



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
A.A. 2020/2021
Sessione di Laurea Dicembre 2021

**Confinamento di colonne murarie e in
calcestruzzo mediante sistemi
compositi FRP e FRCM**

Relatore:

Ch.mo prof. Alessia Monaco

Correlatore:

Ch.mo prof. Francesco Tondolo

Candidato:

Gulizia Giovanni

Matricola n. s266534

INDICE

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE	5
1.1 PROBLEMATICHE STRUTTURALI DI COLONNE CALCESTRUZZO E IN MURATURA	5
1.2 TECNICHE DI RINFORZO TRADIZIONALI E INNOVATIVE	8
1.3 OBIETTIVI DELLA TESI	20
2. MODELLI ANALITICI PER LA PREVISIONE DELLA RESISTENZA CONFINATA.....	21
2.1 CONFINAMENTO DI COLONNE IN CALCESTRUZZO MEDIANTE SISTEMI FRP	21
2.1.a SPOELSTRA AND MONTI (1999).....	21
2.1.b CAMPIONE AND MIRAGLIA (2003)	22
2.1.c CIRCOLARE CNR DT 200 R1 (2013)	23
2.2 CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA MEDIANTE SISTEMI FRP	26
2.2.a KREVAIKAS AND TRIANTFILLOU (2005).....	26
2.2.b DI LUDOVICO ET AL. (2010).....	27
2.2.c CIRCOLARE CNR DT 200 R1 (2013)	27
2.3 CONFINAMENTO DI COLONNE IN CALCESTRUZZO MEDIANTE SISTEMI FRCM.....	30
2.3.a COLAJANNI ET AL. (2014)	30
2.3.b NORMATIVA ACI549-4R (2013)	31
2.3.c CIRCOLARE CNR DT215 (2018).....	32
2.4 CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA MEDIANTE SISTEMI FRCM	32
2.4.a BALSAMO ET AL. (2018).....	33
2.4.b CIRCOLARE CNR DT 215 (2018).....	34
2.4.c NORMATIVA ACI 549-6R (2020)	36
3. DATABASE SPERIMENTALE	37
3.1 CONFINAMENTO DI COLONNE IN CALCESTRUZZO MEDIANTE FRP	37
3.1.a SILVA AND RODRIGUES (2006).....	37
3.1.b CAMPIONE ET AL. (2015)	39
3.1.c DONNINI ET AL. (2019)	41
3.2 CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA MEDIANTE FRP	43
3.2.a SNEED ET AL. (2017).....	43
3.2.b KOUTAS ET AL. (2020).....	44
3.2.c THEOFANIS ET AL. (2015).....	46
3.3 CONFINAMENTO DI COLONNE IN CALCESTRUZZO MEDIANTE FRCM	48
3.3.a TRAPKO ET AL. (2014).....	48
3.3.b COLAJANNI ET AL. (2014)	51
3.3.c DONNINI ET AL. (2019)	53
3.4 CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA MEDIANTE FRCM.....	55
3.4.a CASCARDI ET AL. (2018).....	55
3.4.b CARLONI ET AL. (2015)	56
3.4.c FOSSETTI ET AL. (2016).....	58

4. VALIDAZIONE DEI MODELLI ANALITICI	60
4.1 CONFRONTO TEORICO-SPERIMENTALE PER CAMPIONI CONFINATI CON FRP	61
4.1.a VALIDAZIONE SU COLONNE IN CALCESTRUZZO	61
4.1.b VALIDAZIONE SU COLONNE IN MURATURA	81
4.2 CONFRONTO TEORICO-SPERIMENTALE PER CAMPIONI CONFINATI CON FRCM.....	97
4.2.a VALIDAZIONE SU COLONNE IN CALCESTRUZZO	97
4.2.b VALIDAZIONE SU COLONNE IN MURATURA	118
4.3 OSSERVAZIONI.....	135
5. ANALISI PARAMETRICA E CONFRONTO TRA I MODELLI	136
5.1 CONFINAMENTO MEDIANTE SISTEMI FRP	136
5.1.a INFLUENZA DELLA RIGIDEZZA DELLE FIBRE	138
5.1.b INFLUENZA DEL NUMERO DI STRATI DI RINFORZO	140
5.1.c INFLUENZA DEL RAPPORTO VOLUMETRICO DELLE FIBRE	142
5.1.d INFLUENZA DELLA PRESSIONE LATERALE DI CONFINAMENTO EFFICACE	144
5.1.e INFLUENZA DELLA RESISTENZA DEL MATERIALE NON CONFINATO	146
5.2 CONFINAMENTO MEDIANTE SISTEMI FRCM	148
5.2.a INFLUENZA DELLA RIGIDEZZA DELLE FIBRE	151
5.2.b INFLUENZA DEL NUMERO DI STRATI DI RINFORZO	153
5.2.c INFLUENZA DEL RAPPORTO VOLUMETRICO DELLE FIBRE	155
5.2.d INFLUENZA DELLA PRESSIONE LATERALE DI CONFINAMENTO EFFICACE	156
5.2.e INFLUENZA DELLA RESISTENZA DEL MATERIALE NON CONFINATO	158
5.2.f INFLUENZA DELLA RESISTENZA DELLA MATRICE	159
5.2.g INFLUENZA DELLO SPESSORE DELLA MATRICE	161
6. OSSERVAZIONI DI PROGETTO SULLE STRATEGIE DI INTERVENTO	164
6.1 PRESTAZIONI MECCANICHE DI COLONNE IN CALCESTRUZZO CONFINATE MEDIANTE FRP VS FRCM	164
6.2 PRESTAZIONI MECCANICHE DI COLONNE IN MURATURA CONFINATE MEDIANTE FRP VS FRCM	167
6.3 EFFICACIA DEL RINFORZO MEDIANTE FRP SU COLONNE IN CALCESTRUZZO VS MURATURA.....	170
6.4 EFFICACIA DEL RINFORZO MEDIANTE FRCM SU COLONNE IN CALCESTRUZZO VS MURATURA.....	173
7. CONCLUSIONI	177
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	

SOMMARIO

La tesi ha per oggetto il confinamento di colonne murarie e in calcestruzzo realizzato mediante l'impiego di materiali compositi denominati *Fiber Reinforced Polymers (FRP)* e *Fabric Reinforced Cementitious Matrices (FRCM)*. L'obiettivo principale è quello di riuscire a fornire informazioni di carattere progettuale riferite al tema del rinforzo e consolidamento strutturale delle costruzioni esistenti, con particolare riferimento alle colonne in muratura e in calcestruzzo caricate assialmente. Negli ultimi decenni, infatti, si è riscontrata una chiara tendenza nell'incrementare gli investimenti nella riabilitazione delle strutture esistenti; a partire dal 2005, in Italia, gli investimenti sul patrimonio costruito esistente hanno superato quelli destinati al settore delle nuove costruzioni.

Nell'ambito di questa tesi, vengono confrontate due delle principali tecniche di rinforzo strutturale attualmente impiegate nel settore della riabilitazione strutturale e studiate dalla comunità scientifica internazionale: i sistemi *FRP* e *FRCM* con riferimento al confinamento di colonne per l'incremento della loro resistenza e duttilità locale.

La prima tecnica, ovvero il confinamento mediante sistemi *FRP*, viene eseguita disponendo delle fibre di rinforzo in direzione perpendicolare all'asse longitudinale della colonna, garantendo l'adesione al substrato mediante utilizzo di una matrice organica come, ad esempio, la resina epossidica. In questo modo viene generato un confinamento passivo nell'elemento strutturale rinforzato, ossia un confinamento che si attiva quando il nucleo del materiale inizia a dilatarsi a causa dell'applicazione di carichi esterni come conseguenza dell'effetto *Poisson* e della sua fessurazione.

La seconda tecnica trattata, ovvero il confinamento mediante sistemi *FRCM*, consiste invece nell'applicazione di reti di fibre di rinforzo adese al substrato mediante l'impiego di matrici inorganiche, come malta di calce o malta cementizia. I sistemi *FRCM* presentano numerosi vantaggi rispetto ai sistemi *FRP* quali, ad esempio, la resistenza al fuoco, una buona compatibilità chimico-fisica con il substrato, un impatto ridotto in termini di dimensioni, rigidità e peso, e possibilità di reversibilità dell'intervento.

Nell'ambito della presente tesi, vengono analizzate le principali caratteristiche di tali tecniche di rinforzo, attraverso la disamina dei risultati di prove sperimentali su provini di calcestruzzo e muratura disponibili nella letteratura scientifica sul tema. Vengono inoltre indagati i modelli di letteratura e le espressioni normative maggiormente accreditati per la previsione della resistenza a compressione e della deformazione ultima di colonne in calcestruzzo e in muratura confinate e caricate assialmente. Al fine di confrontare le due tecniche di rinforzo, viene sviluppata un'analisi parametrica valutando l'influenza dei principali fattori che governano l'efficacia del confinamento: rigidità delle fibre, numero degli strati di rinforzo, rapporto volumetrico delle fibre, pressione laterale di confinamento efficace, resistenza del materiale non confinato, proprietà meccaniche delle matrici di rinforzo.

I risultati ottenuti dall'analisi parametrica, consentono infine di formulare alcune osservazioni progettuali relative alla scelta della migliore strategia di intervento da adottare a seconda del livello di confinamento che è necessario conseguire nell'ambito del progetto di riabilitazione strutturale.

La tesi, presenta l'articolazione riportata nel seguito:

Nel capitolo 1, vengono descritte le diverse modalità di crisi delle colonne e le differenti tecniche di rinforzo adottabili che vedono l'applicazione di sistemi compositi *FRP* e *FRCM*.

Nel capitolo 2, vengono individuati e descritti i diversi modelli analitici presenti in letteratura e le diverse espressioni normative, riguardanti il tema del confinamento, che saranno utili per lo svolgimento delle indagini analitiche oggetto della presente tesi.

Nel capitolo 3, vengono illustrati alcuni articoli scientifici a carattere sperimentale presi in considerazione come riferimento, in cui vengono mostrati i risultati di prove di compressione uniassiale su provini in muratura e in calcestruzzo.

Nel capitolo 4, i dati sperimentali di riferimento vengono interpretati attraverso i modelli analitici, a seconda della tipologia di confinamento, in modo da calcolare i valori teorici della resistenza cilindrica e della deformazione ultima dei provini confinati, e permettere una comparazione con i corrispettivi risultati sperimentali.

Nel capitolo 5, viene sviluppata un'analisi parametrica, finalizzata alla valutazione dell'influenza di alcuni parametri geometrici e meccanici significativi nell'andamento della previsione teorica del valore della resistenza confinata fornita dai modelli analitici. In particolare, i parametri indagati sono: la rigidità della fibra, il numero di strati del rinforzo, il rapporto volumetrico delle fibre, la pressione efficace di confinamento laterale e la resistenza cilindrica iniziale del provino. Inoltre, relativamente al confinamento realizzato mediante *FRCM*, vengono analizzati anche la rigidità e lo spessore della matrice del rinforzo.

Nel capitolo 6, si procede alla comparazione delle diverse strategie di intervento, in termini prestazionali, utilizzando le previsioni teoriche fornite dai modelli analitici che avevano mostrato di fornire i risultati più accurati nel confronto sperimentale, a seconda del tipo di materiale e rinforzo. Nella prima fase di tale processo di comparazione, si confrontano le prestazioni delle due tipologie di sistemi di rinforzo, a parità di materiale da rinforzare. Successivamente, si monitora la risposta della muratura e del calcestruzzo per fissata tipologia di rinforzo.

