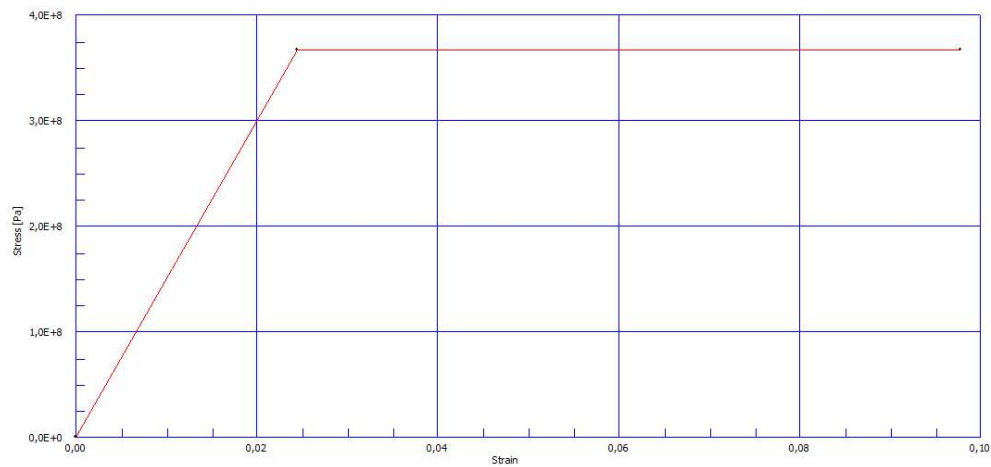
Di conseguenza cambia anche il legame costitutivo per la centina, che diventa di tipo elastico fino alla rottura per delaminazione che avviene ad una tensione pari a:

$$f_{fak} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma}{t_f}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 240 \cdot 10^3 \cdot 0,2}{0,22}} = 660 \text{ MPa}$$

$$f_{fad} = \frac{660}{1,5 \cdot 1,2} = 367 \text{ MPa}$$



In questo caso è stata irrigidita anche la connessione chiodata tra centina e stuoiato, modificandone il legame costitutivo:



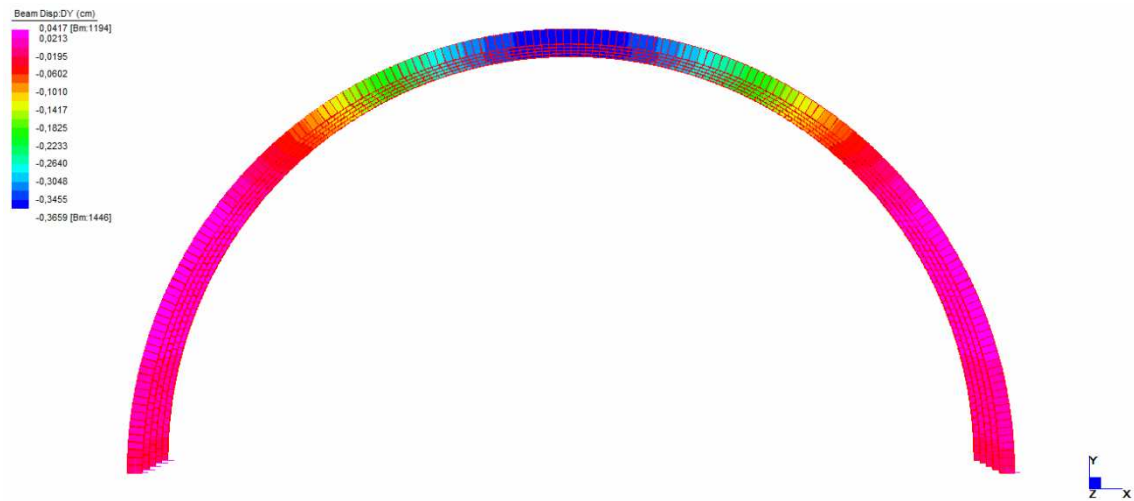
Inoltre in corrispondenza delle fasce sulle centine sono stati irrigiditi i brick del pad deformabile, utilizzando i valori prima riportati per il caso delle strisce di FRP tra le centine.

3.4 ANALISI STATICA LINEARE

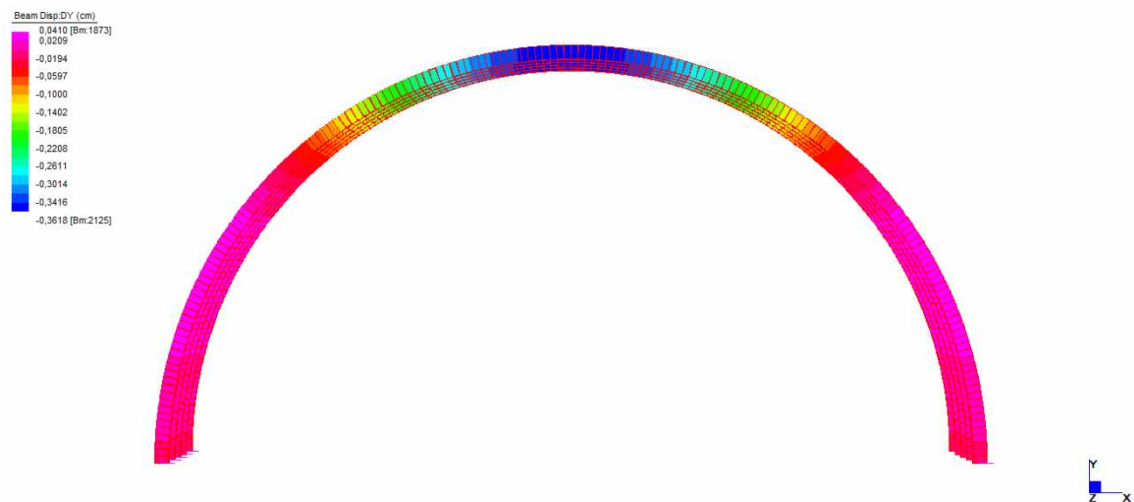
L'analisi statica lineare è stata condotta per valutare l'andamento delle tensioni e gli spostamenti con il solo peso proprio della struttura.

Abbassamento in mezzeria

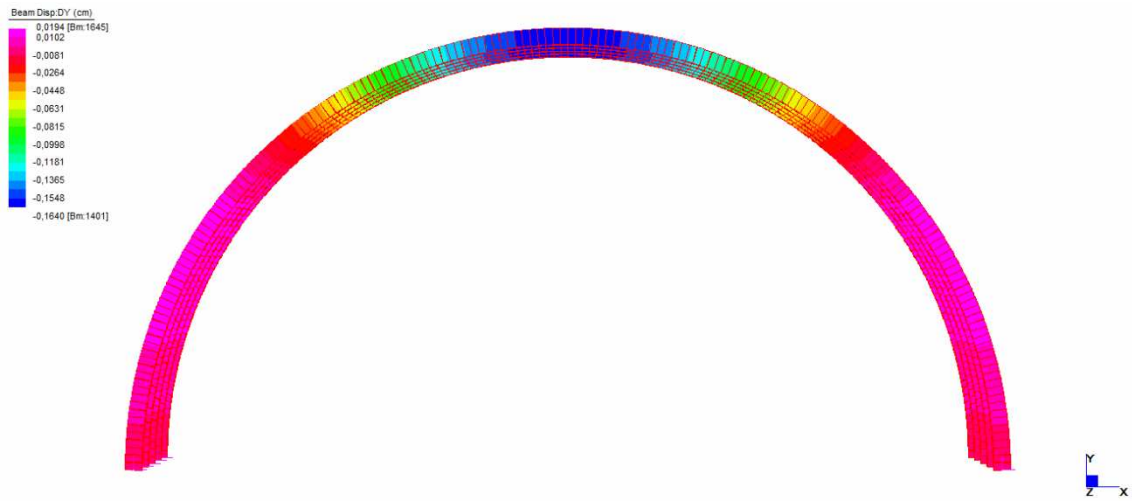
Volta originale



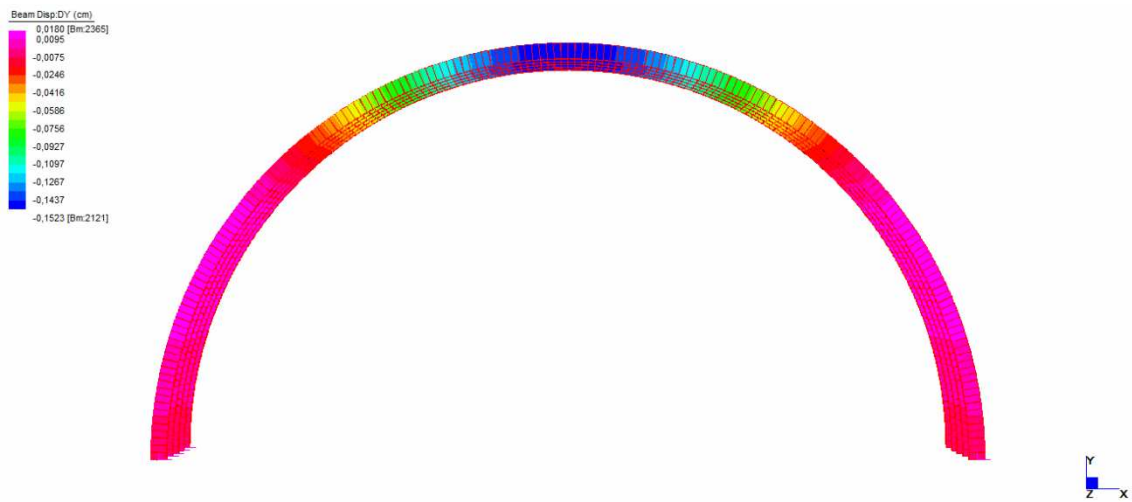
Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine



Volta rinforzata con FRP a fasce sulle centine



Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine e sulle centine

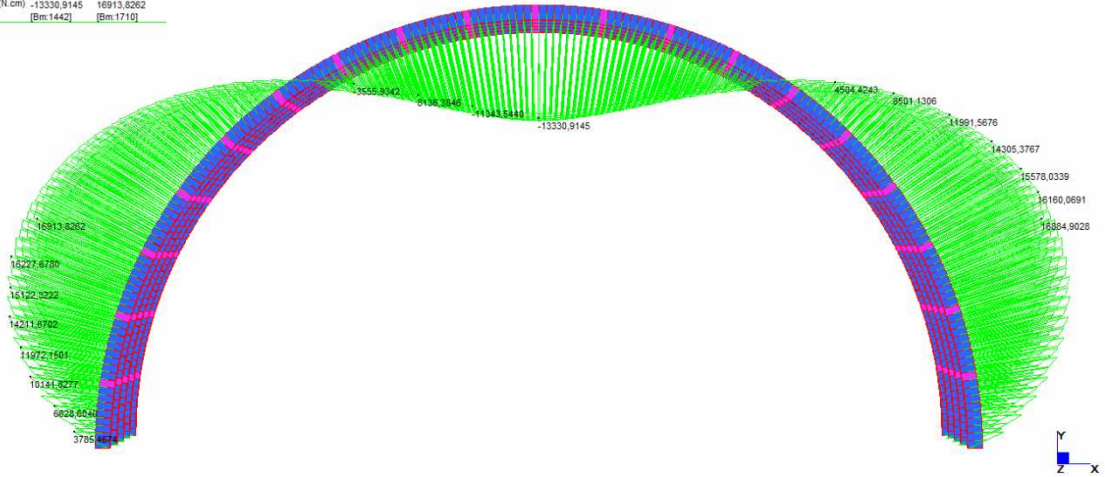


Tipo volta	Originale	FRP tra centine	FRP sulle centine	FRP tra e sopra le centine
Abbassamento	-0,37 cm	-0,36 cm	-0,16 cm	-0,15 cm

Momento flettente centine

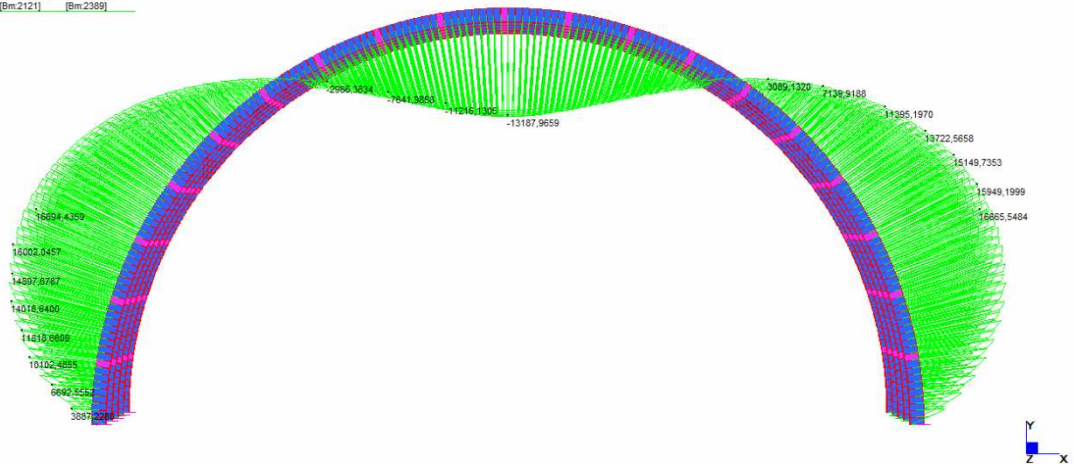
Volta originale

	MIN	MAX
BM2(N.cm)	-13330,9145	16913,6262
	[Bm.1442]	[Bm.1710]

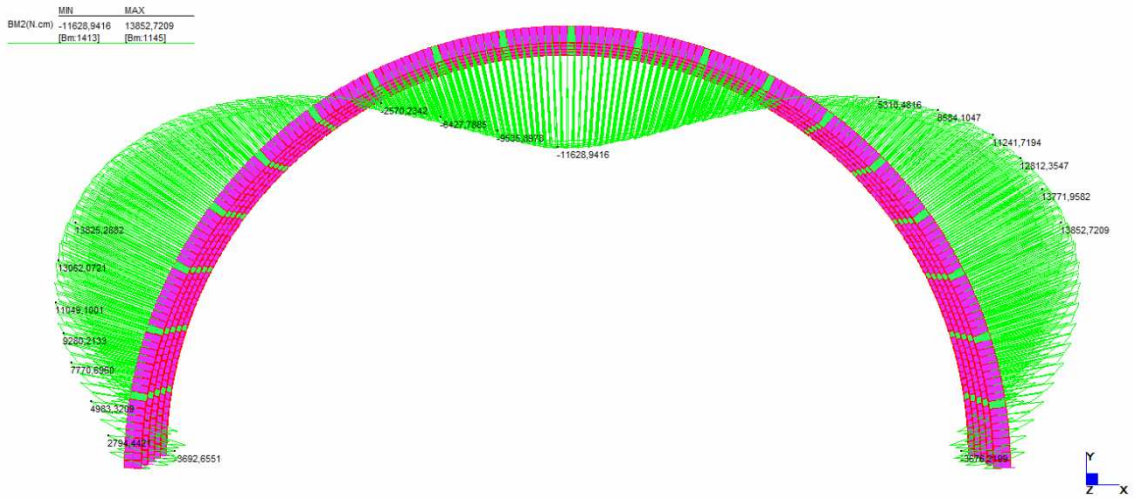


Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine

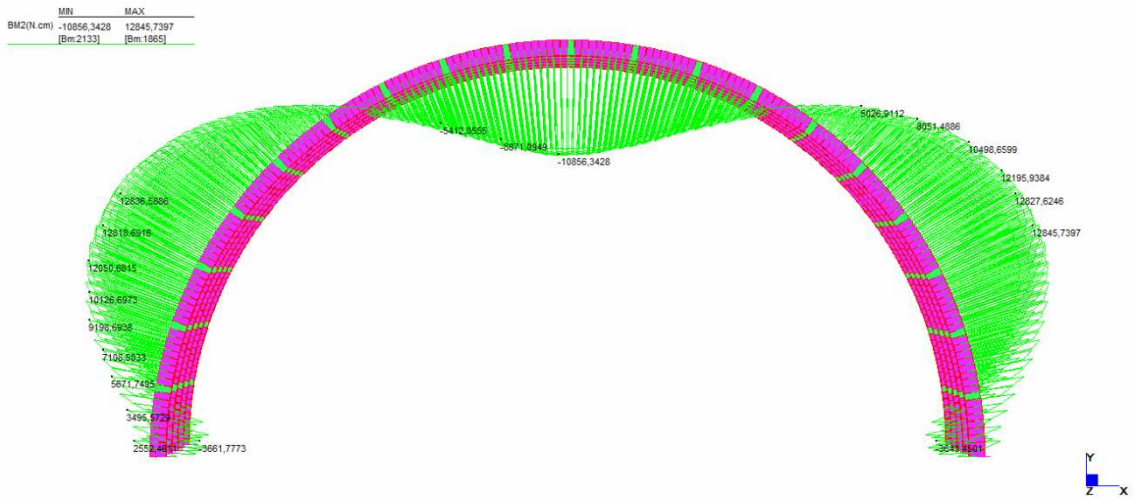
	MIN	MAX
BM2(N.cm)	-13187,9659	16694,4359
	[Bm.2121]	[Bm.2389]



Volta rinforzata con FRP a fasce sulle centine



Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine e sulle centine

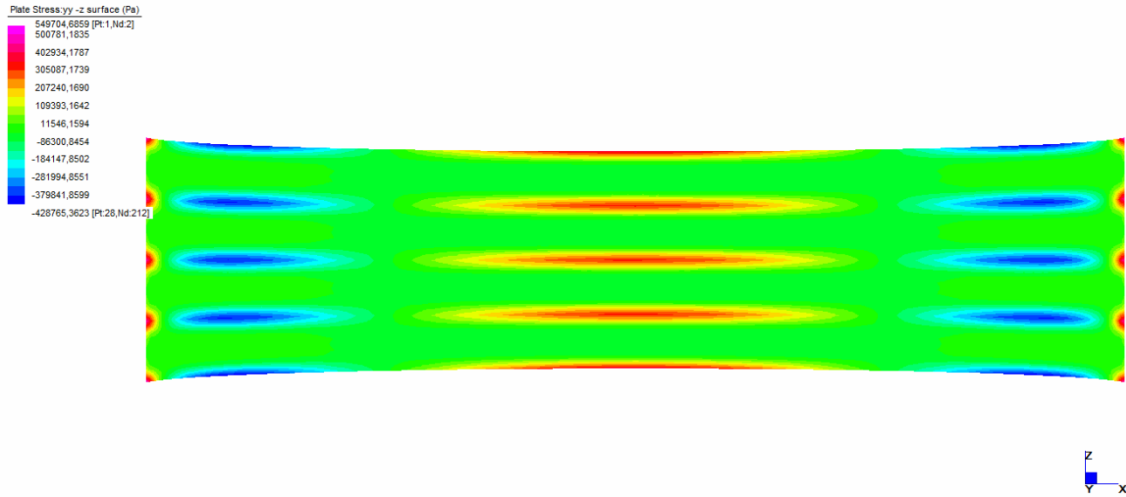


Tipo volta	Originale	FRP tra centine	FRP sulle centine	FRP tra e sopra le centine
Momento max	16.913 Ncm	16.694 Ncm	13.582 Ncm	12.845 Ncm

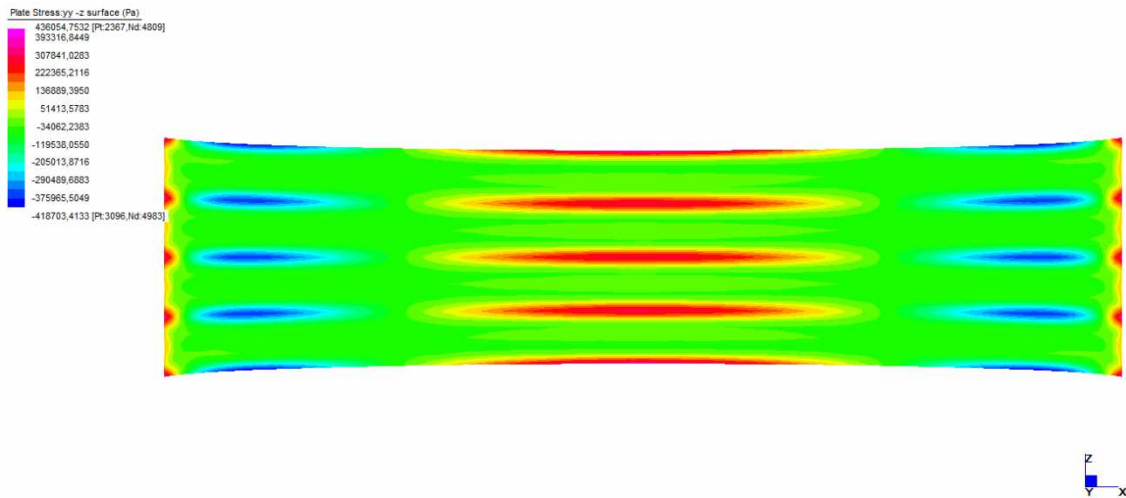
Tensioni yy nello strato dell'intonaco

La direzione locale yy è ortogonale all'asse longitudinale della volta.

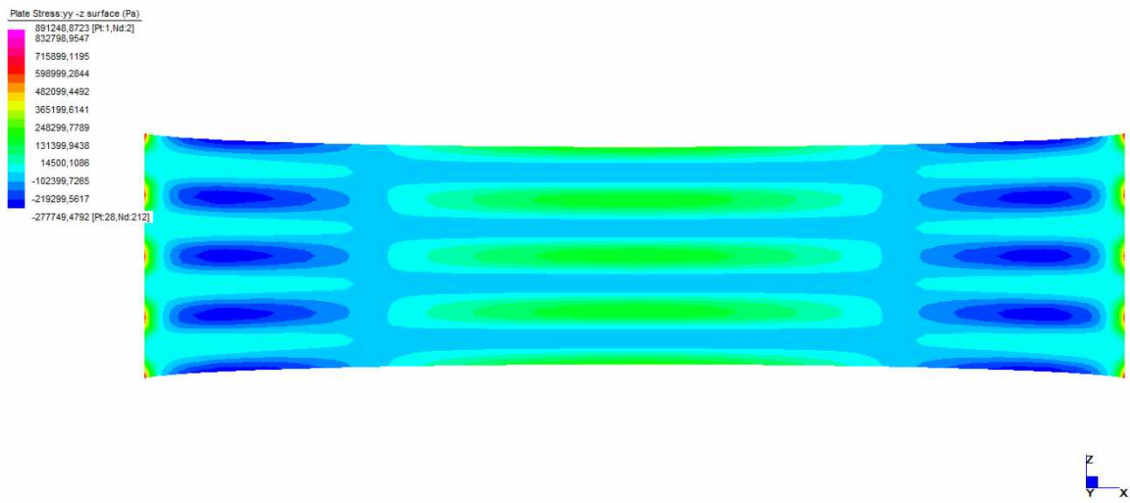
Volta originale



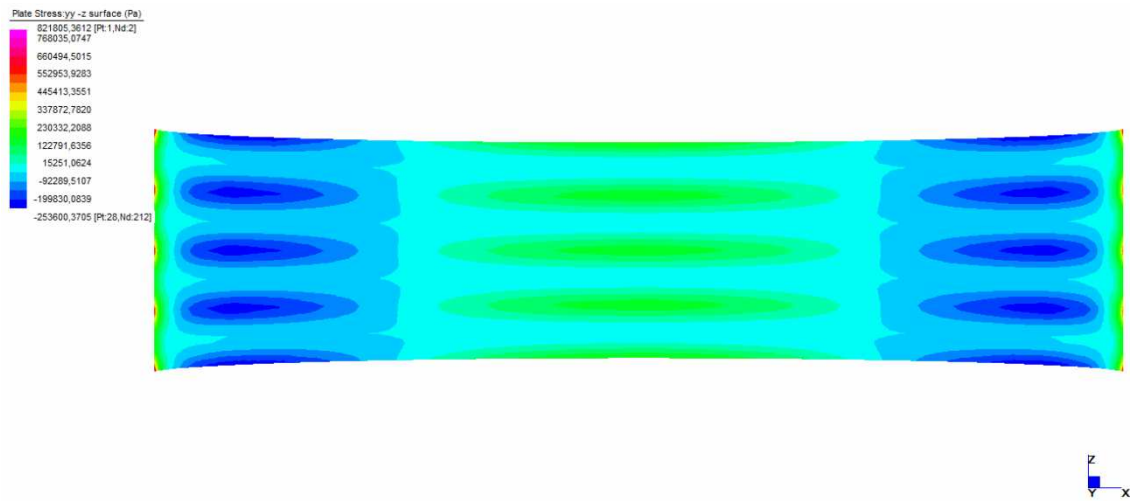
Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine



Volta rinforzata con FRP a fasce sulle centine



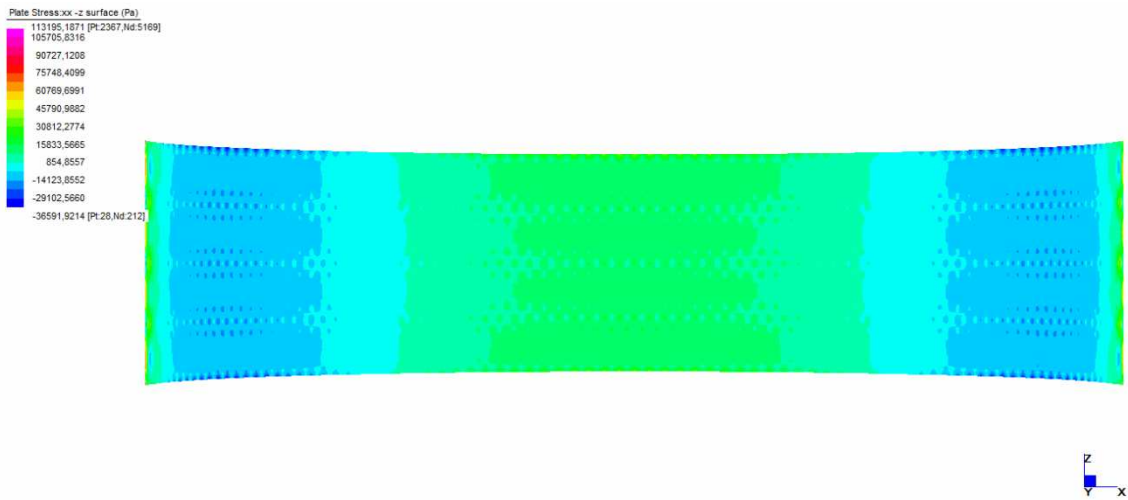
Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine e sulle centine



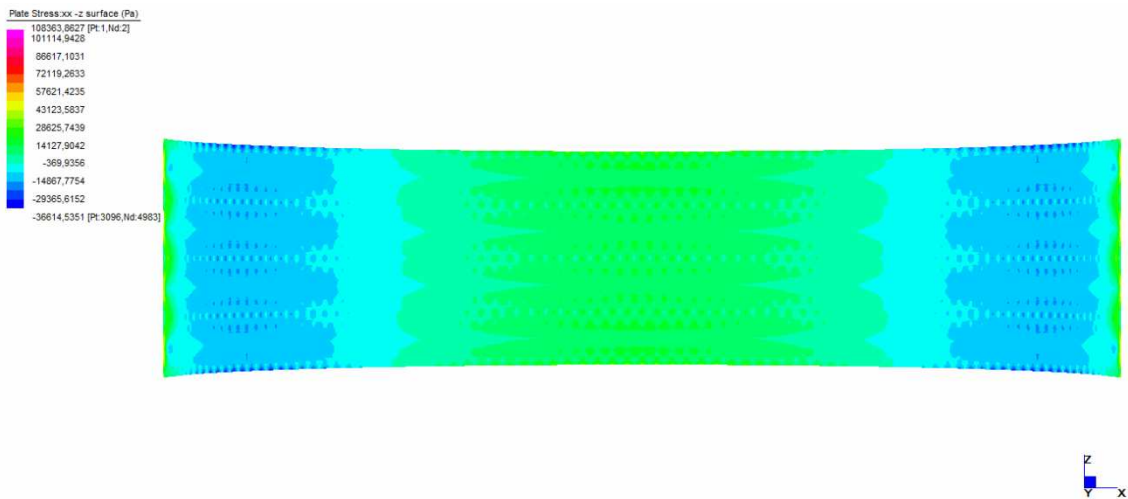
Tensioni xx nello strato dell'intonaco

La direzione locale xx è parallela all'asse longitudinale della volta.

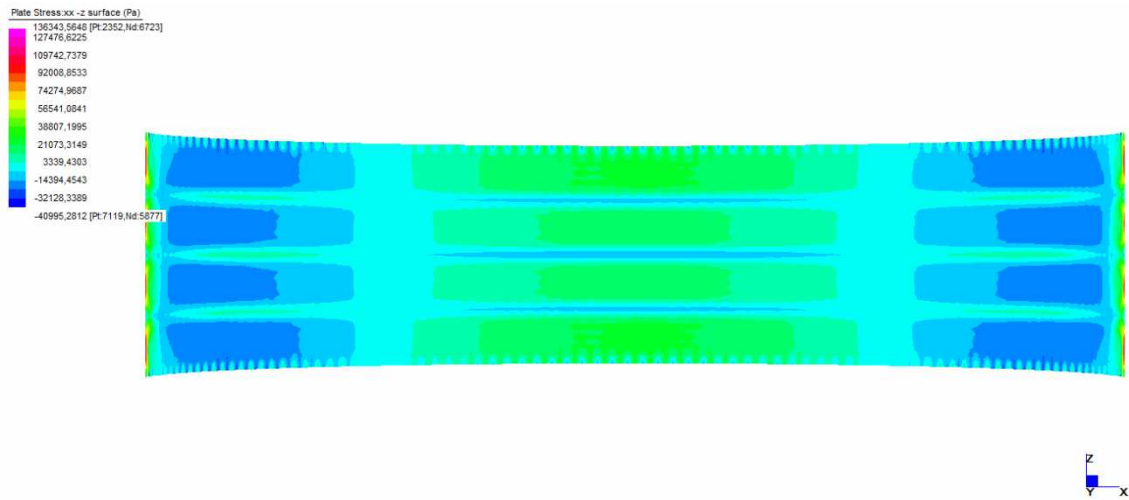
Volta originale



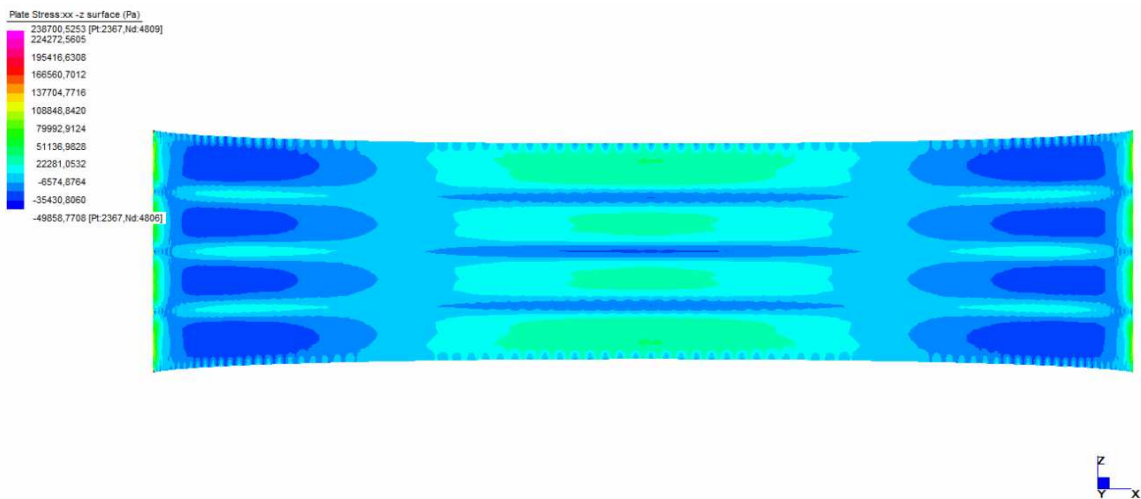
Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine



Volta rinforzata con FRP a fasce sulle centine



Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine e sulle centine



Dall'esame dei grafici è possibile capire i cambiamenti nel comportamento legati ai tre tipi di rinforzo rispetto alla volta originale.

Per quanto riguarda gli abbassamenti in mezzeria si ha che con i rinforzi R2 e R3 i valori di spostamento sono minori che nella volta originale, come ci si poteva aspettare. Infatti le fasce disposte sulle centine vanno a irrigidire l'intero sistema, comprese le connessioni tra le varie

centine, con conseguenti minori abbassamenti a parità di carico. Invece il sistema R1 presenta lo stesso abbassamento in mezzeria della volta originale, in quanto le fasce tra le centine non vanno a influenzare la rigidità delle centine stesse, dalle quali, come detto, dipende l'abbassamento dell'intera volta. Quindi il ruolo strutturale principale è confermato essere quello delle centine. Inoltre con i sistemi R2 e R3 diminuisce, rispetto al sistema originale, anche il momento flettente a cui sono sottoposte le centine, mentre questo non succede con il rinforzo R1.

Dai grafici relativi alle tensioni yy nell'intonaco è possibile vedere come, nel sistema originale, le tensioni siano concentrate in corrispondenza delle centine e presentino valori praticamente nulli al di fuori di esse. Questo conferma il comportamento strutturale della volta in camorcanna: lo strato di intonaco, grazie alla presenza dei ponti di malta tra una canna e l'altra e la possibilità di distendersi delle canne stesse, si ritrova ad essere semplicemente sospeso alle soprastanti centine per mezzo delle chiodature, in corrispondenza delle quali si hanno le uniche tensioni presenti. Per il sistema R1 il comportamento è praticamente lo stesso, con un andamento delle tensioni che ricalca quasi perfettamente quello originario. Invece ci sono cambiamenti significativi per i sistemi R2 e R3. Infatti la presenza delle strisce di FRP sulle centine porta ad un loro irrigidimento e anche delle connessioni tra di esse e lo stuoiato. Di conseguenza cambia la modalità con cui gli sforzi si trasmettono allo strato di intonaco, che non si ritrova più ad essere parzialmente indipendente dalla struttura soprastante: gli andamenti delle tensioni sono molto simili a quelli della volta non rinforzata, ancora concentrate in corrispondenza delle centine, ma cambiano decisamente i valori. In particolare si ha una notevole diminuzione delle trazioni a discapito di un aumento delle compressioni, comportamento questo decisamente favorevole in quanto l'intonaco è formato da malta che quindi ha buona resistenza a compressione e scarsa a trazione. Questo fenomeno è ancor più accentuato nel sistema R3.

3.5 ANALISI STATICA NON LINEARE

Con la sola analisi statica lineare non è possibile conoscere l'evoluzione del comportamento della volta in camorcanna quando sottoposta a carichi diversi dal solo peso proprio. Per questo motivo si è deciso di compiere un'analisi incrementale che coinvolga anche la non linearità dei materiali in gioco.

Scopo di tale analisi è capire quali meccanismi di rottura intervengano nei vari elementi, per quali valori di carico si raggiunga la rottura stessa e determinare quindi l'eventuale beneficio alla resistenza del sistema fornito dai singoli interventi basati sull'uso dei materiali compositi FRP.