Infine, nel capitolo 7, vengono tracciate le conclusioni, mettendo in evidenza l'efficacia dei modelli teorici analizzati, le formulazioni più accurate per la previsione dell'incremento di capacità portante e duttilità locale delle colonne rinforzate, e la stima delle migliori prestazioni meccaniche conseguibili a seconda del tipo di materiale da rinforzare e della tecnica di rinforzo impiegato.

1. INTRODUZIONE

1.1 PROBLEMATICHE STRUTTURALI DI COLONNE CALCESTRUZZO E IN MURATURA.

Negli ultimi decenni, si è assistito alla crescente necessità di ricorrere a riparazioni e rinforzi di edifici esistenti, per via dello stato di avanzamento dei fenomeni di invecchiamento o per problemi legati ad un design obsoleto delle costruzioni, le quali non riescono più a garantire livelli adeguati di prestazioni meccaniche alla luce delle prescrizioni di sicurezza più attuali. L'esperienza relativa ai terremoti del passato verificatisi in Italia, ha portato ancora di più alla luce l'importanza di tali problematiche, avendo provocato nel patrimonio costruito esistente gravi crolli e danni irreversibili che hanno rappresentato un forte rischio per la vita e per la sicurezza delle strutture.

Per le colonne in calcestruzzo e in muratura, i deficit meccanici possono influenzare l'efficienza prestazionale e la durata nel tempo dell'intera struttura.

Le modalità di crisi relative alle colonne in calcestruzzo armato, sono dovute principalmente a:

- basso valore di resistenza dei materiali;
- scarsa rigidità dei nodi che non vanno a trasferire in modo adeguato le sollecitazioni convergenti (**Figura 1**);
- carenza di un'adeguata armatura trasversale (numero e/o passo delle staffe) (**Figura 2**);
- duttilità della sezione e dell'intera struttura limitata (**Figura 3**).



Figura 1_ Collasso strutturale dei nodi

(<https://strutturisti.files.wordpress.com/2009/04/nodo-trave-pilastro-3.jpg?w=584> e <https://webapi.ingenio-web.it/immagini/file/16819>)



Figura 2_ Instabilizzazione per svergolamento dell'armature longitudinali
(<https://www.ingegneri.cc/wp-content/uploads/2019/08/Rinforzo-pilastri-3.jpg>)



Figura 3_ Rottura per meccanismo per “piano soffice “

(<https://strutturisti.wordpress.com/files/2009/04/reluis-piano-soffice-2.jpg?w=640> e
<https://www.tafterjournal.it/wp-content/uploads/2012/07/foto14.jpg>)

Per elementi realizzati in muratura, invece le principali modalità di crisi, più ricorrenti possono essere:

- Rottura per schiacciamento (**Figura 4**);
- Meccanismi di *Modo 1*, dove le forze sismiche agiscono in direzione ortogonale rispetto al piano medio della parete (**Figura 5**);

- Meccanismi di *Modo 2*, dove le forze sismiche agiscono in direzione ortogonale rispetto al piano medio della parete (**Figura 6**);



Figura 4_ Rottura per schiacciamento di una colonna in muratura



Figura 5_ Ribaltamento di una porzione di parete non ammortata in modo sufficiente

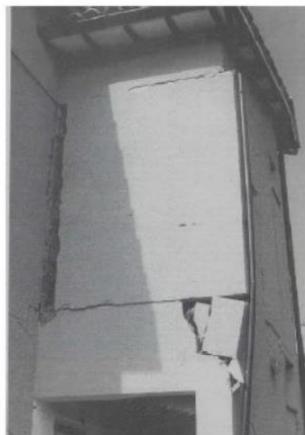


Figura 6_ Rottura di un maschio murario per via di azione sismica applicata parallelamente al piano

Questi deficit strutturali, comportano un livello di resistenza e di duttilità inadeguati per i compiti da adempiere. Tale aspetto, risulta essere ancora più gravoso nella casistica di un edificio esistente realizzato mediante una progettazione remota, dove l'aspetto sismico non veniva considerato. Chiaro esempio di ciò, risulta essere il dimensionamento dei pilastri che prevedeva l'applicazione delle sole sollecitazioni assiali derivanti dai carichi presenti nell'area di influenza e del peso proprio delle tamponature che andavano a gravare su travi collegate, a loro volta, sui pilastri. Questo metodo risultava essere troppo semplificato e a sfavore di sicurezza, in quanto non venivano chiamate in causa le azioni flessionali e di taglio trasmesse dai solai e dalle travi ai pilastri stessi.

Conseguenza di tale progettazione, risulta essere il sottodimensionamento delle armature dei pilastri, dove i ferri sono troppo distanziati dalle estremità delle travi e facendo ricadere il taglio su staffe non conformi al soddisfacimento di tale compito in quanto erano dimensionate con criteri minimi. Ulteriore elemento sfavorevole, risultava essere una sottovalutazione del comportamento post-elastico, comportando l'insorgere di fenomeni di instabilizzazione da parte delle barre longitudinali e, quindi, di meccanismi fragili.

Con l'emanazione degli aggiornamenti delle normative tecniche per le costruzioni, si ha una ricerca di nuove tecniche di rafforzamento dei vari elementi strutturali mediante un loro incremento in termini di resistenza e di duttilità.

Nell'ambito del rinforzo strutturale di pilastri e colonne in generale, trattato in modo esclusivo nella seguente tesi, l'intervento di confinamento laterale va a precludere un possibile spianciamento degli elementi verticali comportando, così, l'aumento delle caratteristiche meccaniche citate in precedenza.

Grazie alla disponibilità di teorie e formulazioni per la verifica ed il progetto di interventi di rinforzo, è possibile valutare diverse strategie per il miglioramento delle prestazioni meccaniche di edifici esistenti con particolare riferimento all'incremento della capacità portante e della duttilità locale di colonne caricate assialmente con azioni centrate rispetto al loro asse.

Nell'ambito della seguente tesi, si descrivono le tecniche di rinforzo che hanno riscontrato più popolarità negli ultimi decenni, che vedono l'adozione di sistemi compositi, ossia:

- Rinforzo tramite l'uso di sistemi *FRP*;
- Rinforzo tramite l'uso di sistemi *FRCM*.

Tali tecniche verranno anche brevemente confrontate con i metodi di confinamento più tradizionali consistenti nell'incamiciatura metallica delle colonne, che però risultano estremamente invasivi e tecnologicamente molto onerosi, tanto da avere ormai lasciato il passo ai più innovativi materiali compositi che verranno analizzati in dettaglio in questa tesi.

1.2 TECNICHE DI RINFORZO TRADIZIONALI E INNOVATIVE

Per riuscire a compensare le carenze strutturali da parte delle diverse opere realizzate con indicazioni progettuali più remote, sono state adottate diverse tecniche che vedono prima la presa in considerazione di elementi in carpenteria metallica (come piastre, angolari e calastrelli) e poi dei materiali compositi (*FRP* e *FRCM*).

Quest'ultima macrofamiglia, ha riscosso un enorme successo e popolarità nel campo edilizio, con i sistemi *FRP* e *FRCM* quali risultano essere quelli più conosciuti ed utilizzati.

Gli *FRP*, *Fiber Reinforced Polymers*, fanno parte della famiglia dei compositi e risultano essere costituiti da una matrice polimerica di natura organica, nella quale viene annegato un rinforzo di tipo fibroso con ottimo comportamento meccanico. La scelta di tale elemento, risulta essere in funzione delle condizioni ambientali alle quali sarà esposto il rinforzo e della sua tipologia di applicazione.

Le fibre, presentando un'ottima resistenza a trazione, vanno ad assorbire l'aliquota maggiore in caso di applicazione di sollecitazione di trazione o di flessione, mentre la matrice ha il solo compito di riuscire a distribuire al meglio le sollecitazioni tra le diverse fibre. La resina ha la funzione di protezione delle fibre dall'usura e di garantire l'allineamento delle diverse di esse. I materiali *FRP* hanno comportamento perfettamente elastico lineare fino alla rottura.

Parlando dei sistemi *FRCM*, *Fabric Reinforced Cementitious Matrices*, consiste invece nell'applicazione di reti di fibre di rinforzo adese al substrato mediante l'impiego di matrici inorganiche, come malta di calce o malta cementizia. I sistemi *FRCM* presentano numerosi vantaggi rispetto ai sistemi *FRP* quali, ad esempio, la resistenza al fuoco, una buona compatibilità chimico-fisica con il substrato, un impatto ridotto in termini di dimensioni, rigidità e peso, e possibilità di reversibilità dell'intervento. Tali compositi vengono denominati anche *TRC* (Textile Reinforced Concrete), *TRM* (Textile Reinforced Mortars) o anche *IMG* (Inorganic Matrix-Grid composites).

INCAMICIATURA PER COLONNE IN CEMENTO ARMATO Il rinforzo di elementi in cemento armato, quale vede l'uso di elementi in carpenteria metallica, fu sviluppato negli anni '60 in Svizzera e Germania. Questa tecnica di rinforzo viene principalmente applicata a pilastri per raggiungere i seguenti obiettivi:

- Incremento della resistenza a taglio;
- Incremento della capacità deformativa e quindi di duttilità;
- Miglioramento dell'efficienza delle giunzioni per sovrapposizione;
- Incremento della capacità portante.

Tale tecnica vede la presa in considerazione di elementi angolari in carpenteria metallica, quali tendono ad essere incollati sull'elemento strutturale tramite delle resine epossidiche. Tali possono essere commercializzate sottoforma di piastre, profilati o elementi realizzati ad hoc.

Questa tipologia di rinforzo, viene considerata "passiva", cioè che tale entra in funzione quando l'elemento in calcestruzzo armato tende a spacciare come conseguenza di applicazioni di carichi addizionali che non sono stati previsti nella fase di progettazione. Inoltre, tali elementi vengono posizionati in corrispondenza delle fibre tese, in modo da incrementare la resistenza flessionale dell'elemento.



Figura 7_ Incamiciatura dei pilastri in c.a. tramite angolari e calastrelli

(<https://www.soft.lab.it/wp-content/uploads/2021/01/Copertina-Big-2-890x400.jpg>)

Un problema pratico nelle applicazioni di tale metodologia, risulta essere il loro peso elevato e la limitazione della lunghezza delle singole piastre per garantire semplicità nella loro manipolazione.

L'installazione degli angolari sul pilastro esistente, può avvenire mediante diretta applicazione degli stessi sull'elemento strutturale (**Figura 8**) (la faccia del pilastro è a diretto contatto con l'elemento di rinforzo metallico), oppure in maniera indiretta, dove si registra l'interposizione di uno strato di malta tra il rinforzo e l'elemento da rinforzare (**Figura 9**). Da notare, che la determinazione dell'aliquota effettivamente assorbita dall'elemento metallico, risulta essere un processo molto più accurato e complesso rispetto alla situazione di diretto contatto. Infatti, in tale caso, la capacità di assorbimento del carico da parte del rinforzo, dipende essenzialmente dalla pressione di confinamento, dalla coesione e dall'attrito tra i diversi materiali compartecipanti. Invece, la variante che presenta l'iterazione diretta tra le piastre e l'elemento strutturale, è una tecnica assai difficile, in quanto i due elementi devono essere perfettamente connessi tra loro. Per tale ragione, si sceglie molto spesso di inserire uno strato di malta proprio per migliorare l'aderenza tra le due superfici. Vista la difficoltà nella determinazione della porzione di sollecitazione assorbita da parte rinforzo, l'incremento di capacità portante, sia per compressione che per flessione, viene trascurato e si va considerare un incremento di resistenza dovuto essenzialmente all'effetto del confinamento.



Figura 8_ Incamiciatura dei pilastri in c.a. tramite angolari e calastrelli a diretto contatto con faccia del pilastro

(<https://www.soft.lab.it/wp-content/uploads/2021/01/Copertina-Big-2-890x400.jpg>)



Figura 9_ Incamiciatura del pilastro tramite angolari e calastrelli con aggiunta di malta

(https://media.lavorincasa.it/post/6/5266/data/Pilastri_con_struttura_005.jpg)

INCAMICIATURA PER COLONNE IN MURATURA Il rinforzo per gli edifici storici in muratura, rappresenta un problema che si può e si deve risolvere con delle tecniche quali non vanno a snaturare l'edificio dai suoi aspetti caratterizzanti. Ciò ha comportato la necessità di individuare metodi in grado di fornire incrementi significativi alla sicurezza dell'edificio, senza comportare alcuna variazione tipo di estetico ed architettonico della struttura.

La tecnica della cerchiatura, ad esempio, vede la circoscrizione degli elementi strutturali tramite elementi in carpenteria metallica, quali riescono a limitare lo spanciamento del pilastro e garantire un suo miglior comportamento globale (**Figura 10**).



Figura 10_ Incamiciatura di un pilastro in muratura tramite delle fasce di acciaio

Le cerchiature, quali vedono l'uso di fasce in acciaio, vengono considerati come rinforzi attivi, in quanto si va ad applicare un'azione di confinamento mediante azione di bulloni o, più anticamente, tramite dei cunei, previo riscaldamento del cerchio.

Una variante di tale tipologia di rinforzo, è stata applicata nel 2005 nell'ex Monastero di San Michele a Lonate Pozzolo. Qui, si presenta esclusivamente una fascia metallica, senza però la presenza dei vari elementi di serraggio comportando un risultato estetico migliore. Tale versione della tecnica di rinforzo, vede l'installazione di due semi-anelli quali vengono saldati e resi attivi una volta che viene iniettata della malta espansiva nell'intercapedine tra il rinforzo e la colonna. (**Figura 11**)



Figura 11_ Incamiciatura di un pilastro in muratura tramite uso di semi-anelli metallici

Alcuni progettisti, hanno eseguito la cerchiatura di colonne in mattoni faccia a vista con un metodo che fa uso di bandelle esterne in acciaio di limitato spessore e di facile installazione (**Figura 12**). Tale tecnica, però, non permette la presenza di mattoni a vista, e quindi si necessita dell'applicazione di uno strato aggiuntivo di intonaco quale consente anche una protezione degli elementi da possibili sbalzi termici.



Figura 12_ Incamiciatura di un pilastro in muratura tramite delle bandelle esterne

Infine, è bene ricordare un'ulteriore tecnica di cerchiatura, ossia quella "interna", quale prevede l'installazione di barre (in acciaio, titanio, fibra di vetro, ecc.) inghisate alla colonna mediante presenza di perforazioni diametrali (**Figura 13**).

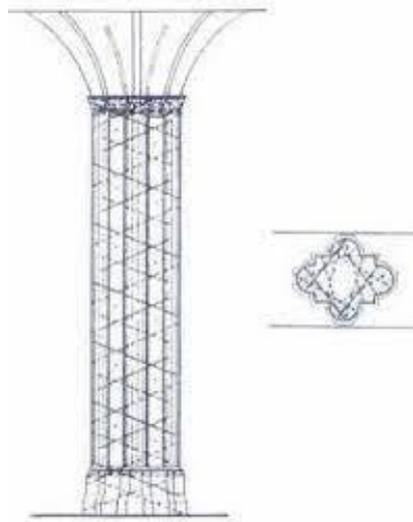


Figura 13_ Cerchiatura interna di un pilastro in muratura tramite delle barre in acciaio

L'impatto visivo di questo intervento, denominato cuciture armate, è particolarmente ridotto.

Infine, nel 2009, si è fatta largo una nuova tecnica di cerchiatura quale vede l'uso di cavi circolari di piccolo spessore inseriti nei giunti di malta (**Figura 14**).



Figura 14_ Cerchiatura del pilastro in muratura tramite uso di cavi circolari in acciaio

CONFINAMENTO DI PILASTRI IN CEMENTO ARMATO CON SISTEMI FRP L'impiego degli *FRP*, è stato, tra tutte le tecnologie adottate, quella di maggior successo.

Difatti, tale viene usata nelle zone ad alto rischio sismico in quanto tende ad impartire un incremento di duttilità per effetto del confinamento delle colonne in calcestruzzo (**Figura 15**). La scelta dei costituenti del materiale composito in *FRP*, vanno a basarsi sui requisiti di resistenza, rigidità e durabilità richiesti per ciascuna applicazione.



Figura 15_Confinamento del pilastro in cemento armato tramite uso di sistemi FRP

(<https://webapi.ingenio-web.it/immagini/file/byname?name=frp-pilastri.jpg>)

Il tipo di resina da impiegare, risulta essere in funzione delle caratteristiche ambientali alle quali sarà esposto il rinforzo una volta applicato. Tali sistemi vedono, per applicazioni esterne, due possibili soluzioni operative: utilizzo di sistemi impregnati in situ oppure i sistemi preformati.

I sistemi impregnati in situ, possono presentare dei tessuti di fibre unidirezionali o multi direzionali che sono annegate in situ per mezzo di resina saturante (**Figura 16**).



Figura 16_Confinamento del pilastro in cemento armato tramite uso di sistemi FRP impregnati in situ

I sistemi preformati, invece, sono dei prodotti composti quali sono assemblati in fabbrica (**Figura 17**).



Figura 17_ Confinamento del pilastro in cemento armato tramite uso di sistemi FRP preformati

(<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ91znuKYZ6md0PyIWpACOkq1QktiU-07sUUw&usqp=CAU>)

Per la fase di incollaggio di tali sistemi sul substrato dell'elemento strutturale da rinforzare, sono usati degli adesivi, del primer e il putty,

Il primer, ha la funzione di impregnare la superficie di calcestruzzo, con lo scopo di fornire una maggiore aderenza della resina saturante o dell'adesivo. Il putty, invece, ha la funzione di colmare i piccoli vuoti presenti sulla superficie del substrato, al fine di ottenere una superficie liscia su cui incollare l'FRP.

Per quanto riguarda il discorso della matrice, le fibre costituiscono la componente a cui è delegato il compito di portare i carichi in un sistema composito in FRP. Le fibre sono spesso pre-assemblate in varie forme per facilitare il confezionamento del materiale composito.

Per facilitarne l'utilizzo, tali sono fornite in varie forme: filamenti, cavi di filatura, filati e fili assemblati. Generalmente le tipologie più usate per la realizzazione dei materiali compositi, sono le seguenti categorie:

- Fibre di vetro (*GFRP*);
- Fibre polimeriche;
- Fibre di carbonio.

Negli ultimi decenni, l'utilizzo degli FRP ha raggiunto una popolarità sempre più crescente legata alle loro caratteristiche:

- alto rapporto resistenza/peso;
- resistenza alla corrosione;
- facilità e velocità di applicazione;
- minimo cambiamento della dimensione della sezione trasversale;
- possibilità di installazione senza interruzione delle funzioni della struttura.

Per questi motivi, gli FRP sono stati ampiamente impiegati per il rinforzo delle strutture in cemento armato, specialmente in quelle zone con gradi di sismicità elevati.

Infatti, nel confinamento di colonne in calcestruzzo armato, si registra un'importazione di incremento di resistenza e di duttilità. Questo incremento di duttilità va incontro al fabbisogno di dissipare energia da parte della struttura conferendone, così, un comportamento plastico. Possibili effetti negativi nella loro applicazione, sono legati all'esposizione di tali nei confronti degli agenti atmosferici, ai raggi ultravioletti, ai cicli termici ed all'umidità.

CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA CON SISTEMI FRP La muratura nel corso dei decenni, è stata usata sottoforma di differenti forme e configurazioni. Con la crescita della volontà di proteggere le strutture in muratura dagli effetti dannosi causati dagli eventi sismici, ha portato a promuovere l'uso di con materiali compositi *FRP* (**Figura 18**).

Tale tecnica, risulta essere un metodo molto efficace e usato anche nel rinforzo strutturale di elementi in muratura quali tendono ad essere soggetti a compressione assiale e momento flettente. La sua efficacia risulta essere dipendente dall'aumento di capacità resistente dell'elemento, una volta rinforzato, nei confronti delle sollecitazioni esterne a patto di una piccola entità di incremento in termini di peso. Oltre tale aspetto, va anche sottolineato che tale metodologia non apporta nessuna enorme variazione della rigidità dell'elemento e quindi nemmeno della distribuzione delle sollecitazioni interne [*Effect of FRP Wraps on the Compressive Behaviour of Slender Masonry Columns- G. Minafò; J.D'Anna; A. Monco; L. La Mendola; G. Amato*].



Figura 18_ Rinforzo di un pilastro in muratura tramite l'uso di sistemi FRP

(http://www.casaportale.com/immagini/csmart/301_img2.jpg)

L'uso di sistemi *FRP*, vede la necessità dell'installazione del rinforzo a diretto contatto con la faccia esterna dell'elemento strutturale, in modo da poter garantire una maggiore efficacia durante la sua esecuzione. Inoltre, tale viene vista come tecnica passiva, in quanto entra in azione quando l'elemento confinato inizia a dilatarsi lateralmente per via di applicazione di carichi aggiuntivi non previsti nella fase di progettazione dell'elemento.

Il confinamento di colonne mediante sistemi *FRP*, consente di incrementare la resistenza e la duttilità dell'elemento confinato. L'incremento di duttilità, va ad indurre la possibilità all'elemento, e all'intera struttura, di assumere un comportamento di tipo plastico in quanto si verifica dissipazione di energia.

La tipologia di resina scelta, risulta essere legata alle condizioni ambientali alle quali tale sarà esposta una volta entrata in funzione. Questi sistemi, nelle applicazioni esterne, presentano due soluzioni applicative: sistemi impregnati in situ e sistemi preformati. I sistemi impregnati in situ, sono costituiti da tessuti di fibre unidirezionali o multi direzionali annegate in situ per mezzo di resina saturante. I sistemi preformati, invece, sono dei prodotti composti quali sono assemblati in fabbrica.

Per quanto riguarda il discorso relativo alla matrice, tale ha la funzione di redistribuzione delle diverse sollecitazioni, in maniera omogenea, nelle fibre disposte all'interno del rinforzo.

Le fibre, al fine di facilitare il loro utilizzo, sono fornite in varie forme: filamenti, cavi di filatura, filati e fili assemblati. Generalmente le tipologie più usate, per la realizzazione dei materiali compositi, sono le seguenti categorie:

- Fibre di vetro (*GFRP*);
- Fibre polimeriche;

- Fibre di carbonio.

CONFINAMENTO DI PILASTRI IN CEMENTO ARMATO CON SISTEMI FRCM Tra i più recenti materiali e tecniche innovative per la conservazione e rafforzamento delle colonne in cemento armato, spicca la tecnica che vede l'uso di sistemi compositi *FRCM* (Fibre rinforzate con matrice cementizia). Tale tipologia di sistema, presenta materiale fibro-rinforzato dove la resina epossidica, caratterizzante sistemi *FRP*, viene sostituita da una matrice cementizia inorganica (**Figura 19**).