Il sistema quindi è stato sottoposto, oltre ovviamente al peso proprio, ad una accelerazione laterale che simuli quanto avviene durante un sisma. La prima parte dell'analisi simula il caricamento con solo peso proprio; poi, lasciando inalterato il peso proprio, si è proceduto ad incrementare l'accelerazione laterale, usando come valore di riferimento un'accelerazione di 200 cm/s^2 , pari a circa 0,2 volte l'accelerazione di gravità g . Una prima fase dell'analisi incrementale ha visto i seguenti step di carico:

Nonlinear Static Load Increments				
CASES	1 Increment	2 Increment	3 Increment	4 Increment
1: Peso Proprio	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$
2: accelerazioni orizzo...	$0,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-1}$	$3,0 \times 10^{-1}$
1: Freedom Case 1	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$
CASES	5 Increment	6 Increment	7 Increment	8 Increment
1: Peso Proprio	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$
2: accelerazioni orizzo...	$4,0 \times 10^{-1}$	$5,0 \times 10^{-1}$	$6,0 \times 10^{-1}$	$7,0 \times 10^{-1}$
1: Freedom Case 1	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$
CASES	10 Increment	11 Increment	12 Increment	13 Increment
1: Peso Proprio	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$
2: accelerazioni orizzo...	$9,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^0$	$1,1 \times 10^0$	$1,2 \times 10^0$
1: Freedom Case 1	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$
CASES	15 Increment	16 Increment		
1: Peso Proprio	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$		
2: accelerazioni orizzo...	$1,4 \times 10^0$	$1,5 \times 10^0$		
1: Freedom Case 1	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$		

Straus7 Release 2.3.3 [licensed to lib@iastate.edu] (m)
 Model file: C:\Users\Fabio\Documents\Università\Tes specialistica\modello in straus\prime prova\camorcanna_canne5\con_orzo_nuovo_piccola.st7
 4 giugno 2010 5:25 pm

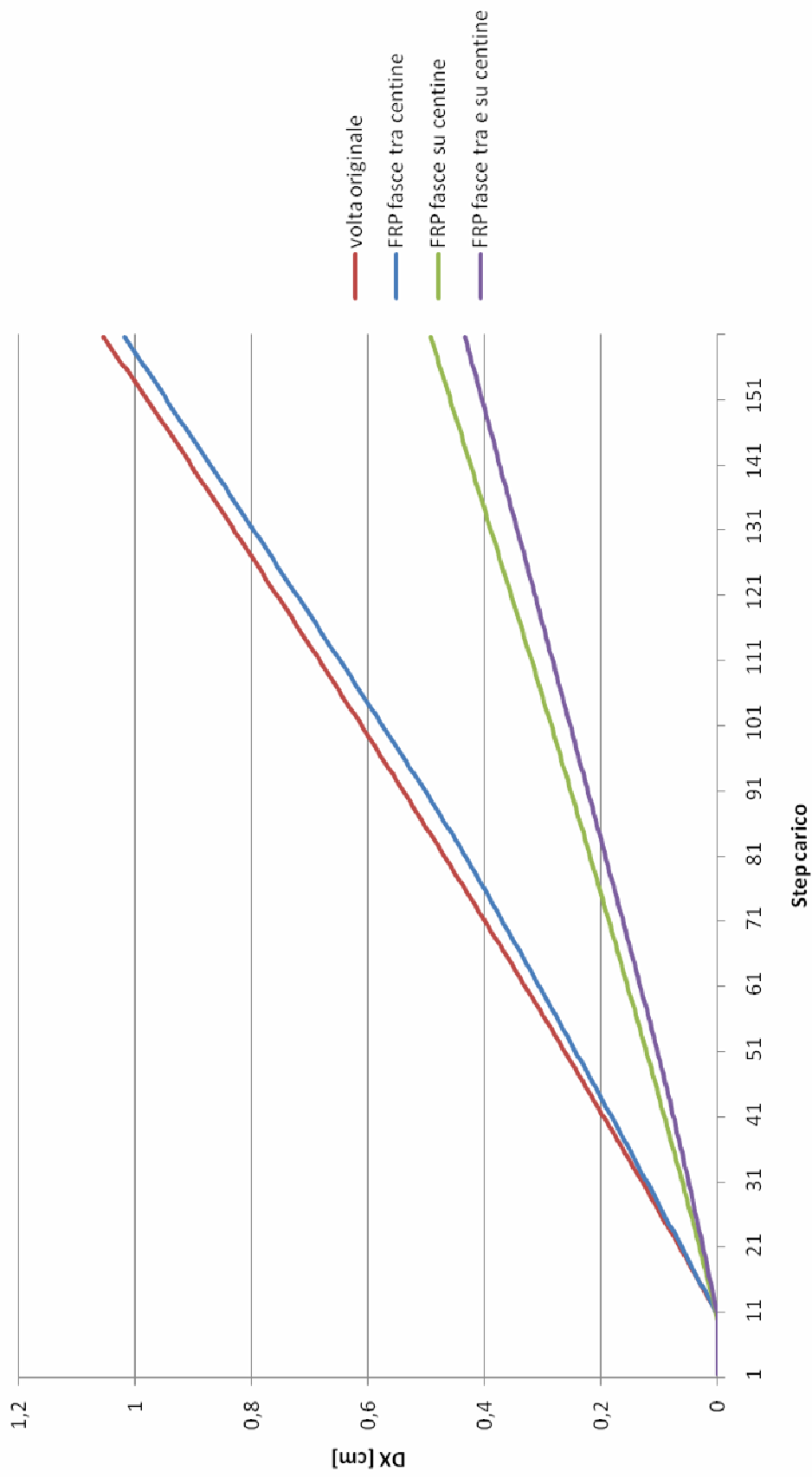
A sua volta ogni singolo incremento di carico è stato suddiviso in 10 ulteriori step, ottenendo così un totale di 160 step di carico.

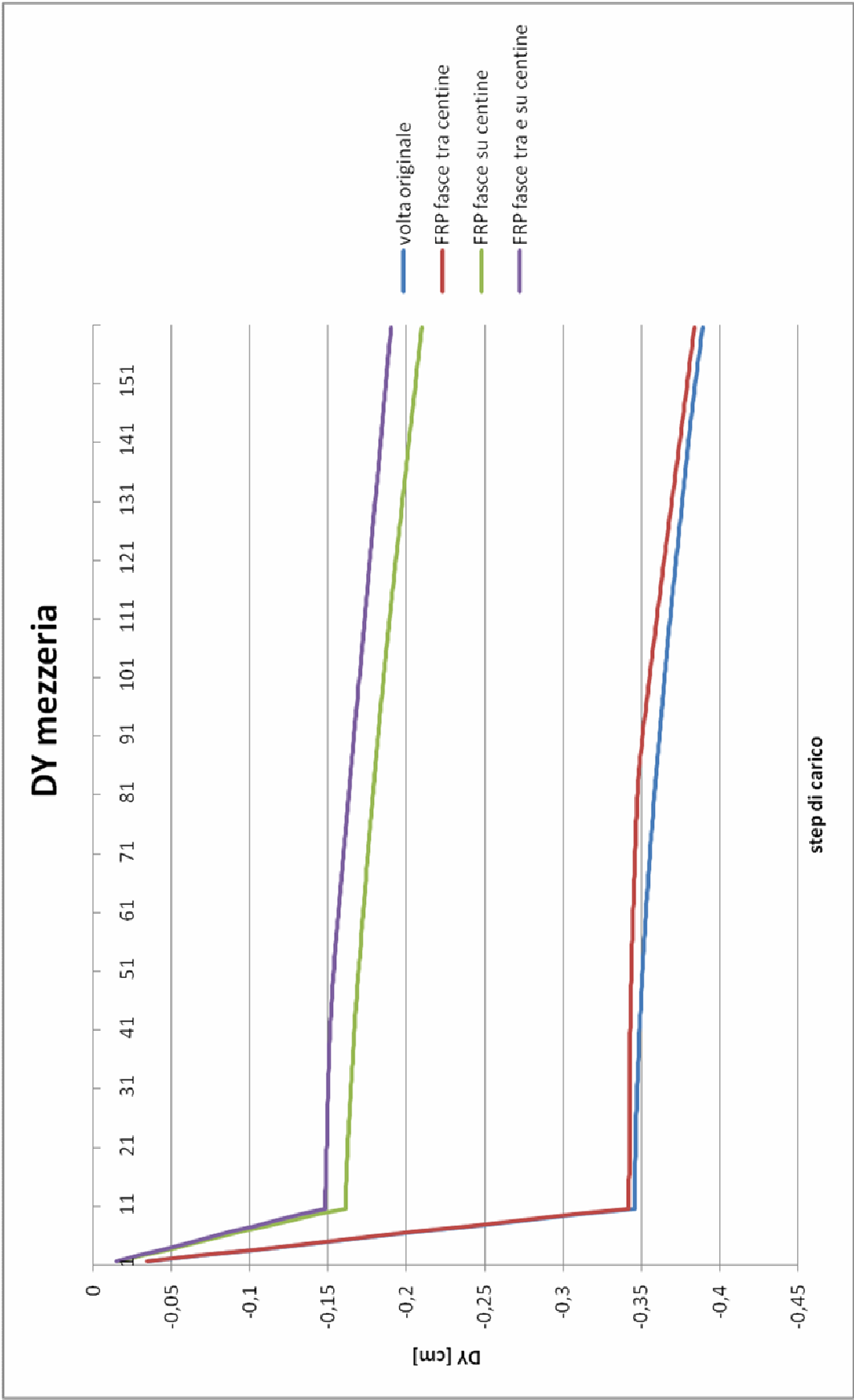
Al termine delle fasi di calcolo sono stati costruiti diagrammi per monitorare le varie grandezze, cioè deformazioni e tensioni, nei vari elementi strutturali. In particolare sono stati confrontati, per i vari modelli, gli spostamenti in mezzeria, le tensioni nello strato di intonaco, gli sforzi nelle chiodature, e le tensioni nelle fasce di FRP.

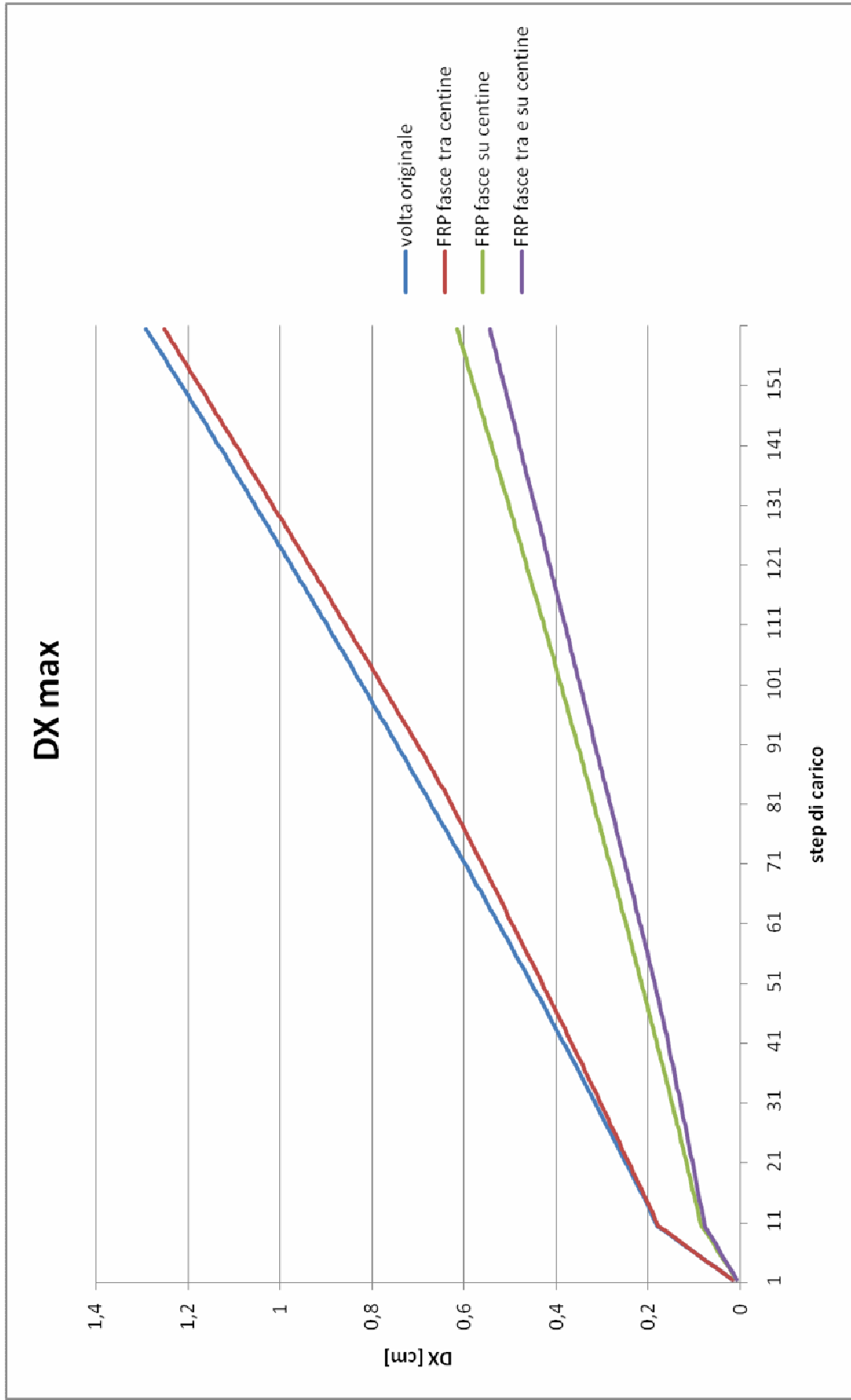
Si deve far notare che le soluzioni fornite dal calcolatore, da un certo step d'incremento in poi, non tendono più alla convergenza. Probabilmente riducendo il "Load reduction factor", cioè la differenza minima di carico da un sotto-step all'altro calcolati in automatico dal programma, ad un valore inferiore al 10% questa evenienza non si sarebbe presentata, con un modesto miglioramento nell'accuratezza dei risultati a fronte però di un eccessivo aumento del tempo di calcolo (passando all'1% i sotto-step tra un incremento e il successivo sarebbero stati 100 invece che 10, passando da 5 ore circa di calcolo a 50 ore).

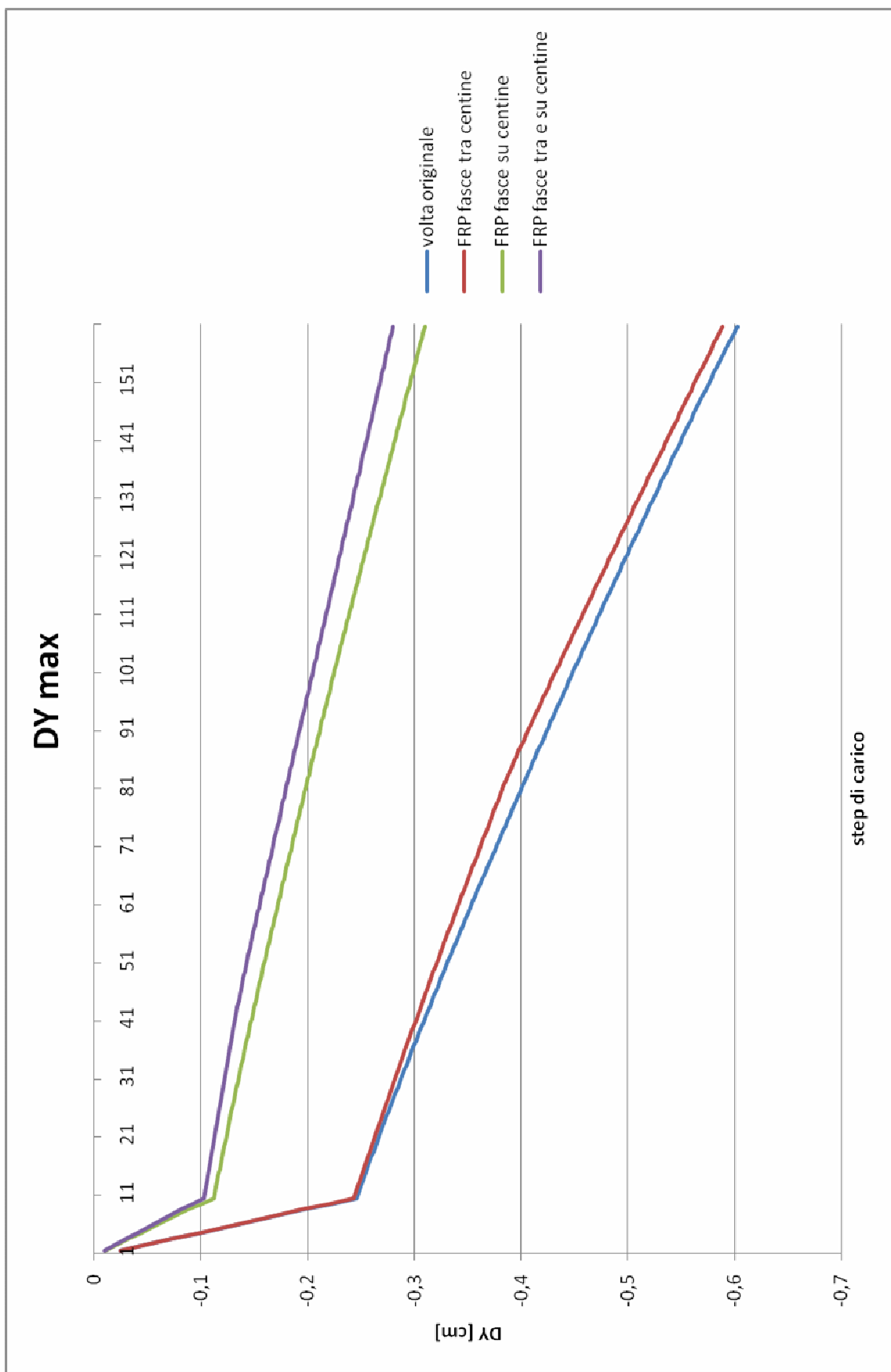
In ogni grafico i primi 10 step corrispondono all'applicazione del peso proprio.

DX mezzeria





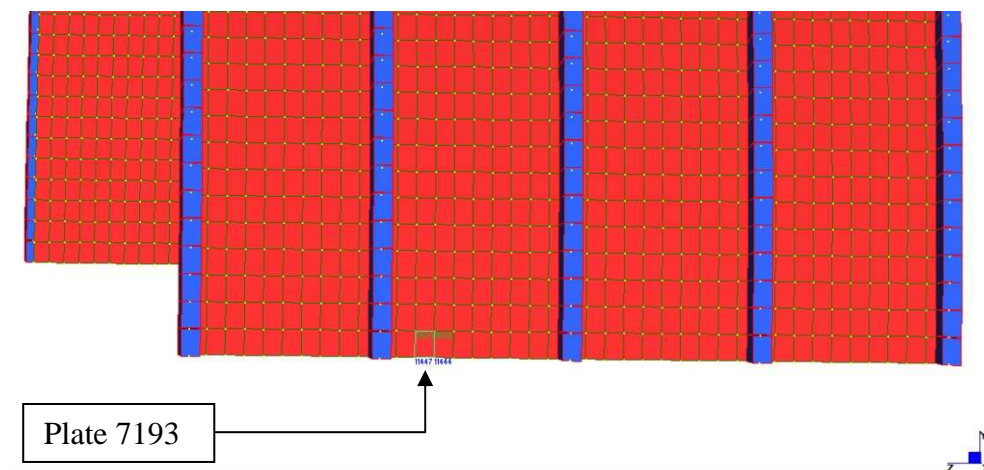




Dai grafici relativi agli spostamenti appare evidente quanto detto per l'analisi statica lineare. I sistemi rinforzati con FRP presentano una rigidità maggiore e quindi spostamenti minori. Questo è tanto più vero per i modelli R2 e R3. Invece il rinforzo R1 fornisce valori molto simili a quelli della volta originale, a riprova che si tratta dell'intervento che meno modifica il comportamento strutturale della camorcanna. La crescita di spostamento si mantiene lineare nella fase di applicazione del peso proprio, mentre perde di linearità nelle fasi successive di incremento dell'accelerazione laterale.