Nonostante i sistemi *FRCM* presentino solitamente fibre di vetro, aramidico o fibre di carbonio, recentemente ha preso piede la soluzione che vede l'inserimento delle fibre di *PBO*, ossia la fibra poliparafenilene benzobisossazolo (**Figura 20**). Tale è una fibra polimerica sintetica, quale presenta una struttura molecolare che è in grado di stabilire legami chimici con i composti idrati in uno speciale legante inorganico mediante una reazione idraulica che contribuisce a migliorare le proprietà meccaniche del sistema e ad essere applicabile su qualsiasi tipo di superficie e condizione di essa. [*EFFICACY OF PBO-FRCM STRENGTHENING OF RC COLUMNS IN MRFS- A. Monaco e P. Colajanni*].



Figura 19_ Rinforzo di un pilastro in cemento armato tramite l'uso di sistemi FRCM

(https://lh3.googleusercontent.com/proxy/tJiRtnV7SETjUqFwoY-LE4V-ziGCmAf6YAsPT8HJW53ZhMfQ6L7DWYOFAGeCkmigMtC16GimAl0ZX3Xe6jQUx0bLTAKrGGBX4YNW91iEQ7v_kzuSJOfbGAVtX_Y-EjhAy_W3O7w7HnsZpQ)



Figura 20_ Rinforzo di un pilastro in cemento armato tramite l'uso di fibre PBO

(https://www.infobuild.it/wp-content/gallery/ruregold-calcestruzzo/XP_3.JPG)

In effetti, i sistemi *FRCM* risultano presentare una buona compatibilità con qualunque tipologia di superficie sulla quale essi dovranno essere applicati e anche una buona capacità nel rinforzare senza compromettere la traspirabilità della struttura. Questo problema, invece, tendeva ad enunciarsi con la soluzione che vede l'uso di *FRP* quale, dopo la sua applicazione, riportava situazione ottima in termini statici ma pessima dal punto di vista termico. Questa differenza, è dovuta all' utilizzo della matrice di natura inorganica.

Altre migliorie, rispetto ai sistemi *FRP*, risultano essere:

- Classe elevata di resistenza al fuoco (*Classe A1*) contro Classe E della soluzione *FRP*;
- Uso in qualsiasi tipologia di situazione termica senza pericolo di perdita di aderenza da parte del rinforzo;
- Facilità nella posa su superfici di qualunque natura e condizione, tra cui anche quelle umide.

In effetti, gli *FRCM* sono preferiti ai sistemi *FRP* quando si opera in ambienti ad alta temperatura o quando il substrato dell'elemento da rinforzare si trova in un ambiente ad alta umidità.

I sistemi *FRCM*, come rinforzo esterno, si sono dimostrati molto efficaci nonostante la presenza di problematiche circa l'aderenza sviluppata all'interfaccia tra tessuto e malta, quale non risulta così elevata come nel caso di sistemi a base organica (*FRP*). Infatti, a causa della viscosità della malta e granularità, la penetrazione della malta all'interno del fascio di fibre (filato) non è garantito.

CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA CON SISTEMI FRCM L'utilizzo di sistemi compositi *FRCM*, trova impiego negli elementi murari, col fine di riuscire a contrastare il fenomeno dello spanciamento dovuto all'applicazione di carichi gravitazionali aggiuntivi. Tale fenomeno risulta essere più accentuato, negli elementi snelli. Pertanto, si richiede un immediato intervento di rinforzo per evitare collassi di tipo fragile.

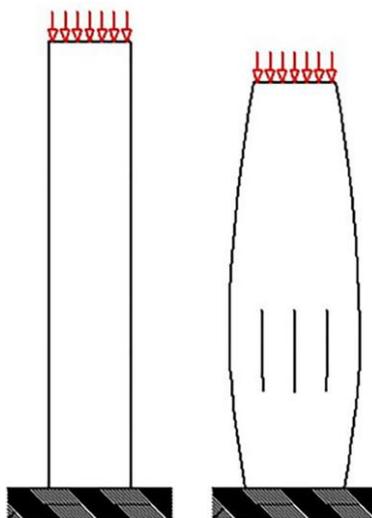


Figura 21_ Fenomeno di spanciamento dei pilastri in muratura a causa dei carichi verticali applicati

(<https://www.ediltecnico.it/wp-content/uploads/2021/04/Immagine-1-724x1024.jpg>)

Possibili cause, che possono indurre alla necessità di confinare un pilastro, possono essere problemi di degrado delle malte e dei mattoni, dove vi è la presenza di componenti quali non dispongono di una resistenza a compressione non soddisfacente rispetto ai livelli minimi di sicurezza e nei confronti dei carichi che vanno a gravare su di essi. Altra possibile ragione, risulta essere la variazione dell'entità di carico derivanti dal cambio della destinazione e possibili azioni sismiche. Tali fenomeni vanno a comportare un avanzamento di degrado dell'elemento pilastro. Il confinamento di un pilastro in muratura può essere raggiunto anche con la tecnica che vede l'applicazione dei nuovi sistemi *FRCM*, che offrono il vantaggio di presentare un rinforzo a basso spessore (massimo 15 mm di malta come

matrice di adesione della rete) senza irrigidire ulteriormente il pilastro, risultando efficaci nel contenere la dilatazione orizzontale, aumentare la duttilità dell'elemento e la capacità portante (**Figura 22**).

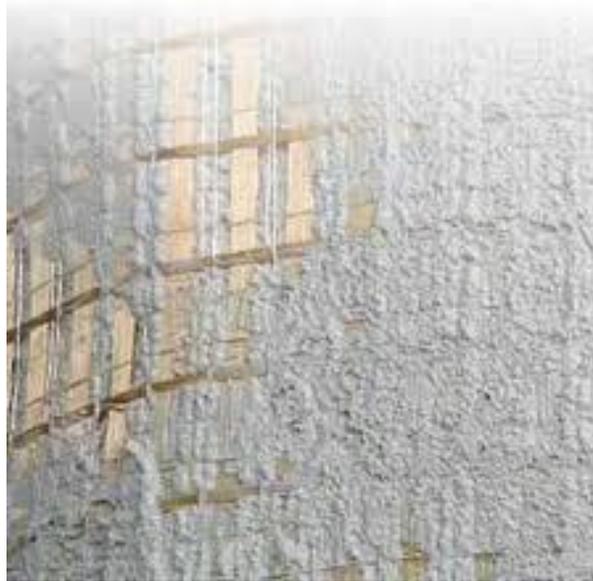


Figura 22 _ Confinamento di un pilastro in muratura tramite sistema FRCM

(https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:AND9GcTsHv-numVhSI4ZJOEYEWlyr-CKcs_WgzfA&usqp=CAU)

E' indicato, al fine di avere una maggiore efficacia, che la lunghezza di sovrapposizione della rete deve essere pari almeno ad un quarto della circonferenza, se sezione circolare, o del perimetro, se forma squadrata e comunque non inferiore a 300 mm.

Bisogna prestare attenzione nella realizzazione del processo di confinamento di elementi pilastro che risultano presentare un rapporto tra i due lati maggiore di 2. Infatti, le precedenti avvertenze per il confinamento possono presentare un basso livello prestazionale per tale caso.

Come soluzione a tale problematica, vi è l'inserimento di corde trasversali che presentano stesso materiale della rete per confinamento (**Figura 23**).

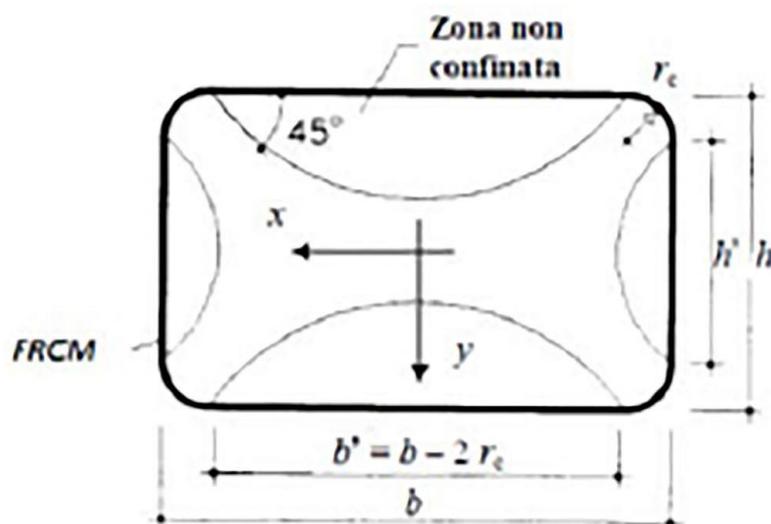


Figura 23 _ Confinamento di un pilastro in muratura tramite sistema FRCM con corde trasversali di contrasto.

(<https://www.ediltecnico.it/wp-content/uploads/2021/04/Immagine-6-1024x735.jpg>)

La tecnica che vede l'utilizzo dei sistemi *FRCM*, si distingue da quella con i sistemi *FRP*, perché risulta presentare un rinforzo strutturale che tende ad essere meno localizzato e molto più esteso sull'elemento da confinare. Inoltre, si registra una migliore resistenza al fuoco, una buona compatibilità chimico-fisica con il substrato, un impatto ridotto in termini di dimensioni, rigidità e peso, e possibilità di reversibilità dell'intervento.

1.3 OBIETTIVI DELLA TESI

L'obiettivo è quello di riuscire a fornire informazioni di carattere progettuale riferite al tema del rinforzo e consolidamento strutturale delle costruzioni esistenti, con particolare riferimento alle colonne in muratura e in calcestruzzo caricate assialmente. Nell'ambito della presente tesi, vengono analizzate le principali caratteristiche di tali tecniche di rinforzo, attraverso la disamina dei risultati di prove sperimentali su provini di calcestruzzo e muratura disponibili nella letteratura scientifica sul tema. Vengono inoltre indagati i modelli di letteratura e le espressioni normative maggiormente accreditati per la previsione della resistenza a compressione e della deformazione ultima di colonne in calcestruzzo e in muratura confinate e caricate assialmente. Al fine di confrontare le due tecniche di rinforzo, viene sviluppata un'analisi parametrica valutando l'influenza dei principali fattori che governano l'efficacia del confinamento: rigidità delle fibre, numero degli strati di rinforzo, rapporto volumetrico delle fibre, pressione laterale di confinamento efficace, resistenza del materiale non confinato, proprietà meccaniche delle matrici di rinforzo.

I risultati ottenuti dall'analisi parametrica, consentono infine di formulare alcune osservazioni progettuali relative alla scelta della migliore strategia di intervento da adottare a seconda del livello di confinamento che è necessario conseguire nell'ambito del progetto di riabilitazione strutturale.

2. MODELLI ANALITICI PER LA PREVISIONE DELLA RESISTENZA CONFINATA

Nel seguente capitolo, al fine di riuscire a determinare e a prevedere il contributo del confinamento nelle colonne in muratura e in calcestruzzo tramite dei sistemi di rinforzo compositi, vengono presi in considerazione dei modelli analitici presenti nella letteratura quali forniscono delle formulazioni utili per la determinazione della resistenza e deformazione ultima a provino confinato.

Vengono considerati articoli sperimentali e riferimenti normativi, trattanti il tema del rinforzo di colonne murarie e in calcestruzzo tramite l'uso di sistemi compositi, che saranno applicati a seconda della tipologia di materiale o tecnica di rinforzo trattata.

Di seguito, saranno illustrati i modelli relativi alle colonne realizzate in calcestruzzo e, poi, in muratura quali saranno confinate con FRP o con FRCM.

2.1 CONFINAMENTO DI COLONNE IN CALCESTRUZZO MEDIANTE SISTEMI FRP

Nel seguente paragrafo, saranno affrontate le casistiche di confinamento di colonne in calcestruzzo mediante sistemi FRP. Per tale casistica, saranno trattati i seguenti articoli sperimentali: *l'articolo di Spoelstra and Monti (1999)*, *articolo di Campione and Miraglia (2003)* e la *Circolare CNR DT 200 R1 (2013)*.

2.1.a SPOELSTRA AND MONTI (1999)

In tale articolo, si prevede lo studio di un modello quale va a trattare il processo di confinamento tramite uso di sistemi FRP su colonne realizzate in calcestruzzo. Tale strumento analitico risulta essere adatto per lo studio della continua iterazione tra rinforzo e colonna in calcestruzzo. Da sottolineare che, nel seguente articolo, l'efficacia del confinamento risulta essere in funzione dell'equilibrio tra la dilatazione laterale del provino e il dispositivo rinforzante. Punto di partenza fondamentale, risulta essere la conoscenza del legame tensione-deformazione espresso tramite **l'Equazione (1)**:

$$f_c = \frac{f_{cc} * x^r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

Dove:

- $x = \epsilon_c / \epsilon_{cc}$;
- $R = E_c / (E_c - E_{sec})$ con $E_{sec} = f_{cc} / \epsilon_{cc}$
- ϵ_{cc} è la deformazione assiale di compressione al momento del picco;
- f_{cc} è il picco della resistenza a compressione

Per il calcolo della resistenza cilindrica confinata, tale risulta essere in funzione di una pressione efficace di confinamento costante e ciò risulta nell' **Equazione (2)**:

$$f_{cc} = f_{c0} * \left(2,254 * \sqrt{1 + 7,94 * \frac{f_l}{f_{c0}}} - 2 \frac{f_l}{f_{c0}} - 1,254 \right) \quad (2)$$

Si nota, che la pressione efficace di confinamento è calcolata in funzione del rapporto volumetrico di armatura, ρ , e della tensione di snervamento, f_{yd} :

$$f_l = \frac{k_e \rho_s f_s}{2} \quad \text{con} \quad \rho_s = \frac{4A_s}{s d_s} \quad (3)$$

Dove k_e risulta essere un coefficiente che tiene conto della presenza di una forma ad arco, s indica il passo degli elementi rinforzanti, e d_s indica il diametro degli elementi rinforzanti. Nei recenti anni, un ostacolo, per lo studio del contributo del confinamento, è risultato essere il legame con un valore costante della pressione laterale di confinamento che, a sua volta, risulta essere legato alla storia di carico. Il valore assunto dalla costante della pressione di confinamento, risulta essere considerato come realistico nella fase di snervamento.

Nella casistica di confinamento passivo, la pressione di confinamento cresce in modo continuo. La deformazione laterale, ε_l , risulta essere uguale a:

$$\varepsilon_l(\varepsilon_c, f_l) = \frac{E_c * \varepsilon_c - f_c(\varepsilon_c, f_l)}{2 \left(\frac{5700}{\sqrt{f_{c0}}} - 500 \right) f_c(\varepsilon_c, f_l)} \quad (4)$$

2.1.b CAMPIONE AND MIRAGLIA (2003)

Nel seguente articolo, viene presentato un modello analitico quale va a permettere la determinazione della resistenza massima di un provino confinato mediante sistemi *FRP* e in condizioni ultime che comportano la rottura del rinforzo. Tale indagine risulta essere condotta attraverso delle prove a compressione eseguite su provini in calcestruzzo di forma e dimensioni differenti. I risultati ottenuti, vengono confrontati con ulteriori valori sperimentali con lo scopo di andare ad evidenziare le migliorie apportate da tale modello.

Nei test che saranno condotti e descritti nel capitolo successivo, saranno eseguiti su dei provini non dotati di armatura, in quanto si vuole testare esclusivamente la risposta del calcestruzzo nei confronti di tale tipologia di rinforzo.

Nel seguente articolo, la formulazione utile per il calcolo della resistenza a compressione confinata risulta essere data dall' **Equazione (5)**:

$$f'_{cc} = f'_c + k_l f'_l \quad (5)$$

f'_c risulta essere la resistenza cilindrica ultima a provino non confinato, f'_l la pressione efficace di confinamento e k_l un coefficiente sperimentale che generalmente viene assunto pari a 2 per gli elementi in calcestruzzo rinforzati tramite *FRP*.

La crescita della resistenza cilindrica, quindi, è direttamente legata alla pressione efficace di confinamento che, a sua volta, è in funzione della pressione laterale, f_l , quale è assunta come forza uniformemente distribuita sull'intera superficie del provino. Inoltre, tale dipende dal coefficiente di efficienza, k_e , quale è ottenuto come segue:

$$f'_l = k_e f_l \quad (6)$$

Dove:

$$k_e = A_e / A_{cc} \quad (7)$$

dove tale formula va a rappresentare il rapporto tra l'effettiva area confinata del provino, A_e , con l'intera area trasversale, A_{cc} .

Per la determinazione della pressione laterale, invece, ci si deve riferire ad un corpo rigido in equilibrio con la sezione trasversale soggetta ad una pressione distribuita f_l . Per la sua valutazione, la formulazione tende ad essere differente a seconda della tipologia di sezione sulla quale viene installato il rinforzo:

$$f_l = \frac{2 * t * f_u}{b_d} \quad \text{circular} \quad (8)$$

$$f_l = \frac{2 * t * f_r}{b_d} \quad \text{square with round corners} \quad (9)$$

$$f_l = \frac{\sqrt{2} * t * f_u}{b_d} k_i \quad \text{square} \quad (10)$$

Per il calcolo del coefficiente k_e , dove la sezione è squadrata con angoli arrotondati, tale risulta essere pari a:

$$k_e = \frac{\left[b_d^2 - 4 * \left(r^2 - \frac{\pi r^2}{4} \right) \right] - \frac{2}{3} (b_d - 2r)^2}{b_d^2 - 4 * \left(r^2 - \frac{\pi r^2}{4} \right)} \quad (11)$$

Dove è assunto pari a 1 se la sezione è circolare, mentre pari ad 1/3 se sezione quadrata.

2.1.c CIRCOLARE CNR DT 200 R1 (2013)

Nella trattazione del modello relativo alla *Circolare CNR DT 200 R1*, per ottenere un confinamento efficace, va ad illustrare diversi punti cardine:

1. Buona norma disporre le fibre del composito in direzione perpendicolare all'asse dell'elemento;
2. Nel caso di disposizione ad elica, l'efficacia del confinamento va opportunamente valutata;
3. In assenza di una pretensione iniziale, il sistema di rinforzo FRP esercita un confinamento passivo sulla membratura compressa. L'azione di confinamento diventa significativa nella fase di plasticizzazione, e quindi di fessurazione, dell'elemento rinforzato, a seguito della sua più vistosa dilatazione trasversale;
4. L'elemento confinato risulta verificato se è soddisfatta la disequaglianza:

$$N_{sd} \leq N_{RCC,d} \quad (12)$$

essendo N_{sd} il valore di progetto dell'azione assiale agente e $N_{RCC,d}$ il valore di progetto della resistenza dell'elemento confinato.

In assenza di fenomeni di instabilità, la resistenza di progetto $N_{RCC,d}$ è fornita dalla seguente relazione:

$$N_{RCC,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd} \quad (13)$$

Dove:

- γ_{Rd} è il coefficiente parziale di sicurezza da assumere pari a 1,10;
- A_c ed f_{ccd} sono, rispettivamente, area della sezione trasversale dell'elemento e la tensione di tensione di progetto del calcestruzzo confinato;
- A_s ed f_{yd} sono, rispettivamente, area e tensione di progetto dell'armatura metallica eventualmente presente.

La resistenza di progetto del calcestruzzo confinato, f_{ccd} , può essere valutata come illustrato nell'**Equazione (14)**:

$$\frac{f_{cc,d}}{f_{cd}} = 1 + 2,6 \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^2 \quad (14)$$

dove:

- f_{cd} è la tensione di progetto del calcestruzzo non confinato;
- $f_{l,eff}$ è la pressione efficace di confinamento.

Il confinamento risulta essere efficace se $\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}}$ è maggiore di 0,05.

Nella valutazione della pressione di confinamento, f_l , si prende in considerazione solo un'aliquota di esso, $f_{l,eff}$, ossia la pressione di confinamento efficace. Tale risulta essere in funzione della forma della sezione trasversale e della modalità di realizzazione dell'intervento.

$$f_{l,eff} = k_{eff} * f_l \quad (15)$$

Dove k_{eff} è un coefficiente, inferiore/uguale ad 1, definito come il rapporto tra il volume efficacemente confinato dell'elemento e il volume totale dell'elemento in calcestruzzo depurato dalla presenza delle armature longitudinali.

La pressione di confinamento può essere valutata mediante l'Equazione (16):

$$f_l = \frac{1}{2} * \rho_f * E_f * \varepsilon_{fd,rid} \quad (16)$$

dove ρ_f è la percentuale geometrica di rinforzo, dipendente, come descritto nei paragrafi seguenti, dalla forma della sezione e dal tipo di applicazione (confinamento continuo o discontinuo), E_f è il modulo di elasticità normale del materiale in direzione delle fibre, $\varepsilon_{fd,rid}$ è un'opportuna deformazione ridotta di calcolo del composito fibro-rinforzato, definita nel prosieguo.

Il coefficiente di efficienza, k_{eff} , può essere espresso come prodotto di tre fattori: un coefficiente di efficienza orizzontale, k_H , uno di efficienza verticale, k_v , ed un altro legato all'inclinazione delle fibre, k_α :

$$k_{eff} = k_H * k_v * k_\alpha \quad (17)$$

Il coefficiente di efficienza orizzontale, k_H , dipende dalla forma della sezione. Il coefficiente di efficienza verticale, k_v , dipende dallo sviluppo del confinamento lungo l'asse longitudinale dell'elemento rinforzato. In caso di fasciatura continua si assume $k_v = 1$. Invece, per la fasciatura discontinua, realizzata cioè con strisce di FRP disposte ad interasse ρ_f e distanza netta, si deve tenere conto della riduzione di efficacia dovuta al fenomeno di diffusione delle tensioni tra due fasciature consecutive. Per effetto di tale diffusione si creano delle zone che non risentono del confinamento, aventi approssimativamente, in sezione verticale, un contorno parabolico con tangente iniziale inclinata di 45°.

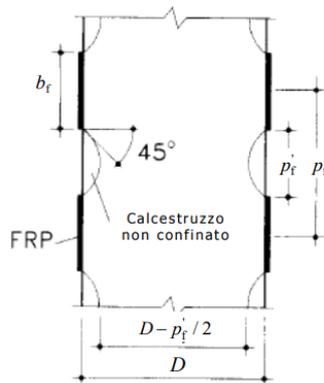


Figura 24_ Confinamento di un pilastro in calcestruzzo tramite applicazione di fasciature discontinue di FRP

Indipendentemente dalla forma della sezione, il coefficiente di efficienza verticale, k_v , può essere assunto pari a:

$$k_v = \left(1 - \frac{\rho_f'}{2 * d_{min}}\right)^2 \quad (18).$$

avendo indicato con d_{min} la minima dimensione trasversale dell'elemento.