Tensioni nell'intonaco

Per valutare quanto succede a livello dello strato d'intonaco, si sono valutate le tensioni in direzione yy e xx in 3 plates di "controllo", cioè presi come riferimento in tutti e 4 i modelli. In particolare 2 plates (7193 e 7198) si trovano all'imposta con la muratura, il terzo (4174) in prossimità della mezzeria sotto la centina centrale:



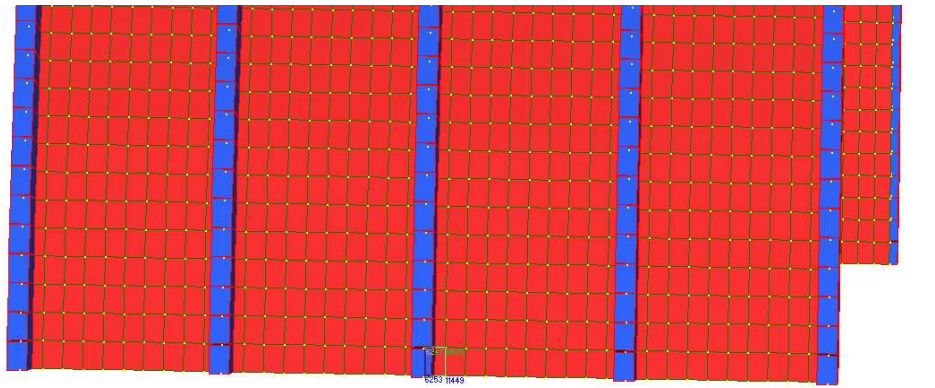


Plate 7198

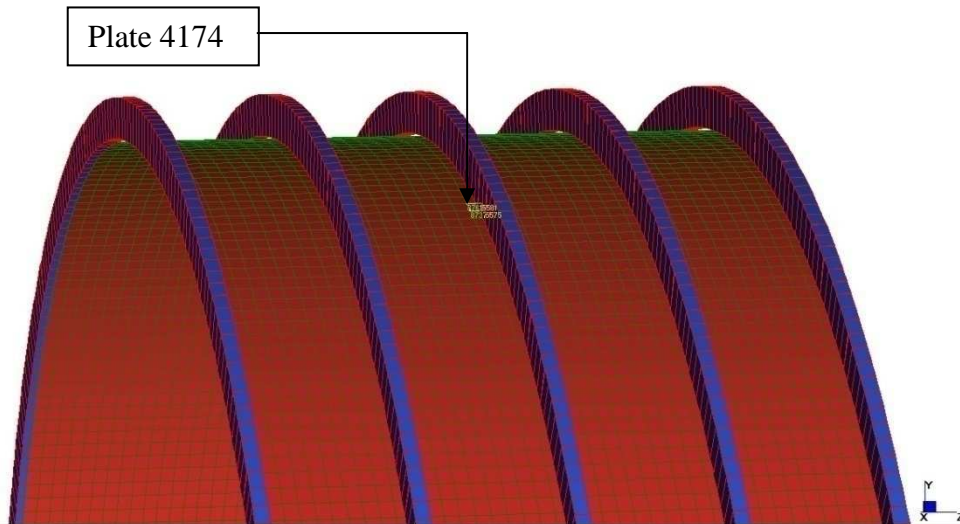
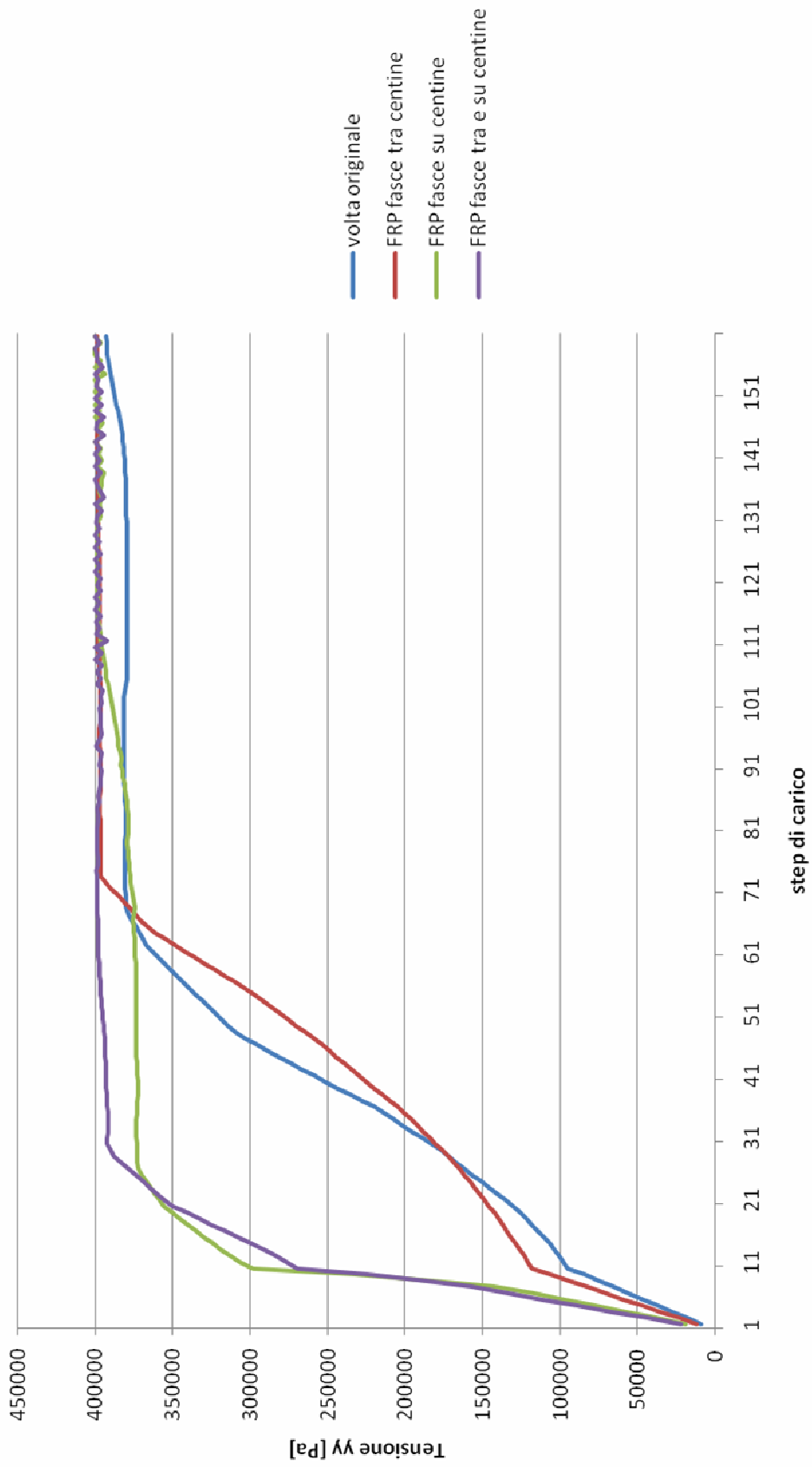
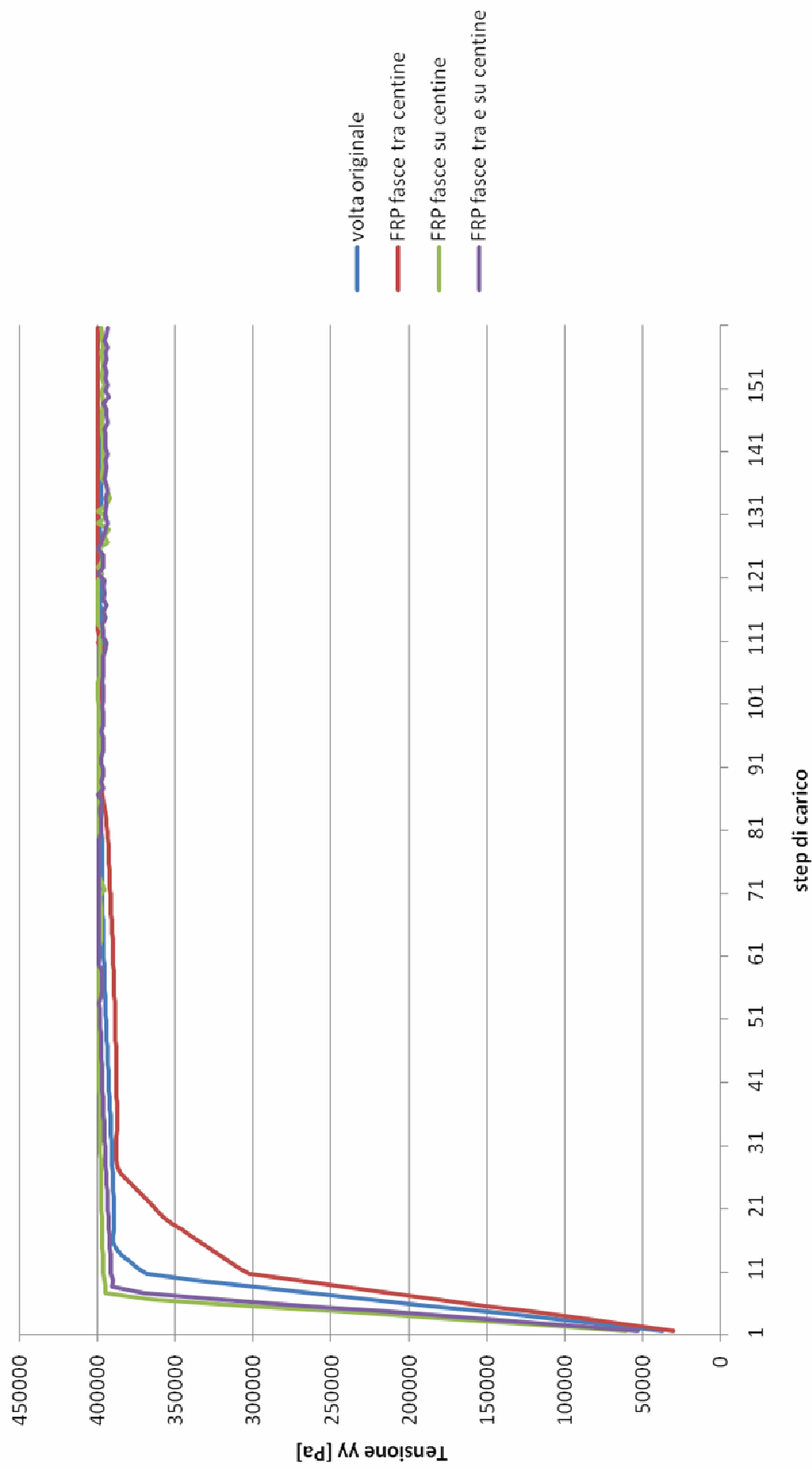


Plate 4174

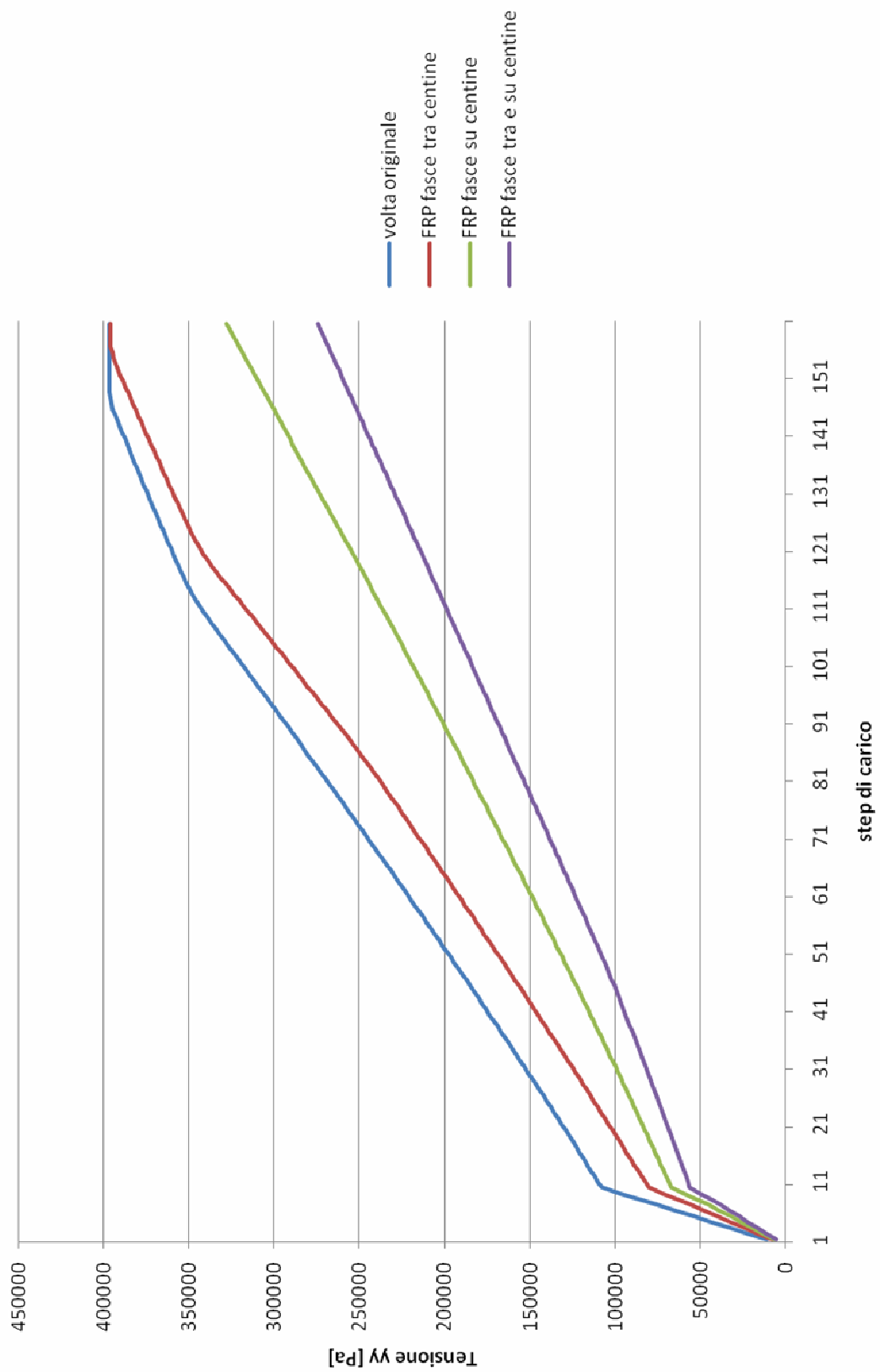
Sigma yy intonaco - Plate 7193



Sigma yy intonaco - Plate 7198



Sigma yy intonaco - Plate 4174



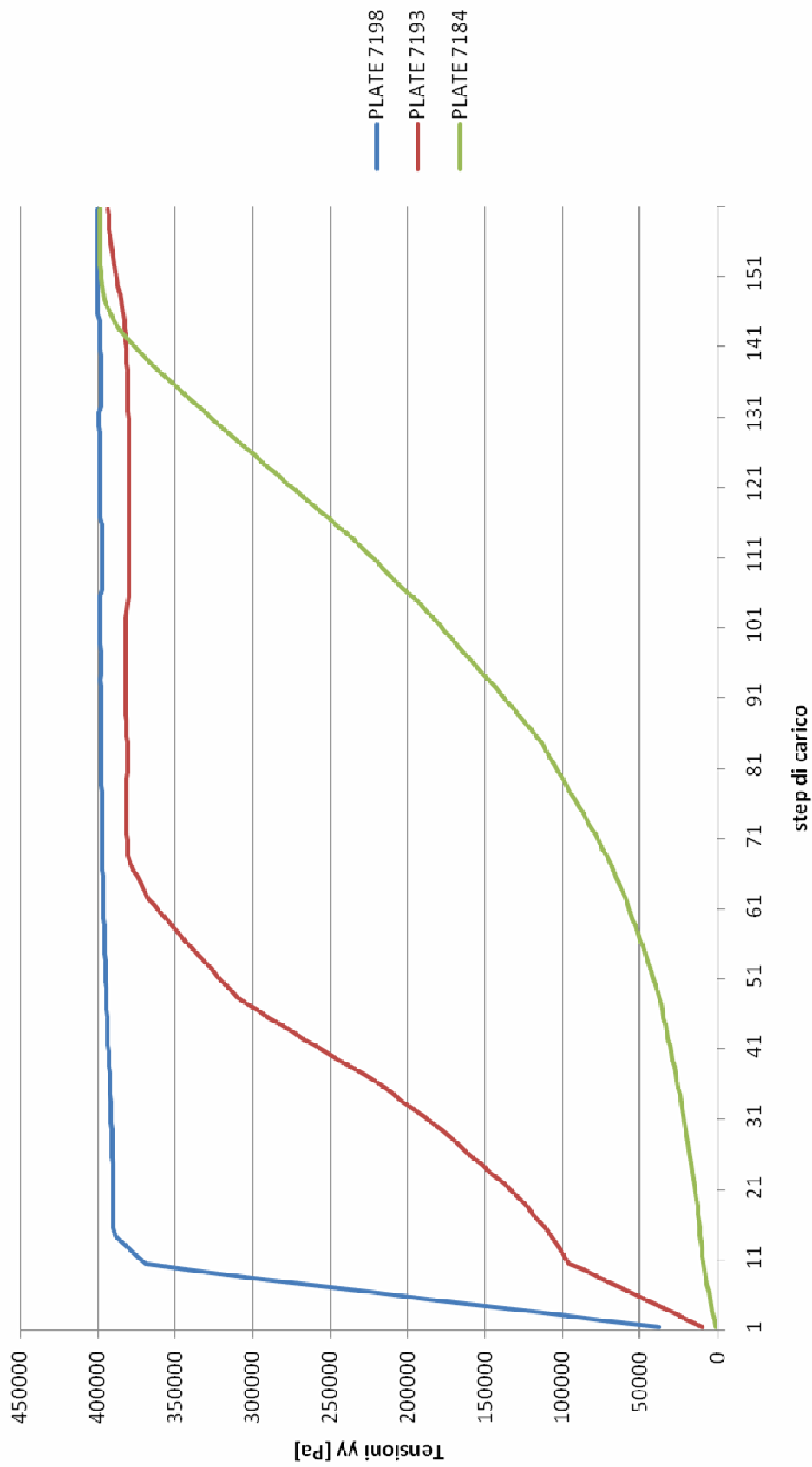
Dal grafico relativo al plate 7193 si può vedere come l'irrigidimento dovuto alle fasce sulle centine per i sistemi R2 e R3 comporti un rapido aumento delle tensioni σ_{yy} nell'intonaco, raggiungendo presto valori vicini a quello di rottura. Già durante la fase di applicazione del peso proprio si ha perdita di linearità con un incremento molto rapido degli sforzi. Infatti l'irrigidimento delle centine, con conseguente aumento di rigidità anche dell'unione tra stuoiato e centina e dello strato di pad deformabile, comporta un più immediato trasferimento degli sforzi dalle centine al sottostante stuoiato e quindi all'intonaco, che ha meno possibilità di stendersi. Considerando il valore di resistenza a trazione dell'intonaco di 0,4 MPa, si ha che ognuno dei 3 metodi di rinforzo comporta l'insorgere della fessurazione per valori di carico minori che per il sistema originale, in quella precisa parte della volta.

Con riferimento invece al plate 7198 i sistemi R2 e R3 raggiungono il valore limite di resistenza praticamente allo stesso carico della volta originale. Invece con il sistema R1 il limite è raggiunto per valori maggiori di carico.