Nel caso di fasciatura discontinua è opportuno che la distanza netta fra le strisce rispetti la limitazione $p'_f \leq d_{min}/2$. Indipendentemente dalla forma della sezione, il coefficiente di efficienza k_α può esprimersi in funzione dell'angolo di inclinazione delle fibre, α_f , come:

$$k_\alpha = \frac{1}{1 + (\tan\alpha_f)^2} \quad (19)$$

La deformazione ridotta di calcolo del composito fibro-rinforzato, $\varepsilon_{fd,rid}$, è definita dalla relazione:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \left\{ \eta_{ka} * \frac{\varepsilon_{fk}}{Y_f}; 0,004 \right\} \quad (20)$$

dove η_{ka} e Y_f sono, rispettivamente, il fattore di conversione ambientale ed il coefficiente parziale del materiale composito fibro-rinforzato.

L'intervento di confinamento con *FRP* risulta particolarmente efficace se adottato su elementi a sezione circolare soggetti a compressione centrata o con piccola eccentricità.

Il valore della percentuale geometrica di rinforzo, ρ_f , da utilizzare è fornito dalla seguente relazione:

$$\rho_f = \frac{4 * t_f * b_f}{D * \rho_f} \quad (21)$$

dove t_f e b_f sono, rispettivamente, lo spessore e l'altezza della generica striscia di *FRP*, ρ_f è il passo delle strisce e D è il diametro della sezione circolare.

Il coefficiente di efficienza orizzontale, k_H , è pari ad 1.0

Il confinamento con *FRP*, di elementi a sezione quadrata o rettangolare, produce incrementi solo marginali della resistenza a compressione. Ne consegue che applicazioni di questo genere devono essere attentamente vagliate ed analizzate. Il valore della percentuale geometrica di rinforzo, ρ_f , da utilizzare nella è fornito dalla relazione:

$$\rho_f = \frac{2 * t_f * (b + h) * b_f}{b * h * \rho_f} \quad (22)$$

dove t_f e b_f sono, rispettivamente, lo spessore e l'altezza della generica striscia di *FRP*, ρ_f è il passo delle strisce, mentre b e h sono le dimensioni trasversali della sezione rettangolare.

Si può ritenere, con buona approssimazione, che l'area di calcestruzzo effettivamente confinata sia solo un'aliquota di quella complessiva. La motivazione di tale comportamento è da attribuirsi all'"effetto arco" che si manifesta all'interno della sezione; tale effetto dipende dal valore del raggio di arrotondamento degli spigoli, r_c .

Il coefficiente di efficienza orizzontale, k_H , è fornito dalla relazione:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 * A_g} \quad (23)$$

in cui b' e h' sono le dimensioni effettivamente confinate ed A_g è l'area della sezione trasversale dell'elemento confinato.

In assenza di adeguate prove sperimentali, che ne comprovino al contrario l'efficacia, non va considerato l'effetto del confinamento su sezioni rettangolari per le quali $b/h > 2$, ovvero $\max \{b, h\} > 900$ mm.

2.2 CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA MEDIANTE SISTEMI FRP

Il seguente paragrafo, va a trattare il processo di confinamento, mediante sistemi FRP, delle colonne realizzate in muratura. Per tale casistica di colonne, saranno adottati i seguenti articoli sperimentali: *l'articolo di Krevaikas and Triantfillou (2005)*, *articolo di Di Ludovico et al. (2010)* e la *Circolare CNR DT 200 R1 (2013)*.

2.2.a KREVAIKAS AND TRIANTFILLOU (2005)

Nel seguente articolo, si affronta il discorso relativo al confinamento attraverso la trattazione sperimentale di 42 provini quali vanno a presentare differente numero di strati del materiale di rinforzo, entità del raggio di curvatura, del tipo di fibra usata e dell'entità del rapporto delle dimensioni planimetriche.

Il contributo offerto dal confinamento, risulta essere analogo sia per elementi in calcestruzzo armato che in muratura. La pressione passiva trasversale che si va a creare, risulta essere ottenuta tramite la seguente:

$$\sigma_l = \frac{\sigma_{l,h} + \sigma_{l,b}}{2} = \frac{1}{2} k_e \left(\frac{2t_f}{h} \varepsilon_f * E_f + \frac{2t_f}{b} \varepsilon_f * E_f \right) = k_e \frac{(b+h)}{bh} t_f * \varepsilon_f * E_f \quad (24)$$

Dove E_f è la rigidezza del FRP, ε_f la deformazione circonferenziale del FRP, t_f è lo spessore del FRP e k_e è il coefficiente di efficienza. Quest'ultimo risulta essere dato dal rapporto tra area confinata e quella totale:

$$k_e = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 * A_g} \quad (25)$$

La rottura per compressione dell'elemento confinato con FRP, avviene quando le tensioni applicate risultano presentare un valore pari alla resistenza ultima a trazione, f_{fe} . Quindi il valore di tensione di confinamento che porta a rottura, risulta essere pari:

$$\sigma_{lu} = k_e \frac{(b+h)}{bh} t_f f_{fe} \quad (26)$$

Generalmente il contributo di incremento di resistenza dell'elemento in muratura, grazie all'introduzione di FRP, è calcolato tramite la seguente relazione:

$$f_{mc} = f_{m0} \left(\alpha + k' \frac{f_{l,eff}}{f_{m0}} \right) \quad (27)$$

Dove f_{mc} è la resistenza a compressione dell'elemento confinato, f_{m0} è la resistenza a compressione dell'elemento non confinato; invece, α e k' sono dei coefficienti adimensionali; $f_{l,eff}$ è la pressione laterale efficace di confinamento che risulta essere ottenuta tramite la seguente:

$$f_{l,eff} = k_v * k_H * f_l \quad (28)$$

Dove k_v e k_H sono i coefficienti di efficienza verticale e orizzontale, mentre f_l risulta essere la pressione laterale di confinamento:

$$f_l = \frac{f_{l,d} + f_{l,b}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{2t_f}{d} \varepsilon_{fl} * E_f + \frac{2t_f}{b} \varepsilon_{fl} * E_f \right) = \frac{(b+d)}{bd} t_f * \varepsilon_{fl} * E_f \quad (29)$$

Dove $f_{l,d}$ e $f_{l,b}$ sono le tensioni di confinamento e ε_{fl} la deformazione circonferenziale del FRP.

2.2.b DI LUDOVICO ET AL. (2010)

Il seguente articolo, vede lo studio dei contributi importati dal processo di confinamento tramite FRP su colonne in muratura, mediante un'indagine sperimentale quale va a sottoporre alla prova di compressione uniassiale circa 18 provini realizzati in muratura con dimensioni planimetriche differenziate tra loro. Per la valutazione della resistenza a compressione a provino già confinato, si utilizza la seguente equazione:

$$f_{mc} = f_{m0} \left(\alpha + k' \frac{f_{l,eff}}{f_{m0}} \right) \quad (30)$$

Dove f_{mc} è la resistenza a compressione dell'elemento confinato, f_{m0} è la resistenza a compressione dell'elemento non confinato; invece, α e k' sono dei coefficienti adimensionali; $f_{l,eff}$ è la pressione laterale efficace di confinamento che risulta essere ottenuta tramite la seguente:

$$f_{l,eff} = k_v * k_H * f_l \quad (31)$$

Dove k_v e k_H sono i coefficienti di efficienza verticale e orizzontale, mentre f_l risulta essere la pressione laterale di confinamento:

$$f_l = \frac{f_{l,d} + f_{l,b}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{2t_f}{d} \epsilon_{fl} * E_f + \frac{2t_f}{b} \epsilon_{fl} * E_f \right) = \frac{(b+d)}{bd} t_f * \epsilon_{fl} * E_f \quad (32)$$

Dove $f_{l,d}$ e $f_{l,b}$ sono le tensioni di confinamento e ϵ_{fl} la deformazione circonferenziale del FRP.

Infine, ultimo parametro da definire è il coefficiente k' , dal quale risultano essere dipendenti le tre principali formulazioni precedenti. Tale risulta essere calcolato nel seguente modo:

$$k' = k_l \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{m0}} \right)^\beta \quad (33)$$

Dove k_l risulta essere un coefficiente di confinamento ideale, mentre β è un parametro di forma dipendente dalle caratteristiche plastiche del materiale.

2.2.c CIRCOLARE CNR DT 200 R1 (2013)

Per la valutazione della pressione di confinamento è buona norma disporre le fibre in direzione perpendicolare all'asse dell'elemento. In caso di disposizione ad elica l'efficacia del confinamento va opportunamente valutata.

La verifica dell'elemento confinato consiste nell'accertare che sia soddisfatta la seguente limitazione:

$$N_{sd} \leq N_{Rmc,d}$$

Dove N_{sd} risulta essere il valore di progetto dell'azione assiale agente (da valutarsi, per le diverse combinazioni di carico prevedibili, come prescritto dalla Normativa vigente) e $N_{Rmc,d}$ il valore di progetto della resistenza della colonna confinata. La resistenza assiale di progetto, $N_{Rmc,d}$ è definita come segue:

$$N_{Rmc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_m \cdot f_{med} > A_m \cdot f_{md} \quad (34)$$

dove il coefficiente parziale γ_{Rd} deve essere assunto pari a 1.10 ad eccezione dei casi di confinamento interno mediante sole barre in colonne a sezione non circolare, per i quali si prescrive $\gamma_{Rd} = 1.25$, il simbolo A_m rappresenta

l'area della sezione trasversale dell'elemento confinato, f_{md} è la resistenza a compressione della muratura non confinata e f_{med} è il valore di progetto della resistenza a compressione dell'elemento confinato.

Alla resistenza di progetto, f_{mcd} , di un elemento confinato soggetto ad un valore f_l della pressione di confinamento (definita nel seguito in funzione delle caratteristiche del sistema confinante), contribuisce soltanto una quota parte di quest'ultima, $f_{l,eff}$, detta "pressione efficace di confinamento":

$$f_{med} = f_{md} \left[1 + k' \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{md}} \right)^{\alpha_1} \right] \quad (35)$$

dove k' è un coefficiente (adimensionale) di incremento della resistenza ed α_1 è un esponente al quale, in mancanza di comprovati risultati sperimentali, può essere assegnato il valore 0.5.

Il valore del coefficiente di incremento di resistenza, k' , può essere ottenuto tramite prove sperimentali su provini di muratura dalle caratteristiche analoghe agli elementi da confinare. In alternativa a ciò, ci si può avvalere della seguente relazione:

$$k' = \alpha_2 \left[\left(\frac{g_m}{1000} \right)^{\alpha_3} \right] \quad (36)$$

essendo g_m la densità di massa della muratura espressa in kg/m³ ed α_2 e α_3 coefficienti ai quali cautelativamente può essere attribuito il valore 1.0, in mancanza di risultati sperimentali che ne giustifichino assunzioni diverse.

La pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$, è funzione della forma della sezione e delle modalità di intervento. Indicato con V_m il volume dell'elemento murario e con V_{eff} il volume della porzione efficacemente confinata, si introduce il seguente coefficiente di efficienza:

$$k_{eff} = \frac{V_{eff}}{V_m} \quad (37)$$

in funzione del quale può essere definita la pressione efficace di confinamento.

Il coefficiente di efficienza, k_{eff} , può essere espresso come prodotto di un coefficiente di efficienza orizzontale, k_H , per uno di efficienza verticale, k_v :

$$f_{l,eff} = k_{eff} * f_l = k_H * k_v * f_l \quad (38)$$

L'efficacia dell'intervento di confinamento può essere altresì influenzata da un'eventuale disposizione a spirale della fasciatura esterna. Se α_f è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto al piano della sezione trasversale dell'elemento, si introduce il seguente coefficiente α_f :

$$k_\alpha = \frac{1}{1 + (\tan \alpha_f)^2} \quad (39)$$

Tale coefficiente, moltiplicativo della pressione di confinamento, penalizza la pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$, indotta dalla fasciatura esterna per effetto dell'inclinazione da essa presentata. Il contributo di eventuali tiranti, disposti ortogonalmente all'asse della colonna, non è affetto dal suddetto coefficiente.

Al fine di limitare deformazioni assiali e danneggiamenti in condizioni di esercizio, è opportuno contenere l'incremento tensionale a carico dell'elemento confinato entro valori non superiori al 50% della tensione di progetto, f_{md} , del materiale non confinato.

Per il confinamento di una colonna di forma circolare, invece, si definisce la percentuale geometrica della fasciatura esterna tramite la seguente relazione:

$$\rho_f = \frac{4 * t_f * b_f}{D * \rho_f} \quad (40)$$

dove t_f e b_f sono, rispettivamente, lo spessore e l'altezza della generica striscia di FRP, ρ_f è il passo delle strisce e D è il diametro della sezione circolare.

In condizione di equilibrio limite, la pressione di confinamento, f_l , può essere calcolata con la relazione che segue:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \left\{ \eta_a * \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}; 0,004 \right\} \quad (41)$$

dove η_a e γ_f sono, rispettivamente, il fattore di conversione ambientale ed il coefficiente parziale del materiale composito fibro-rinforzato.

Il coefficiente di efficienza orizzontale, k_H , è pari a 1. Lo stesso accade per il coefficiente di efficienza verticale, k_v , ma solo nel caso di fasciatura continua.

Nel caso invece di fasciatura discontinua, realizzata con strisce di altezza b_f disposte ad interasse ρ_f , si ha una riduzione del volume confinato per effetto della diffusione tensionale schematizzabile mediante una legge parabolica con angoli di attacco pari a 45°.

Il coefficiente di efficienza verticale, k_v , può essere calcolato mediante la relazione:

$$k_v = \left(1 - \frac{\rho'_f}{2 * d_{min}} \right)^2 \quad (42)$$

Dove ρ'_f , è la distanza netta tra le strisce e deve essere inferiore, o uguale, a D/2.

Il confinamento mediante FRP di elementi a sezione quadrata o rettangolare consente di conseguire solo modesti incrementi della resistenza a compressione. Applicazioni di questo genere devono pertanto essere attentamente vagliate ed analizzate.

In assenza di adeguate prove sperimentali, che ne comprovino l'efficacia, non va considerato l'effetto del confinamento esterno su sezioni rettangolari per le quali $b/h > 2$, ovvero $\max \{b, h\} > 900\text{mm}$.

La pressione di confinamento, f_l , esercitata su un elemento di sezione rettangolare di dimensioni $b \times h$ da una fasciatura esterna discontinua e da barre di cucitura interne, può essere valutata mediante la seguente relazione:

$$f_l = \frac{1}{2} \min \{ \rho_{f,x} * E_f + 2 * \rho_{b,x} * E_b; \rho_{f,y} * E_f + 2 * \rho_{b,y} * E_b; \} * \varepsilon_{fd,rid} \quad (43)$$

i parametri adimensionali $\rho_{f,x}$, $\rho_{f,y}$, $\rho_{b,x}$, $\rho_{b,y}$ sono definiti come:

$$\rho_f = \frac{4 * t_f * b_f}{h * \rho_f}; \rho_{f,x} = \frac{4 * t_f * b_f}{b * \rho_f}; \rho_{b,x} = \frac{n_{b,x} * A_b}{h * \rho_b}; \rho_{b,y} = \frac{n_{b,y} * A_b}{b * \rho_b}; \quad (44)$$

essendo $n_{b,x}$ ed $n_{b,y}$ il numero di barre disposte negli strati orditi nelle direzioni x e y, rispettivamente, A_b l'area della sezione della singola barra, ρ_b la distanza (misurata in asse) tra due strati consecutivi di barre disposte lungo la medesima direzione.

Per una sezione rettangolare confinata solamente da una fasciatura esterna, si può ritenere che l'area di muratura effettivamente confinata sia solo una parte di quella complessiva per l'instaurarsi di un "effetto arco" dipendente dal raggio di curvatura con cui sono stati arrotondati i vertici della sezione.

Il competente coefficiente di efficienza orizzontale è fornito dal rapporto tra l'area confinata e quella totale, A_m :

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 * A_m} \quad (45)$$

dove b' e h' sono le dimensioni.

2.3 CONFINAMENTO DI COLONNE IN CALCESTRUZZO MEDIANTE SISTEMI FRCM

Nel seguente paragrafo, viene affrontato il tema del confinamento di colonne in calcestruzzo tramite sistemi *FRCM*. Per tale casistica, vengono adottati i seguenti articoli: *l'articolo di Colajanni et al. (2014)*, *Normativa ACI 549-4R (2013)* e a *Circolare CNR DT 215 (2018)*.

2.3.a COLAJANNI ET AL. (2014)

Questo articolo, affronta il tema del confinamento delle colonne in calcestruzzo mediante l'uso di sistemi *FRCM*, attraverso un'indagine sperimentale eseguita su tre differenti set di provini caratterizzati da dimensioni e forma della sezione trasversale differenti. Nella trattazione dell'incremento della resistenza e della deformazione ultima per una colonna in calcestruzzo di forma circolare, rettangolare o quadrata, seguono le stesse regole delle colonne di muratura, salvo le varianti di seguito elencate. Gli autori, vanno a spiegare che il valore della pressione efficace di confinamento risulta essere in funzione di due contributi importanti: il valore della tensione del calcestruzzo confinato, calcolato tramite il modello di *Spoelstra e Monti (1999)*, $f_{c,SM}$, e il contributo della matrice sottoposta a compressione che viene calcolata come segue:

$$f_{c,eq} = f_{c,SM} + \left(\frac{A_m}{A_c}\right) f_m \quad (46)$$

Dove A_m e A_c sono rispettivamente area dell'armatura di rinforzo e area sezione trasversale e vengono ottenute come segue:

$$A_m = \Pi * s_m (s_m + D) \quad (47)$$

$$A_m = 4s_m (s_m + L) \quad (48)$$

dove

$$s_m = t_m (n_m + 1) \quad (49)$$

Come precedentemente accennato, il valore della resistenza a compressione della matrice risulta essere ottenuta tramite la seguente:

$$f_m = \frac{x * r}{r - 1 + x^r} \quad (50)$$

Il valore dell'incremento di resistenza, conseguenza dell'applicazione del rinforzo, è calcolata adottando la formulazione indicata dall'articolo di *Spoelstra and Monti (1999)*. Tale risulta essere basata sul modello di *Mander et*

al., dove si il picco di resistenza del calcestruzzo confinato, e la sua corrispondente deformazione, risulta essere espressi in termini di pressione di confinamento efficace:

$$f_{cc} = f_{c0} * \left(2,254 * \sqrt{1 + 7,94 * \frac{f_l}{f_{c0}}} - 2 \frac{f_l}{f_{c0}} - 1,254 \right) \quad (51)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{c0}} - 1 \right) \quad (52)$$

Per $f_{l,eff}$, sta il valore della pressione di confinamento che risulta essere uniformemente distribuito nel caso di sezione trasversale circolare. Difatti, si pone $f_l = f_{l,eff}$, e tale è ottenuta:

$$f_l = \frac{1}{2} \rho E_f \varepsilon_f \quad (53)$$

Nel caso di sezione trasversale prismatica, la distribuzione di tale pressione risulta essere non uniforme, in termini di distribuzione, ed infatti viene preso in considerazione un coefficiente di efficacia che risulta essere pari a:

$$k_e = 1 - \frac{2(L-r_c)^2}{3A_g} \quad (54)$$

Con A_g che sta per l'aliquota area effettivamente confinata dal rinforzo. Ovviamente, nel caso di provino cilindrico, tale coefficiente risulta essere unitario. Quindi la pressione di confinamento laterale efficace sarà:

$$f_{l,e} = f_l * k_e = \frac{1}{2} \rho E_f \varepsilon_f k_e \quad (55)$$

2.3.b NORMATIVA ACI549-4R (2013)

Il confinamento di colonne in calcestruzzo, comporta l'incremento della resistenza cilindrica e della deformazione di esso. L'entità di tale contributo risulta essere in funzione delle proprietà del rinforzo stesso.

Il massimo valore della resistenza a compressione, a provino già confinato, risulta essere in funzione della massima pressione efficace di confinamento, f_l :

$$f'_{cc} = f'_c + 3,1 k_a f_l \quad (56)$$

Con

$$f_l = \frac{2nA_f E_f \varepsilon_{fe}}{D} \quad \text{per sezione circolare} \quad (57)$$

$$f_l = \frac{2nA_f E_f \varepsilon_{fe}}{(b^2 + h^2)} \quad \text{per sezione rettangolare} \quad (58)$$

dove A_f risulta essere area del rinforzo per unità di larghezza, f'_c è la resistenza a compressione del provino non confinato, n numero di strati di rinforzo, D è il diametro del provino sottoposto a compressione, b e h sono, invece, le dimensioni planimetriche del provino con forma rettangolare. Il coefficiente k_a , invece, risulta essere in funzione della forma della sezione trattata:

$$k_a = 1 \quad \text{per sezione circolare} \quad (60)$$

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2 \quad \text{per sezione rettangolare con rapporto tra dimensioni maggiore di 2} \quad (61)$$

2.3.c CIRCOLARE CNR DT215 (2018)

La verifica di colonne di colonne in calcestruzzo prevalentemente compresse e confinate con *FRCM*, sia circolari che rettangolari o quadrate, segue le stesse regole delle colonne di muratura, salvo le varianti di seguito elencate. La resistenza assiale di progetto, $N_{RCC,d}$, è definita come segue:

$$N_{RCC,d} = f_{ccd}A_c + f_{yd}A_s \quad (62)$$

essendo A_c l'area di calcestruzzo, A_s l'area di acciaio presente, f_{ccd} la resistenza di progetto del calcestruzzo confinato, f_{yd} la tensione di progetto dell'acciaio delle armature.

La resistenza di progetto del calcestruzzo confinato, f_{ccd} , può essere valutata come segue:

$$\frac{f_{cc,d}}{f_{cd}} = 1 + 2,6\left(\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (63)$$

Essendo:

- f_{cd} la tensione di progetto del calcestruzzo non confinato;
- $f_{l,eff}$ la pressione efficace di confinamento.

Il coefficiente k_{mat} per le colonne di conglomerato cementizio armato è assunto pari a:

$$k_{mat} = 0,217\left(\rho_{mat} \frac{f_{c,mat}}{f_{cd}}\right)^{\frac{3}{2}} < 1 \quad (64)$$

Il confinamento mediante *FRCM* di elementi a sezione quadrata o rettangolare di conglomerato cementizio armato segue le stesse regole delle colonne di muratura, salvo la variante di seguito elencata:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 * A_c}; \quad A_c = bh \quad (65)$$

2.4 CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA MEDIANTE SISTEMI FRCM

Il confinamento di elementi strutturali di muratura mediante sistemi *FRCM*, sottoposti a prevalente sollecitazione di sforzo assiale, si attua attraverso la predisposizione di un rivestimento continuo di composito a matrice inorganica, le cui fibre siano prevalentemente disposte in direzione ortogonale all'asse dell'elemento, in modo da contrastarne la dilatazione trasversale e conferire alla colonna un benefico stato di compressione triassiale. La lunghezza di sovrapposizione delle fibre è consigliata per almeno un quarto della circonferenza/perimetro della sezione trasversale e comunque per non meno di 300mm. Simili interventi sono praticabili sia per la riparazione di elementi danneggiati o deteriorati, sia per il rinforzo di elementi integri in vista di un miglioramento statico o sismico della struttura di appartenenza. Il confinamento con *FRCM* deve essere realizzato ricoprendo interamente la superficie dell'elemento da rinforzare.