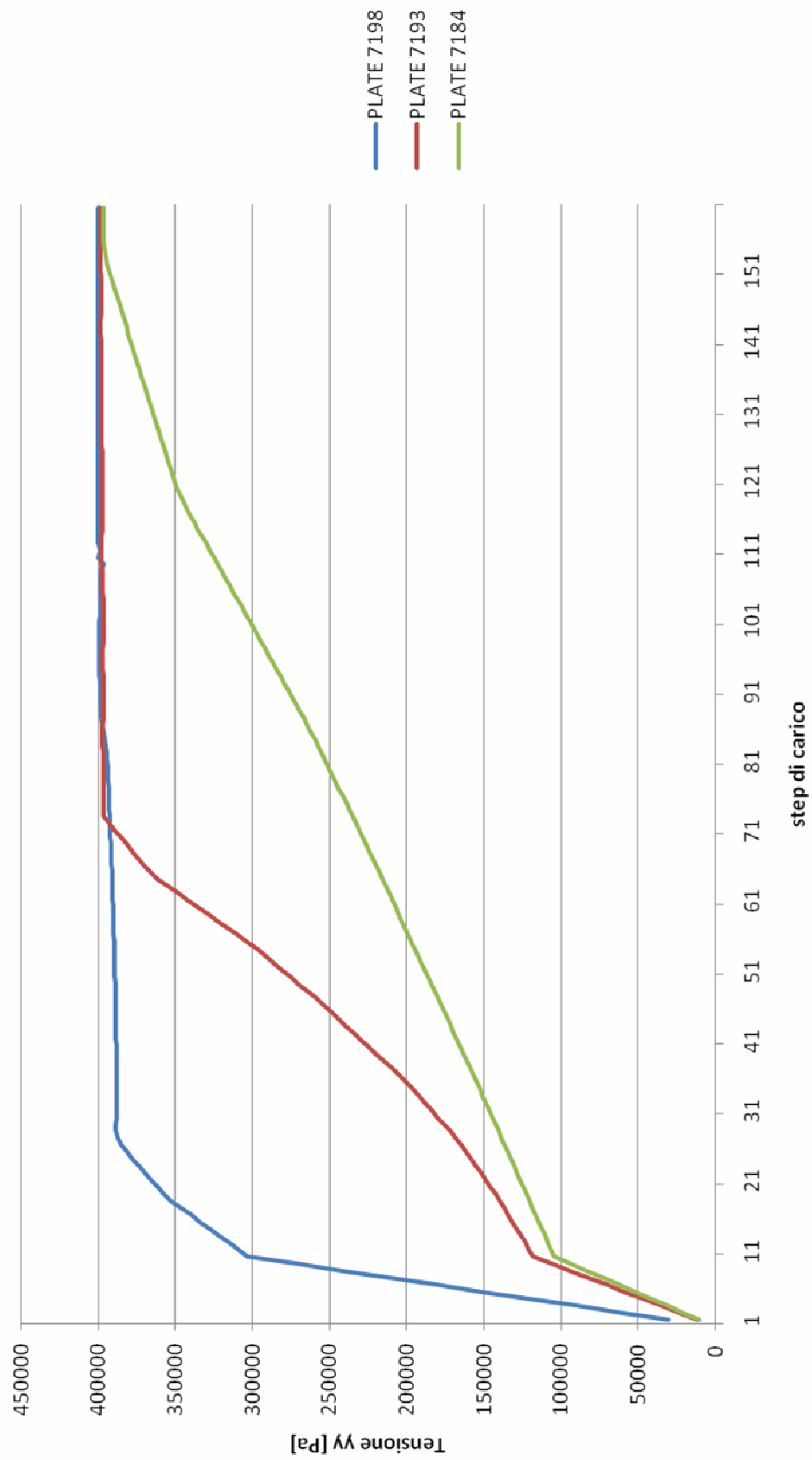
Un notevole miglioramento si ha invece in corrispondenza della mezzeria della volta, cioè il plate di riferimento 4174. Infatti mentre per la volta originale la fessurazione è innescata per valori di carico pari a circa 0,26g, con i tre sistemi di rinforzo questo avviene per valori maggiori di carico: poco maggiore per il sistema R1 che ancora una volta si conferma il più simile alla volta non rinforzata, e molto maggiori per i sistemi R2 e R3.

E' quindi lecito supporre che le fessure nell'intonaco si formeranno proprio nella parte terminale della volta, a partire dalla parte centrale sotto la centina e unendosi a quelle formatesi in corrispondenza delle centine laterali. Questo accadrà prima per la volta originale e per quelle con rinforzo R1 e soprattutto R3, e invece per carichi maggiori per la volta con rinforzi R2, come è possibile vedere dai seguenti grafici nei quali è stato inserito anche l'andamento delle tensioni y_y relative al plate 7184, posizionato esattamente al centro tra 2 centine consecutive:

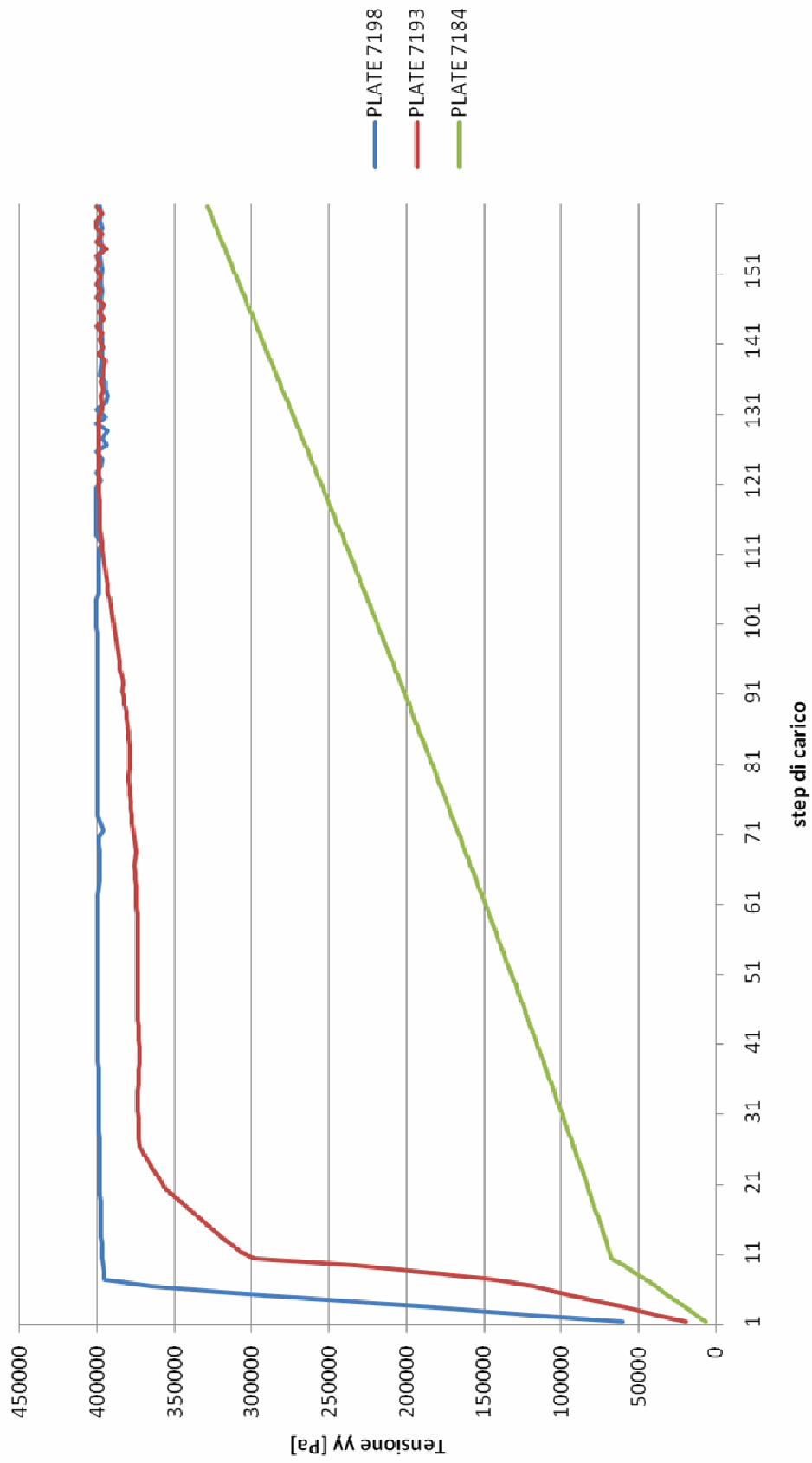
Evoluzione sigma yy-Volta originale



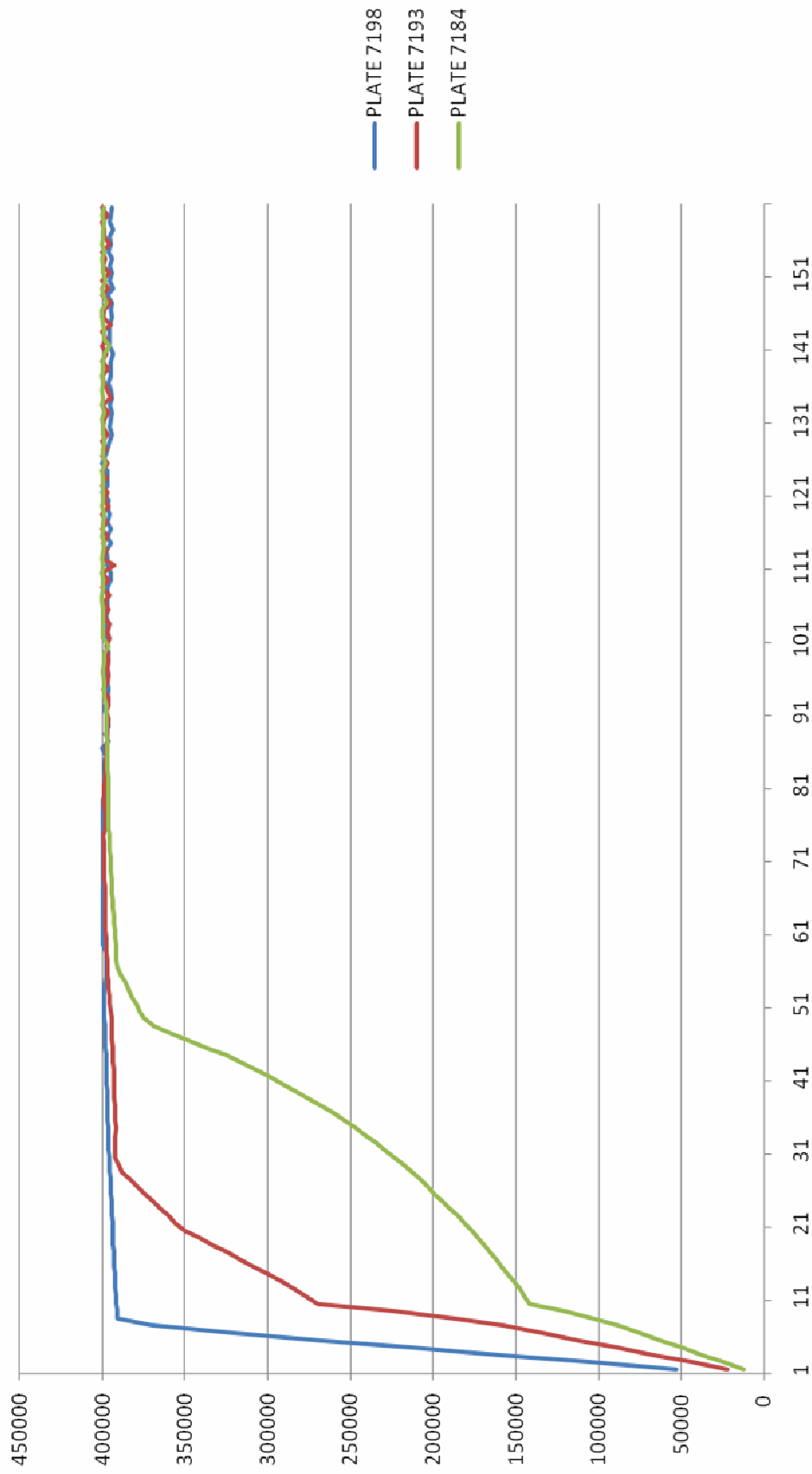
Evoluzione sigma yy-Volta R1



Evoluzione sigma yy-Volta R2

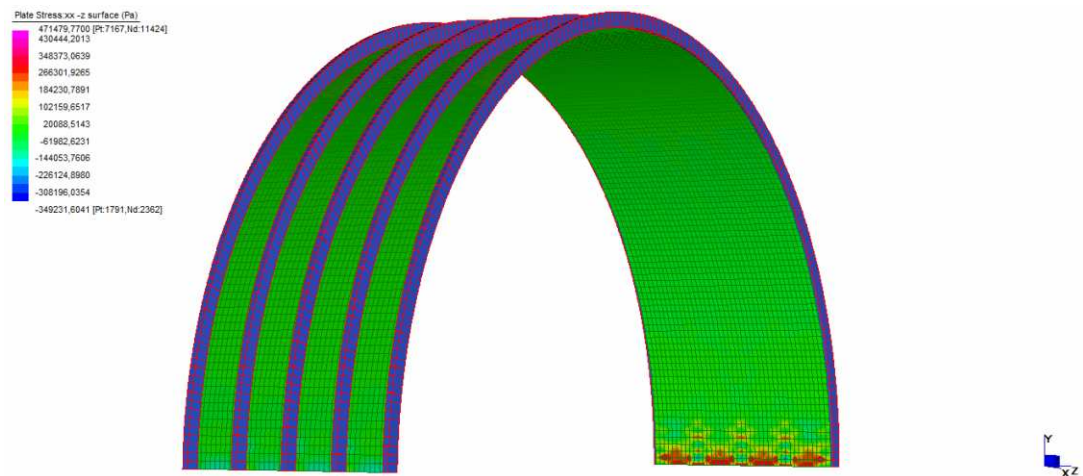


Evoluzione sigma yy-Volta R3

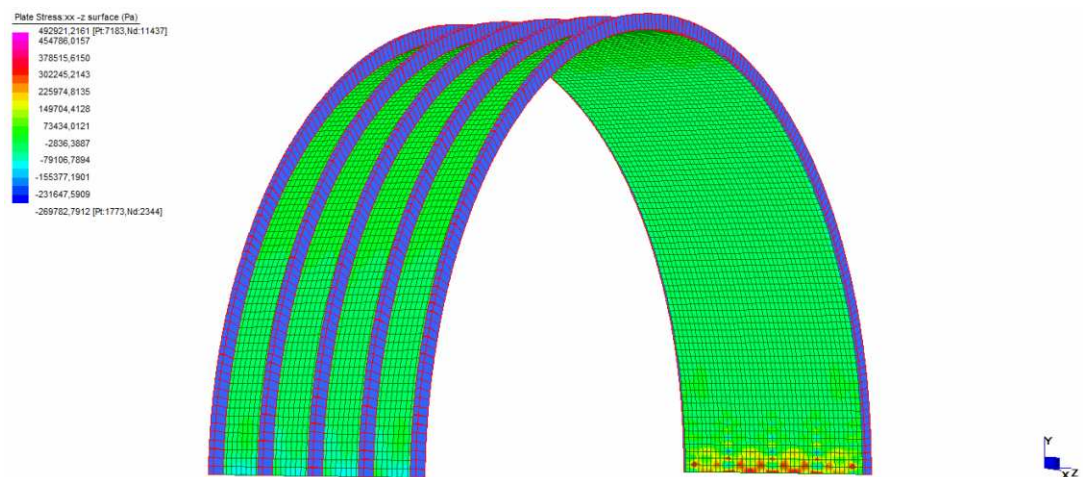


L'andamento delle tensioni xx nell'intonaco al termine dell'analisi statica non lineare per le 4 volte è il seguente:

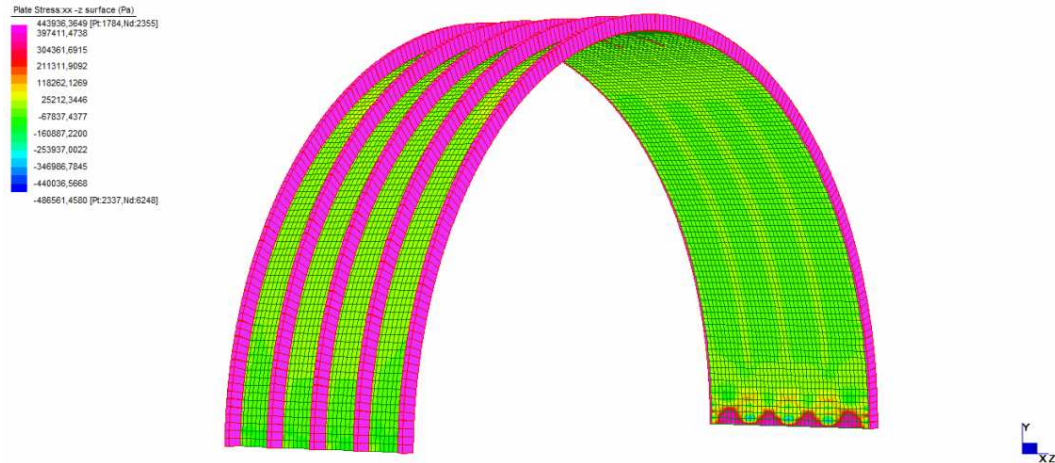
Volta originale



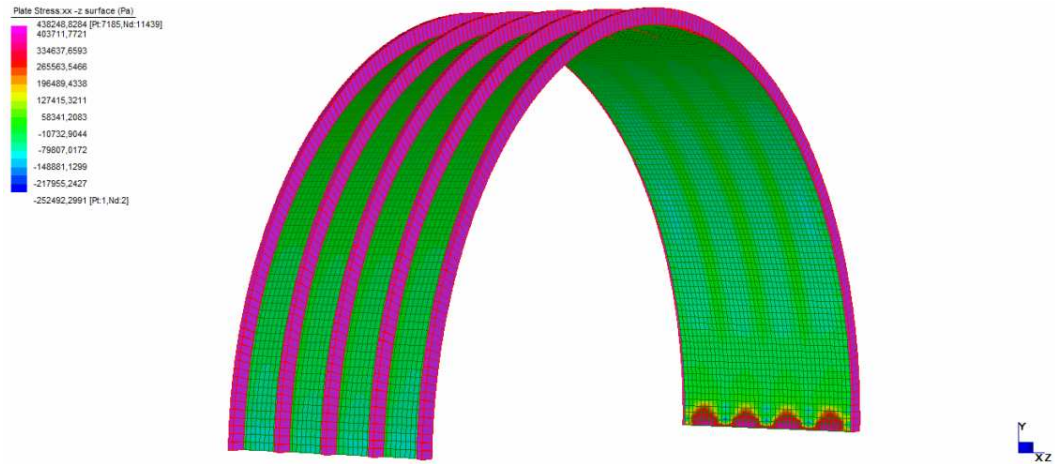
Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine R1



Volta rinforzata con FRP a fasce sulle centine R2

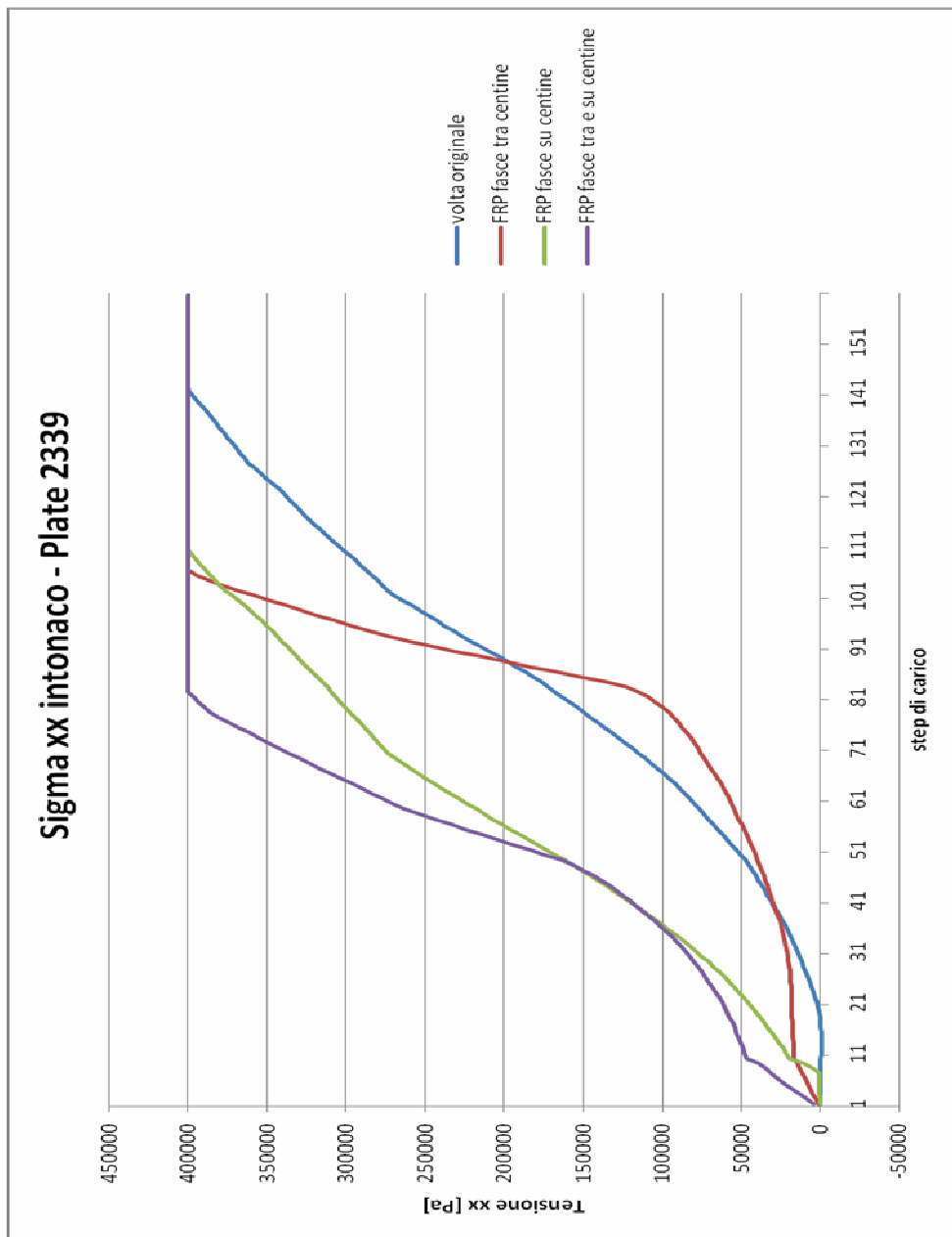


Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine e sulle centine R3



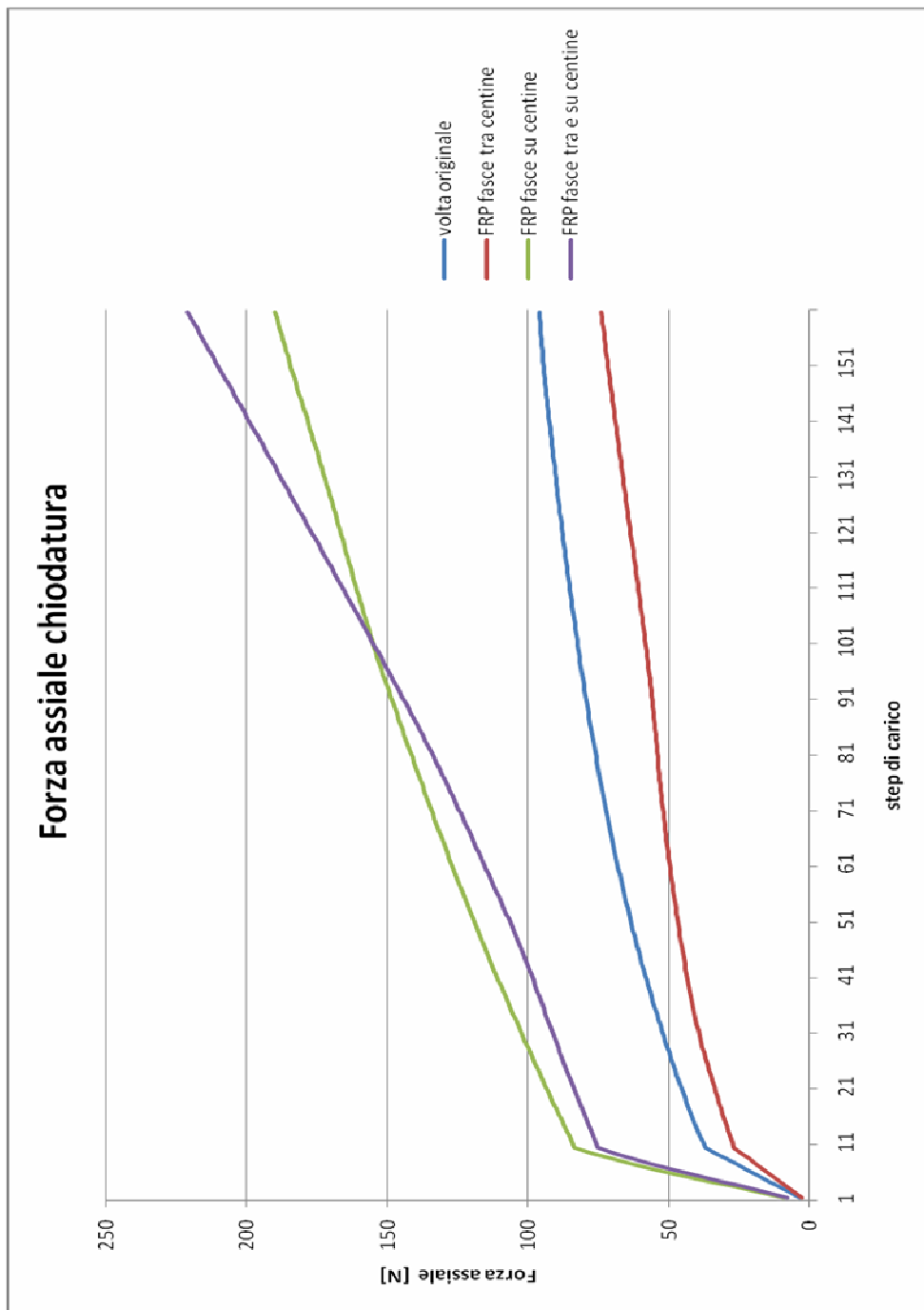
E' possibile osservare come le tensioni maggiori di trazione siano concentrate alla base della volta, con picchi in corrispondenza delle centine. Nel resto della volta invece i valori sono molto bassi, questo perché la sollecitazione esterna è diretta lungo l'asse y perpendicolare alla volta e quindi essa non è direttamente caricata nella direzione longitudinale, che è la direzione delle tensioni xx. Gli sforzi che ne derivano sono quindi conseguenza delle tensioni yy per effetto Poisson, come è evidente dal fatto

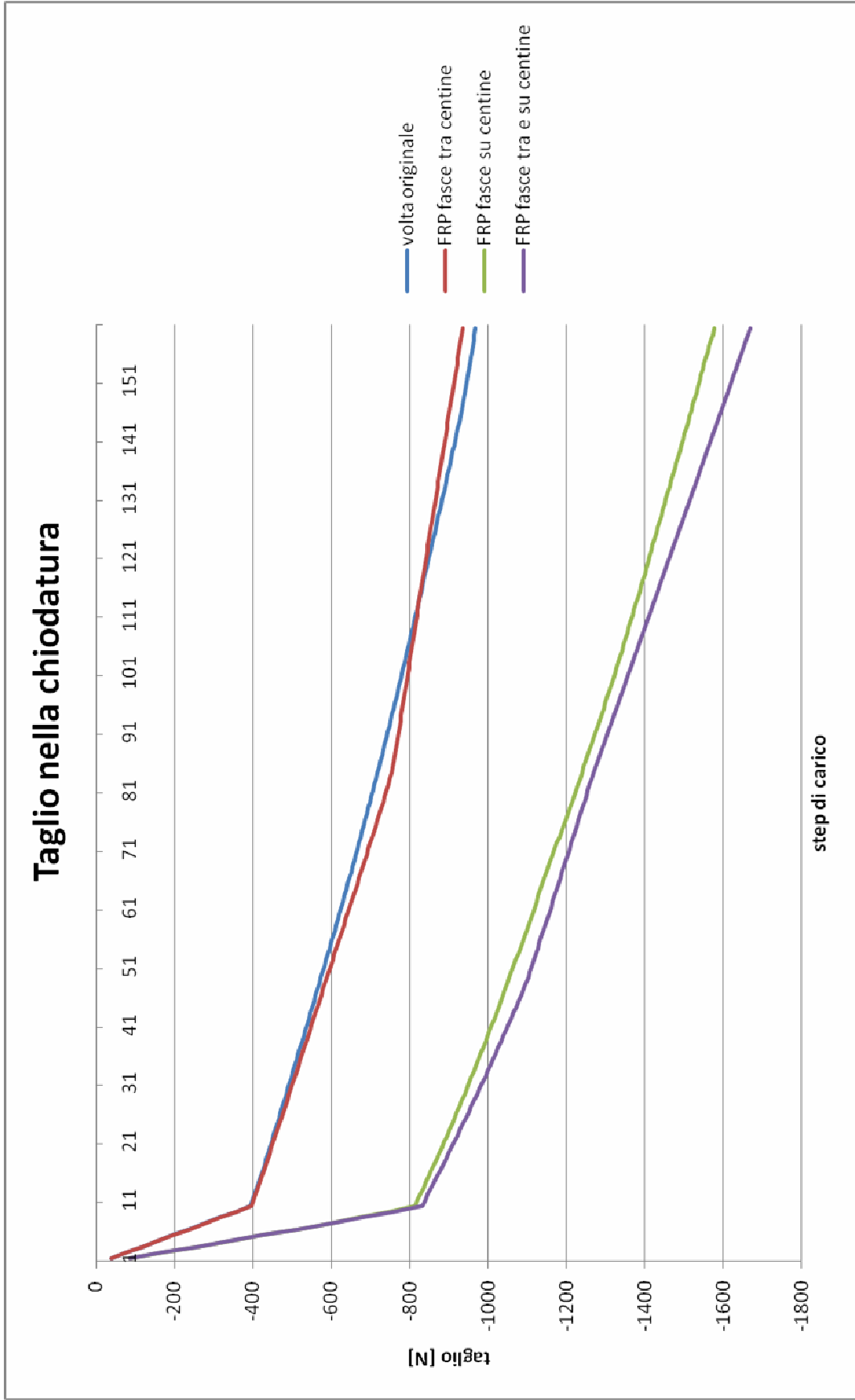
che le tensioni sono alla base della volta dove la contrazione laterale dell'intonaco è collegata agli spostamenti delle centine che lì sono impediti. Inoltre nella direzione locale xx è presente lo stuoiato delle canne, che quindi assorbe quasi tutto lo sforzo senza trasferirne all'intonaco che ne segue lo spostamento. Si riporta qui di seguito l'andamento delle tensioni xx in funzione degli incrementi di carico, nel plate 2339, che si trova alla base della volta sotto la centina centrale:



Chiodatura stuoiato-centine

La resistenza dei collegamenti tra lo stuoiato di canne e le centine è fondamentale per evitare che le canne e l'intonaco si stacchino dalla struttura di supporto. Devono quindi essere controllate le variazioni della forza assiale e della forza di taglio nelle chiodature in funzione degli step di carico; entrambe sono state valutate nell'elemento più sollecitato:





La maggior rigidità dei sistemi R2 e R3 rispetto alla volta originale e al sistema R1 comporta anche una maggior sollecitazione nel collegamento stuoia-centine, con valori di sforzo assiale e di taglio pari circa al doppio. In particolare il sistema R3 presenta i valori più gravosi.

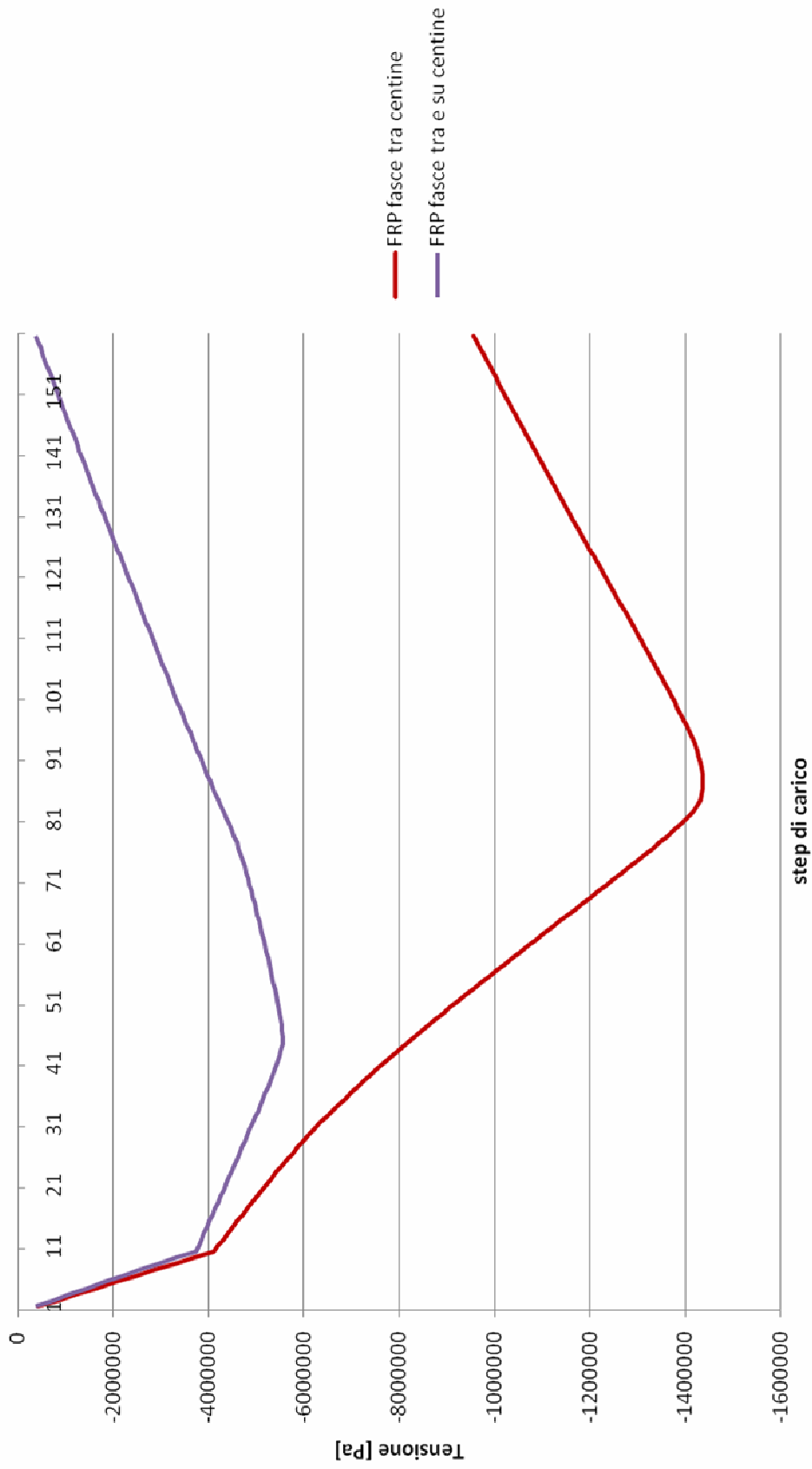
In ogni caso anche al termine degli step di carico i valori in gioco non pregiudicano la stabilità degli elementi in quanto inferiori ai limiti di resistenza.

Si rivela quindi necessaria una analisi incrementale con valori di carico maggiori di quelli attuali, per conoscere l'effettivo carico di rottura degli elementi.

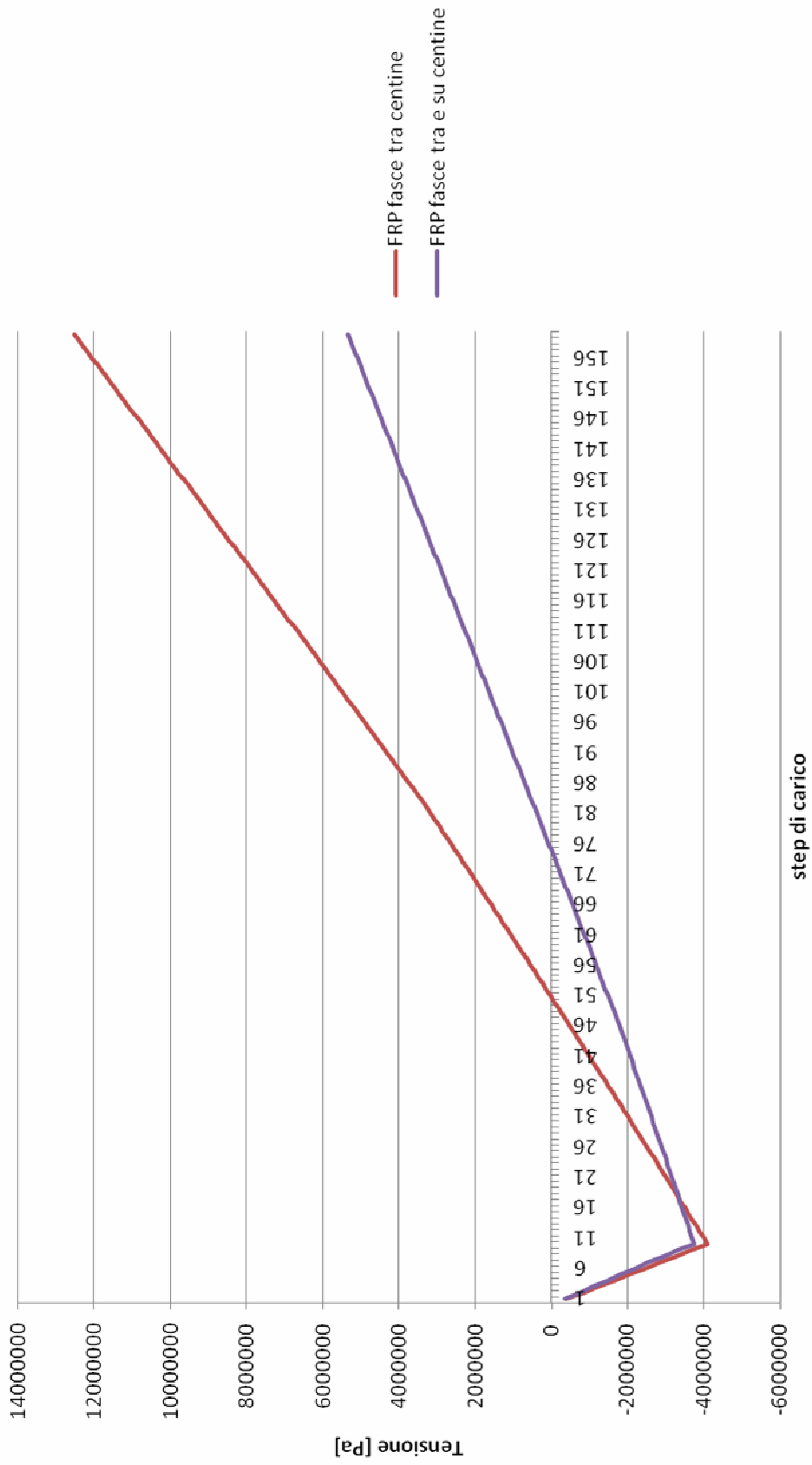
Fasce di FRP

Sono state valutate le tensioni nelle fasce di FRP posizionate tra le centine per i sistemi R1 e R3. Le verifiche da eseguire riguardano il non raggiungimento della tensione di delaminazione che comporterebbe l'improvviso distacco del materiale composito dal substrato e il valore delle tensioni di compressione, in quanto il valore di resistenza a compressione è molto inferiore che quello a trazione a causa dell'elevata snellezza delle fibre, con conseguenti problemi di instabilità e rapido distacco del composito, che quindi non lavorerebbe in caso di un successivo eventuale stato di trazione dovuto a sforzi ciclici, come nel caso del sisma.

Compressione nelle fasce di FRP



Trazione nelle fasce di FRP - beam 1779



I valori maggiori sono in, corrispondenza della base, per la volta tipo R1, in quanto per la volta R3 ci sono anche le fasce sulle centine che collaborano a contrastare gli sforzi.

Per quanto riguarda la compressione il valore maggiore è di circa 1,43 MPa, e non pregiudica quindi la resistenza a compressione del materiale composito.

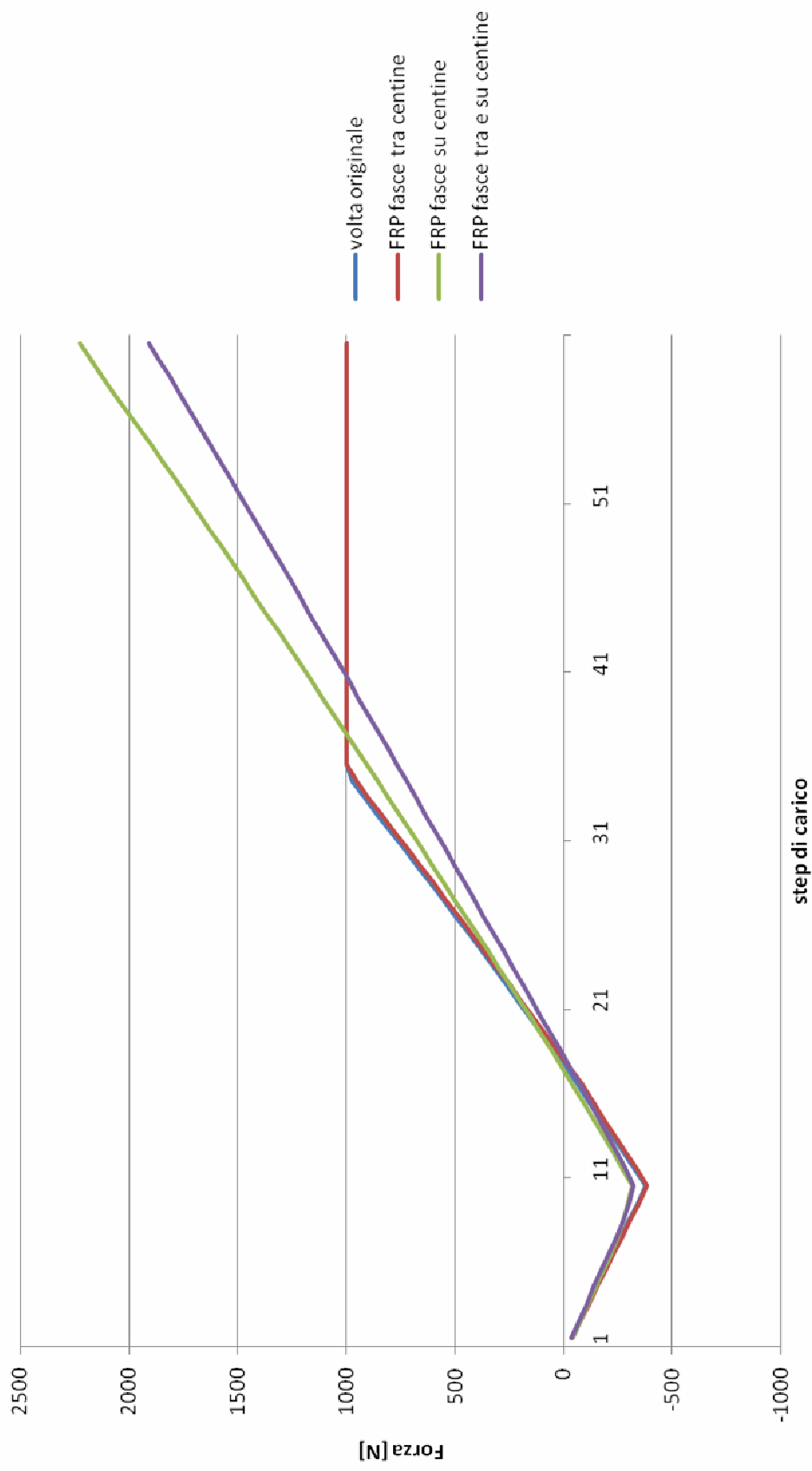
Invece per la trazione il valore maggiore, al termine degli incrementi di carico è di circa 13MPa. La resistenza a delaminazione quindi non viene superata, però non è possibile conoscere l'evoluzione con carichi laterali maggiori, per conoscere i quali si rende necessaria una ulteriore analisi incrementale.

Si è proceduto con una seconda fase di analisi incrementale con valori di carico dati dall'accelerazione laterale maggiori che nella fase precedente. Lo scopo è valutare per quali valori di carico si arriva alla rottura degli elementi per i quali la prima analisi incrementale non era sufficiente, cioè le chiodature tra centine e stuoiato e le centine stesse. Il valore di riferimento dell'accelerazione laterale che è stato incrementato nei vari step è sempre di 200 cm/s^2 . Gli incrementi che hanno caratterizzato questa seconda fase sono riportati nella seguente tabella:

Nonlinear Static Load Increments			
CASES	1 Increment	2 Increment	3 Increment
1: Peso Proprio	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$
2: accelerazioni orizzontali	$0,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$2,0 \times 10^0$
1: Freedom Case 1	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$
CASES	4 Increment	5 Increment	6 Increment
1: Peso Proprio	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$
2: accelerazioni orizzontali	$3,0 \times 10^0$	$4,0 \times 10^0$	$5,0 \times 10^0$
1: Freedom Case 1	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$	$0,0 \times 10^0$

Anche in questo caso il primo incremento è relativo all'applicazione del solo peso proprio della struttura.

Forza assiale chiodatura - Beam 272



Dal grafico precedente, relativo alla forza assiale nelle chiodature tra stuoiato e centine, si vede che la volta originale e il sistema di rinforzo R1 presentano un identico andamento della tensione. In particolare allo step 35 circa si raggiunge per entrambi il valore della resistenza limite nella chiodatura pari a 100 kg con conseguente sfilamento del chiodo dalla centina di supporto. Il grafico è relativo alla centina centrale, ma un andamento identico, con sfilamento allo stesso step di carico, si ha anche per le 2 centine di fianco a quella centrale. Quindi a quel livello di carico tutto lo strato di intonaco perde la sua unione con il supporto soprastante.

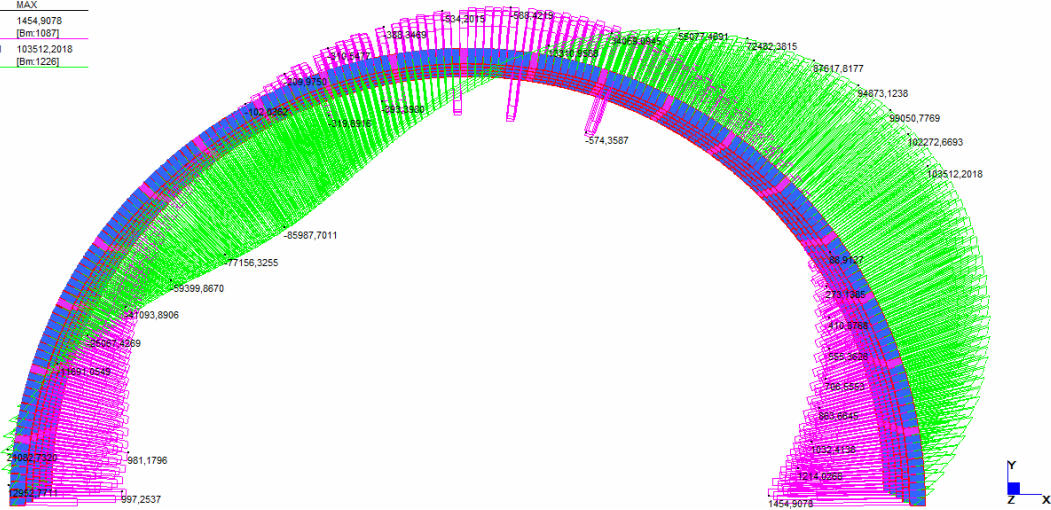
Invece i sistemi R2 e R3, essendo caratterizzati dalle fasce di FRP in corrispondenza delle centine, non arrivano, entro questi incrementi di carico, allo sfilamento, in quanto la fascia di FRP è risvoltata sullo stuoiato ai lati della centine, e quindi funge da ulteriore legame tra le canne e le centine di supporto oltre al chiodo. Per questo non si verifica il distacco del cannuciatto fino al valore di tensione di rottura a trazione dell'adesivo, circa 30 MPa (valore ben lontano dai carichi considerati), che è quello che funge da legante. In questo caso infatti le fibre non presentano nessun ruolo per la resistenza del collegamento.

Per quanto riguarda le centine non rinforzate (volta originale e rinforzo R1) il valore di resistenza limite a trazione considerato è pari a 10 MPa, cautelativo rispetto ad un valore medio ma a favore di sicurezza in quanto il recupero interviene su un legno di cui non si conoscono bene le caratteristiche e lo stato di conservazione. E' necessario eseguire anche le verifiche a taglio nei punti delle connessioni tra 2 centine consecutive, considerando un valore di resistenza pari a 3 MPa.

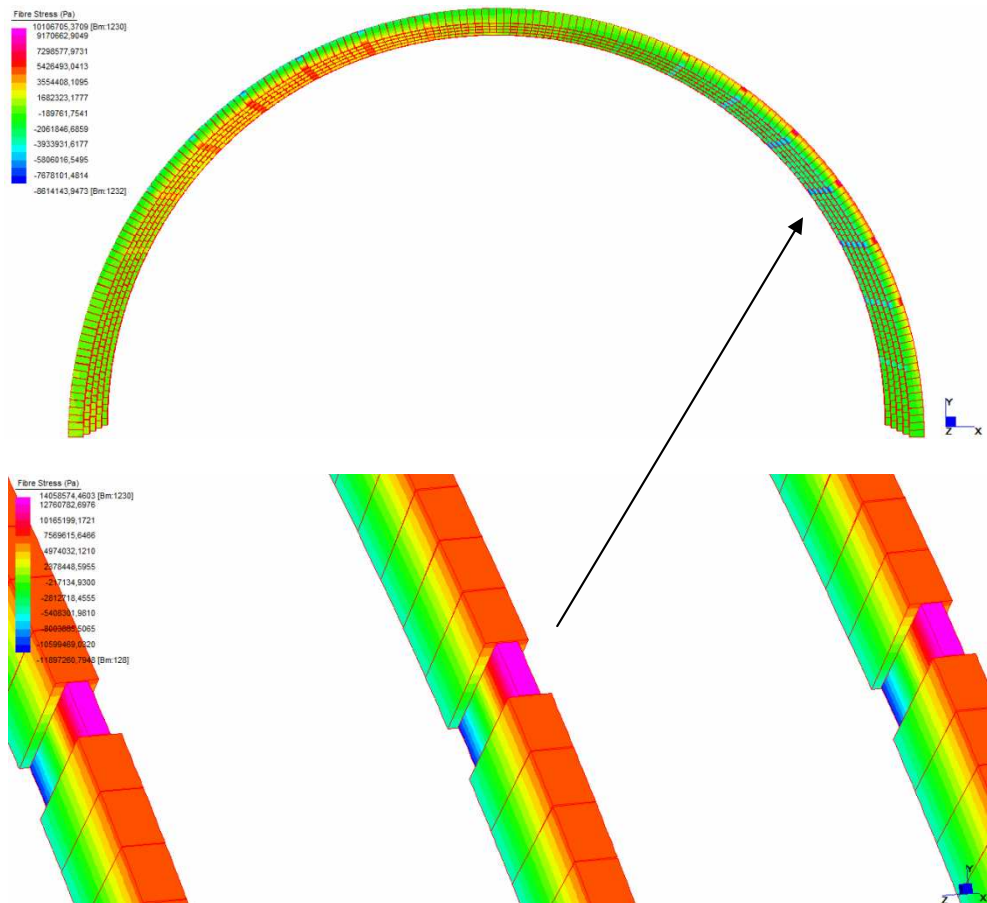
Nei seguenti grafici si riportano i diagrammi del momento e del taglio all'ultimo step dell'analisi incrementale e le conseguenti tensioni che ne derivano, e si esegue la verifica a taglio per ogni singolo modello:

Volta originale

	MIN	MAX
SF2(N)	-622,3229	1454,9078
	[Bm:1390]	[Bm:1037]
BM2(N.cm)	-85987,7011	103512,2018
	[Bm:1578]	[Bm:1226]



Si può vedere come al punto di massima tensione flessionale corrisponde un valore nullo del taglio, di conseguenza nella centina si avranno solo tensioni assiali, il cui andamento è riportato nel seguente diagramma di cui si pone in evidenza il collegamento centina-centina più sollecitato (beam 1230):



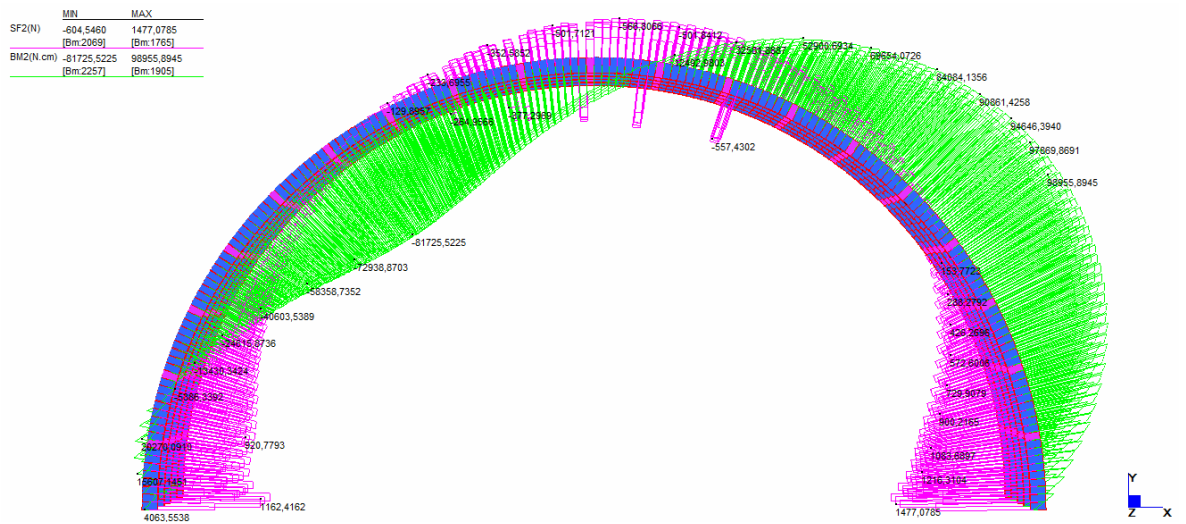
Il valore limite di resistenza del legno a trazione è quindi raggiunto in corrispondenza del collegamento tra le centine a valori di carico inferiori rispetto all'ultimo incremento.

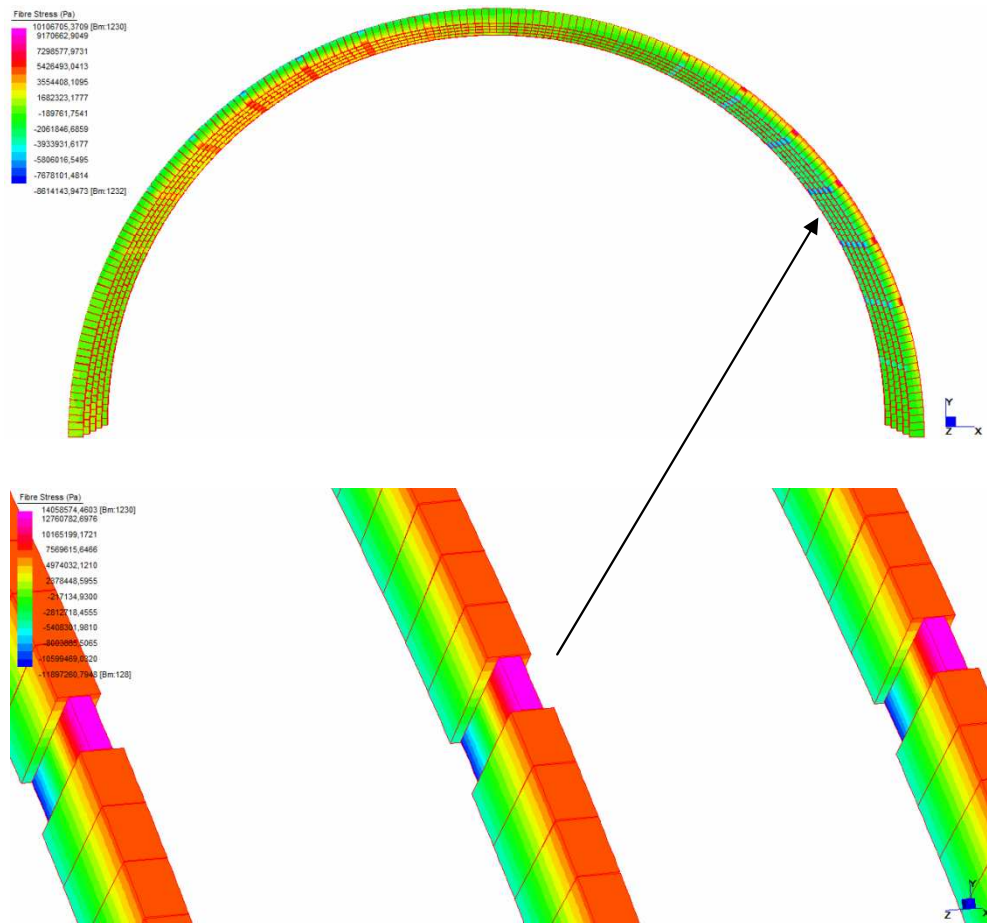
Invece per quanto riguarda il taglio la connessione tra le centine più sollecitata è la prima dalla base della volta, sottoposta ad un valore di taglio di circa 1100 N, da cui:

$$\tau = \frac{T * S}{J * b} = 1,5 \frac{T}{A} = 1,5 \frac{1100N}{3500mm^2} = 0,47 MPa$$

valore inferiore a quello di resistenza a taglio.

Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine R1





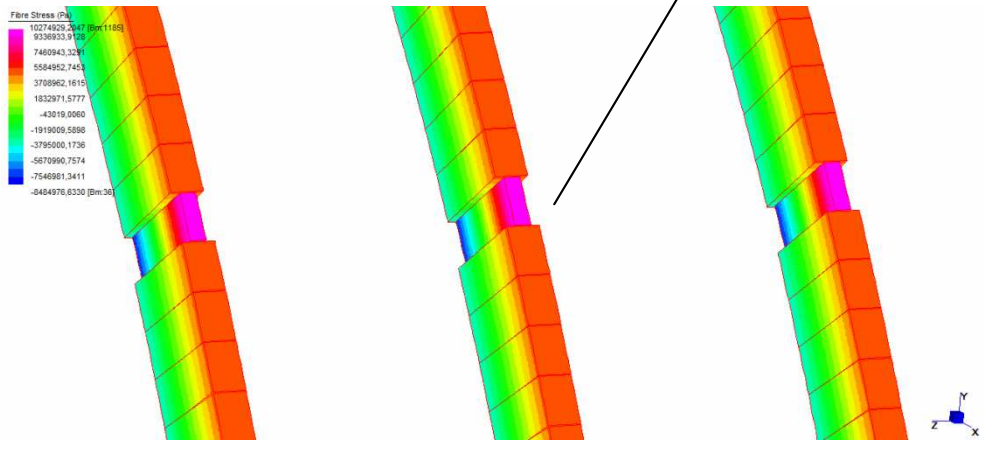
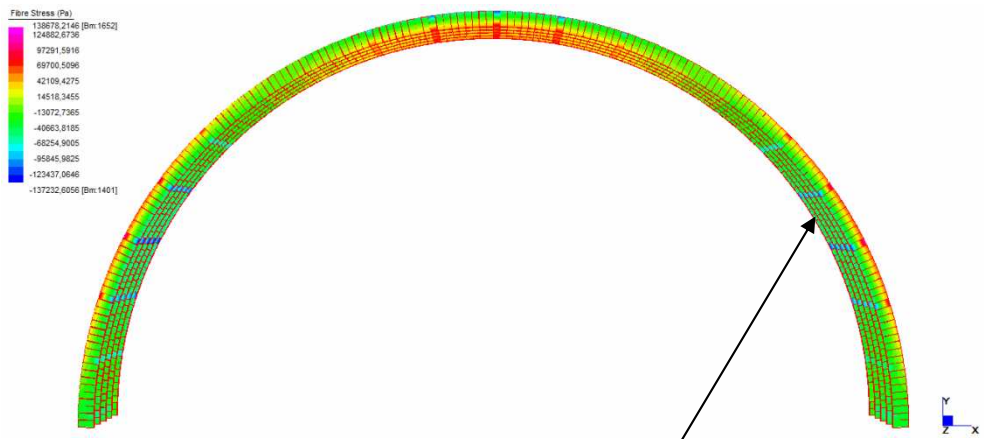
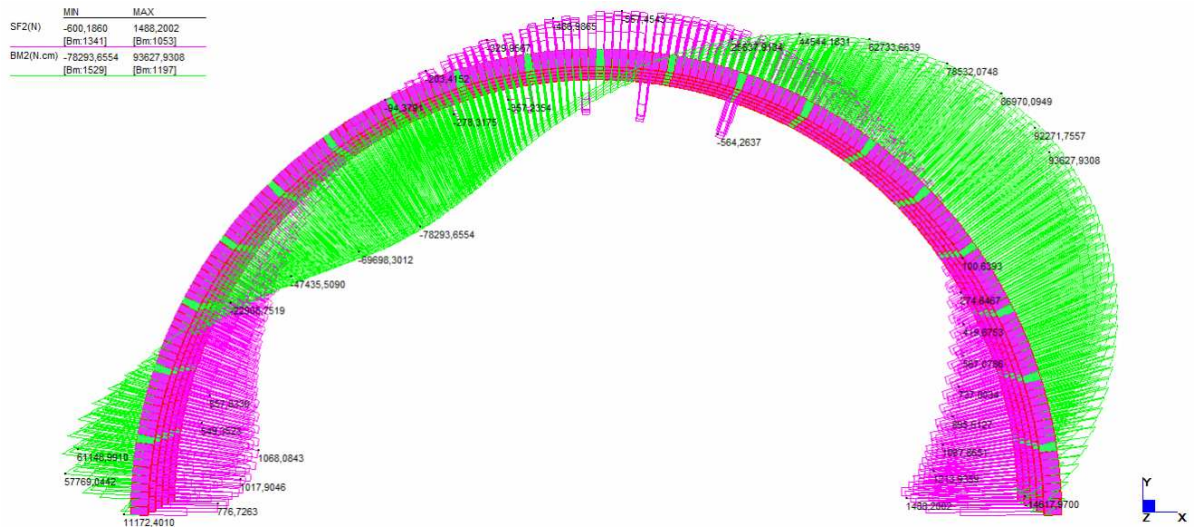
Anche in questo caso il valore limite di resistenza del legno a trazione è raggiunto in corrispondenza del collegamento tra le centine a valori di carico inferiori rispetto all'ultimo incremento.

Allo stesso modo calcoliamo il valore delle tensioni tangenziali date dal taglio nella prima connessione tra le centine dalla base della volta:

$$\tau = \frac{T * S}{J * b} = 1,5 \frac{T}{A} = 1,5 \frac{1100N}{3500mm^2} = 0,47 MPa$$

valore inferiore a quello di resistenza a taglio.

Volta rinforzata con FRP a fasce sulle centine R2



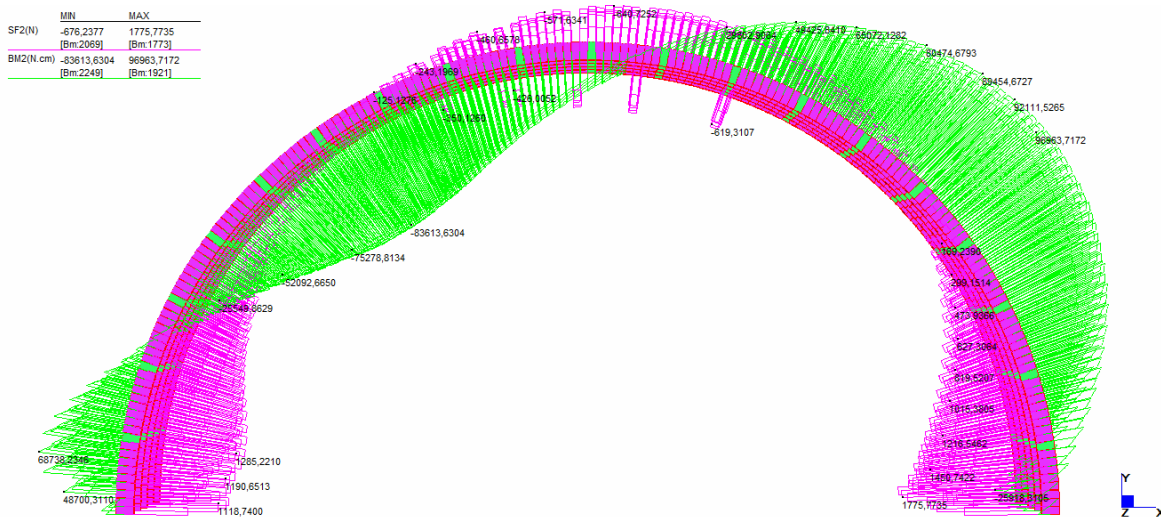
In questo caso, con le centine rinforzate con materiale FRP, il valore limite di resistenza da considerare è quello a delaminazione, valore non raggiunto con gli incrementi di carico utilizzati per l'analisi. Inoltre i valori di trazione e compressione nella centina si mantengono inferiori a quelli limite, con conseguente guadagno in termini di sicurezza ultima.

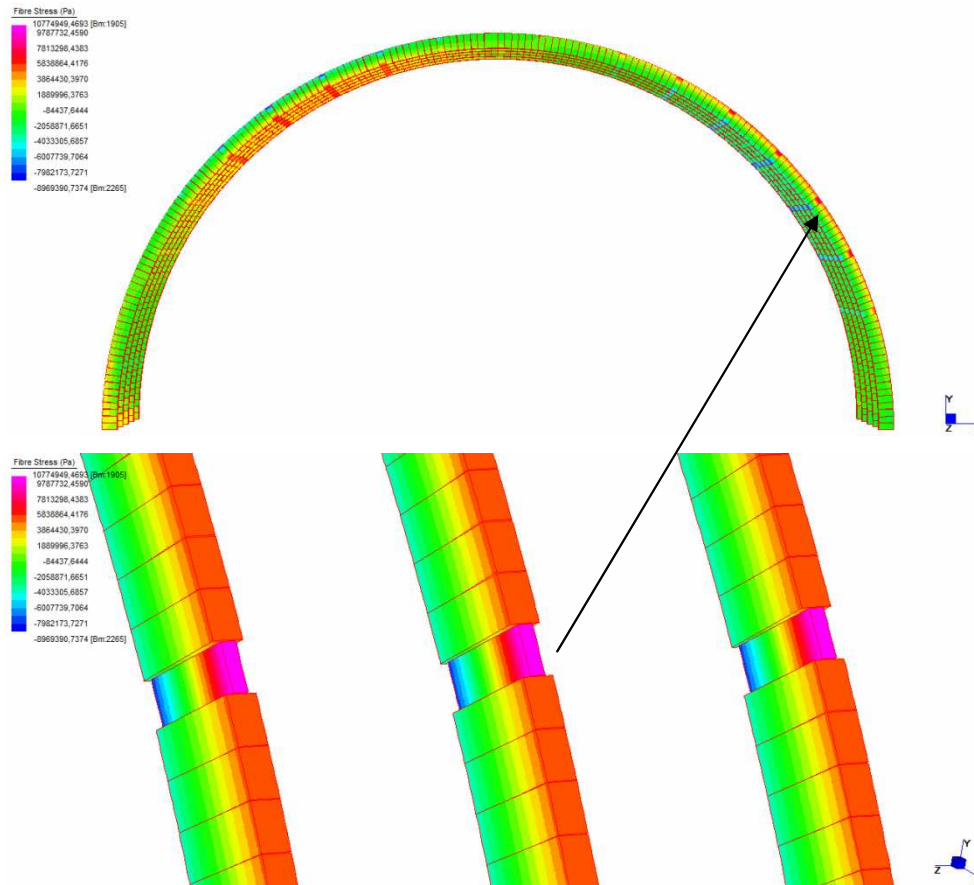
Allo stesso modo calcoliamo il valore delle tensioni tangenziali date dal taglio nella prima connessione tra le centine dalla base della volta:

$$\tau = \frac{T * S}{J * b} = 1,5 \frac{T}{A} = 1,5 \frac{1200N}{3500mm^2} = 0,51 MPa$$

valore inferiore a quello di resistenza a taglio.

Volta rinforzata con FRP a fasce tra le centine e sulle centine R3





Anche in questo caso, il valore limite di resistenza da considerare è quello a delaminazione, valore non raggiunto con gli incrementi di carico utilizzati per l'analisi.

Allo stesso modo calcoliamo il valore delle tensioni tangenziali date dal taglio nella prima connessione tra le centine dalla base della volta:

$$\tau = \frac{T * S}{J * b} = 1,5 \frac{T}{A} = 1,5 \frac{1450N}{3500mm^2} = 0,62 MPa$$

valore inferiore a quello di resistenza a taglio, anche se superiore a quello della volta originale, a causa dell'irrigidimento della centina dovuto alle fasce di FRP.

4. CONCLUSIONI

Nella tabella seguente è riassunta l'evoluzione del comportamento strutturale della volta originale e della volta con i tre tipi di rinforzo all'aumentare dell'accelerazione laterale:

Carico [0,2g]	Volta originale	Volta R1: fasce tra le centine	Volta R2: fasce sulle centine	Volta R3: fasce tra e sulle centine
0,1				
0,2			Formazione fessura alla base	
0,3				
0,4				
0,5				Formazione fessura alla base
0,6				
0,7	Formazione fessura alla base	Formazione fessura alla base		
0,8				Fessura completa
0,9				
1				
1,1				
1,2				
1,3				
1,4				
1,5	Fessura completa	Fessura completa		
2	Sfilamento chiodatura	stuoio-centine		
2,5	Formazione fessura in mezzeria	Formazione fessura in mezzeria		
3			Fessura completa. Formazione fessura in mezzeria	
3,5				Formazione fessura in mezzeria
4	Rottura collegamenti centine			
5				

La volta originale presenta un comportamento in cui le canne, e quindi anche l'intonaco, sono appese alle soprastanti centine. Il basso grado di rigidità dato dal collegamento con un solo chiodo fa sì che le canne possano ruotare rispetto alle centine seguendone così l'abbassamento senza riceverne troppi sforzi. Inoltre le canne, possono distendersi nella direzione

ad esse trasversale e quindi l'intonaco risulta parzialmente indipendente dalla sovrastruttura di supporto. L'accelerazione laterale arriva così smorzata allo strato di malta.

Con il sistema di rinforzo R1 a fasce tra le centine il comportamento è molto simile all'originale. Invece i rinforzi R2 e R3 comportano un irrigidimento delle centine e quindi del sistema in generale, in quanto vengono limitate le possibilità di adattamento allo spostamento dei vari collegamenti: oltre che tra centine, in particolare tra stuoiato e centine e tra canne e intonaco. Di conseguenza l'innescarsi della fessurazione in direzione longitudinale nell'intonaco avviene a carichi minori, sempre alla base della volta e in corrispondenza delle centine. Una volta innescata la fessura tende ad estendersi sempre più allargandosi verso lo spazio libero tra una centina all'altra, fino ad unirsi con le corrispondenti fessure provenienti dalle centine contigue. A questo punto il processo di fessurazione è completato ed esteso all'intera base della volta. Questa fessura poi si combina con quelle che si formano in direzione trasversale alla volta che tendono a salire verso il centro della volta stessa, partendo anche queste dal punto in cui le canne sono inchiodate alle soprastanti centine.

Il processo di innesco della prima fessura è più rapido con il sistema di rinforzo R2 che con il sistema R3, però la formazione completa avviene a carichi maggiori, 0,6g contro 0,16g.

Anche nella mezzeria della volta vi è la formazione di fessure in direzione longitudinale, ma per valori molto simili di accelerazione laterale per tutte e quattro le volte.

Ad un valore di accelerazione pari a 0,4g nella volta originale e in quella con rinforzo R1 si ha il primo distacco della chiodatura che collega stuoiato e centine. Di conseguenza viene meno il supporto per l'intonaco e si innesca il distacco dello strato di canne e malta dalla struttura di supporto, così come è possibile vedere dai resti in loco della volta del caso di studio, che si presenta con molti frammenti di camorcanna a terra e lo scheletro

della volta rimasto a sovrastare la navata. Per la volta rinforzata R1 non si ha quindi nessun beneficio per quanto riguarda il carico che porta al distacco dell'intonaco; invece un notevole miglioramento si ha per le volte R2 e R3 per le quali, grazie all'irrigidimento delle chiodature dato dalle fasce sulle centine, non si registra questo fenomeno per nessun valore dell'analisi incrementale.

Per valori ancora maggiori di carico (0,8g), nella volta originale il processo successivo di rottura è quello che coinvolge le chiodature tra le centine. Queste infatti presentano punti deboli proprio nei collegamenti tra di esse, e una volta raggiunto il livello di resistenza del legno è qui che si ha la rottura, elastica se a trazione e semi-plastica se a compressione, con la formazione di cerniere e quindi un meccanismo quando le cerniere sono in un numero sufficiente (due cerniere si formano all'interno dell'arco e altre 2 semi cerniere si hanno alla base della volta). Per il sistema R1 la rottura nelle centine si presenta allo stesso valore di carico, a riprova che tale metodo di rinforzo ricalca molto bene il comportamento strutturale della volta originale con nessun beneficio apportato alla sicurezza globale. Invece per le volte rinforzate R2 e R3, al valore massimo di carico dell'analisi incrementale non si registra rottura dei collegamenti delle centine, che si presentano avvolte dalle strisce di FRP. Non è stato raggiunto neanche il valore limite di resistenza a taglio, nel qual caso sarebbero dovuti essere utilizzati dei cavallotti in FRP per fornire resistenza a taglio.

Alla luce di tali considerazioni si può ritenere come più soddisfacente dal punto di vista della sicurezza strutturale il metodo di rinforzo R2, cioè con le fasce in FRP stese sulle centine: è garantita infatti la sicurezza verso il crollo della volta per alti valori di accelerazione laterale e, allo stesso tempo, la salvaguardia dell'intonaco che, ricordiamo, nella maggior parte delle volte in camorcanne presenti in chiese, teatri e dimore storiche, si presenta decorato e dipinto e quindi da salvare.

5. BIBLIOGRAFIA

QUAGLIARINI,D'ORAZIO, *Recupero e conservazione di volte in camorcanna*, Alinea editrice, 2005

QUAGLIARINI,LENCI, *Il plafone del teatro dei filarmonici di Ascoli Piceno*, Alinea editrice, 2010

POZZATI, DIOTALLEVI, ZARRI, *Teatro comunale di Bologna: consolidamento della copertura e del soffitto della grande sala*, estratto da INARCOS n.427-aprile 1982

I materiali compositi fibrosi a matrice polimerica (FRP) - Dispensa didattica per l'insegnamento di Meccanica dei materiali innovativi - Prof. Giovanni Pascale, Università di Bologna

Documento CNR-DT 200/2004, *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*

Documento CNR-DT 201/2005, *Istruzioni per interventi di consolidamento statico di strutture lignee mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*