Per tale casistica, saranno trattati i seguenti articoli: *l'articolo sperimentale di Balsamo et al (2018)*, *la Circolare CNR DT 215 (2018)* e *la Normativa ACI 549-6R (2020)*.

2.4.a BALSAMO ET AL. (2018)

La trattazione del confinamento, mediante l'uso di sistemi *FRCM*, di una colonna in muratura, avviene tramite l'esecuzione di una prova a compressione uniassiale su provini di forma e dimensioni differenti. Il modello teorico applicato, si basa sulla scelta della tipologia di matrice e fibra applicate nei vari test. La verifica dell'elemento confinato, soggetto a compressione centrata, consiste nell'accertare che sia soddisfatta la seguente limitazione:

$$N_{ed} \leq N_{Rmc,d} \quad (66)$$

La resistenza assiale di progetto, $N_{Rmc,d}$, è definita come segue:

$$N_{Rmc,d} = f_{med} A_m > f_{md} A_m \quad (67)$$

dove il simbolo A_m rappresenta l'area della sezione trasversale dell'elemento confinato, f_{md} è la resistenza a compressione della muratura non confinata e f_{cmd} è il valore di progetto della resistenza a compressione della muratura confinata.

Alla resistenza di progetto, f_{med} , di un elemento confinato soggetto ad un valore f_1 della pressione di confinamento, di seguito definita e limitata dalle prestazioni meccaniche della matrice, il cui danneggiamento influenza l'efficacia dell'iterazione con le fibre di rinforzo, contribuisce soltanto una quota parte di quest'ultima, $f_{l,eff}$, detta "pressione efficace di confinamento" che dipende dalle caratteristiche della colonna di muratura:

$$f_{med} = f_{md} \left[1 + k' \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{md}} \right)^{\alpha_1} \right] \quad (68)$$

k' è un coefficiente (adimensionale) di incremento della resistenza ed α_1 è un esponente al quale, in mancanza di comprovati risultati sperimentali, può essere assegnato il valore 0,5. Il valore del coefficiente di incremento della resistenza k' può essere stabilito sulla base di risultati sperimentali ottenuti su provini di muratura dalle caratteristiche analoghe a quelle da confinare. In alternativa, è possibile avvalersi della seguente relazione:

$$k' = \alpha_2 \left[\left(\frac{g_m}{1000} \right)^{\alpha_3} \right] \quad (69)$$

essendo g_m la densità di massa della muratura espressa in kg/m³ e α_2 e α_3 coefficienti ai quali cautelativamente può essere attribuito il valore 1,0, in mancanza di risultati sperimentali che giustifichino assunzioni diverse.

Nel caso di colonne circolari di diametro D , confinate con n_f strati di rinforzo e aventi spessore equivalente delle fibre nella direzione ortogonale all'asse dell'elemento t_f e la cui matrice sia caratterizzata da un valore $f_{c,mat}$ della resistenza caratteristica a compressione, la pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$, può essere calcolata come:

$$f_{l,eff} = f_l * k_H * k_{mat} \quad (70)$$

$$f_l = \frac{2 * n_f * t_f * E_f * \varepsilon_{ud,rid}}{D} \quad (71)$$

essendo f_l la pressione di confinamento, k_H il coefficiente di efficienza orizzontale, da assumersi per le colonne circolari rivestite con continuità pari a 1, e $\varepsilon_{ud,rid}$ la deformazione di calcolo del composito *FRCM*, appresso definita.

Quest'ultima è assunta pari a:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \left\{ k_{mat} * \eta_a * \frac{\varepsilon_{uf}}{\gamma_m}; 0,004 \right\} \quad (72)$$

Con

$$k_{mat} = \alpha_4 \left(\rho_{mat} \frac{f_{c,mat}}{f_{md}} \right)^2 < 1 \quad (73)$$

$$\rho_{mat} = 4 \frac{t_{mat}}{D} \quad (74)$$

essendo t_{mat} lo spessore complessivo del rinforzo *FRCM* e k_{mat} il coefficiente adimensionale di efficacia del confinamento che tiene conto della presenza della matrice inorganica. In mancanza di risultati sperimentali che giustificano assunzioni diverse, il coefficiente α_4 può essere assunto pari a 1.81. In assenza di controlli specifici in situ che consentano una misura accurata di t_{mat} , nella valutazione della percentuale geometrica della matrice di rinforzo, ρ_{mat} , si consiglia di adoperare per t_{mat} , un valore cautelativamente non superiore a 10 mm.

Il confinamento mediante *FRCM* di elementi a sezione quadrata o rettangolare consente di conseguire solo modesti incrementi della resistenza a compressione. Applicazioni di questo genere devono pertanto essere attentamente vagliate ed analizzate. In assenza di adeguate prove sperimentali, che ne comprovino l'efficacia, non va considerato l'effetto del confinamento esterno su sezioni rettangolari per le quali $b > h/2$. Prima dell'applicazione del sistema *FRCM*, è opportuno procedere ad un arrotondamento degli spigoli della sezione, allo scopo di evitare pericolose concentrazioni di tensione localizzate in corrispondenza degli stessi, che potrebbero provocare una rottura prematura del sistema. Il raggio di curvatura dello spigolo deve soddisfare la seguente limitazione:

$$r_c \geq 20mm$$

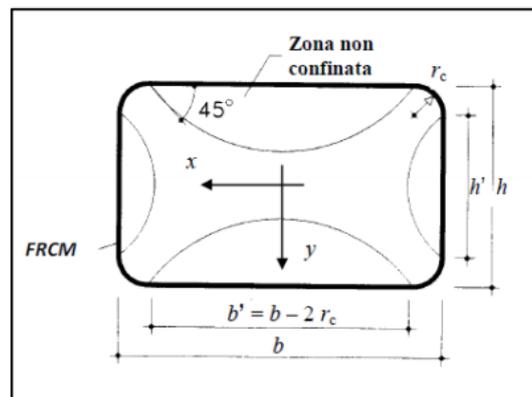


Figura 25_ Confinamento mediante FRCM di elementi pilastro a sezione quadrata o rettangolare

Nel caso di confinamento di colonne mediante reti di acciaio, tale prescrizione sul raggio di curvatura può essere disattesa. Il dispositivo di piegatura da utilizzare deve essere indicato nel manuale di installazione fornito dal Fabbricante. Possono essere utilizzate le formule già introdotte per le sezioni circolari, con le sole seguenti varianti:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 * A_m}; \quad A_m = bh \quad (75)$$

2.4.b CIRCOLARE CNR DT 215 (2018)

La verifica dell'elemento confinato, soggetto a compressione centrata, consiste nell'accertare che sia soddisfatta la seguente limitazione:

$$N_{ed} \leq N_{Rmc,d} \quad (76)$$

La resistenza assiale di progetto, $N_{Rmc,d}$, è definita come segue:

$$N_{Rmc,d} = f_{med} A_m > f_{md} A_m \quad (77)$$

dove il simbolo A_m rappresenta l'area della sezione trasversale dell'elemento confinato, f_{md} è la resistenza a compressione della muratura non confinata e f_{mcd} è il valore di progetto della resistenza a compressione della muratura confinata.

Alla resistenza di progetto, f_{med} , di un elemento confinato soggetto ad un valore f_1 della pressione di confinamento, di seguito definita e limitata dalle prestazioni meccaniche della matrice, il cui danneggiamento influenza l'efficacia dell'interazione con le fibre di rinforzo, contribuisce soltanto una quota parte di quest'ultima, $f_{l,eff}$, detta "pressione efficace di confinamento" che dipende dalle caratteristiche della colonna di muratura:

$$f_{med} = f_{md} \left[1 + k' \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{md}} \right)^{\alpha_1} \right] \quad (78)$$

k' è un coefficiente (adimensionale) di incremento della resistenza ed α_1 è un esponente al quale, in mancanza di comprovati risultati sperimentali, può essere assegnato il valore 0,5. Il valore del coefficiente di incremento della resistenza k' può essere stabilito sulla base di risultati sperimentali ottenuti su provini di muratura dalle caratteristiche analoghe a quelle da confinare. In alternativa, è possibile avvalersi della seguente relazione:

$$k' = \alpha_2 \left[\left(\frac{g_m}{1000} \right)^{\alpha_3} \right] \quad (79)$$

essendo g_m la densità di massa della muratura espressa in kg/m³ e α_2 e α_3 coefficienti ai quali cautelativamente può essere attribuito il valore 1,0, in mancanza di risultati sperimentali che giustificano assunzioni diverse.

Nel caso di colonne circolari di diametro D , confinate con n_f strati di rinforzo, aventi spessore equivalente delle fibre nella direzione ortogonale all'asse dell'elemento f e t e la cui matrice sia caratterizzata da un valore $f_{c,mat}$ della resistenza caratteristica a compressione, la pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$, può essere calcolata come:

$$f_{l,eff} = f_l * k_H * k_{mat} \quad (80)$$

$$f_l = \frac{2 * n_f * t_f * E_f * \varepsilon_{ud,rid}}{D} \quad (81)$$

essendo f_l la pressione di confinamento, k_H il coefficiente di efficienza orizzontale, da assumersi per le colonne circolari rivestite con continuità pari a 1, e $\varepsilon_{ud,rid}$ la deformazione di calcolo del composito FRCM, appresso definita.

Quest'ultima è assunta pari a:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \left\{ k_{mat} * \eta_a * \frac{\varepsilon_{uf}}{\gamma_m}; 0,004 \right\} \quad (82)$$

Con

$$k_{mat} = \alpha_4 \left(\rho_{mat} \frac{f_{c,mat}}{f_{md}} \right)^2 < 1 \quad (83)$$

$$\rho_{mat} = 4 \frac{t_{mat}}{D} \quad (84)$$

essendo t_{mat} lo spessore complessivo del rinforzo FRCM e k_{mat} il coefficiente adimensionale di efficacia del confinamento che tiene conto della presenza della matrice inorganica. In mancanza di risultati sperimentali che giustificano assunzioni diverse, il coefficiente α_4 può essere assunto pari a 1.81. In assenza di controlli specifici in situ che consentano una misura accurata di t_{mat} , nella valutazione della percentuale geometrica della matrice di rinforzo, ρ_{mat} , si consiglia di adoperare per t_{mat} , un valore cautelativamente non superiore a 10 mm.

Il confinamento mediante FRCM di elementi a sezione quadrata o rettangolare consente di conseguire solo modesti incrementi della resistenza a compressione. Applicazioni di questo genere devono pertanto essere attentamente

vagliate ed analizzate. In assenza di adeguate prove sperimentali, che ne comprovino l'efficacia, non va considerato l'effetto del confinamento esterno su sezioni rettangolari per le quali $b/h > 2$. Prima dell'applicazione del sistema FRCM è opportuno procedere ad un arrotondamento degli spigoli della sezione, allo scopo di evitare pericolose concentrazioni di tensione localizzate in corrispondenza degli stessi, che potrebbero provocare una rottura prematura del sistema. Il raggio di curvatura dello spigolo deve soddisfare la seguente limitazione:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 * A_m}; \quad A_m = bh \quad (85)$$

2.4.c NORMATIVA ACI 549-6R (2020)

Il confinamento di colonne in muratura, comporta l'incremento della resistenza cilindrica e della deformazione di esso. L'entità di tale contributo risulta essere in funzione delle proprietà del rinforzo stesso.

Il massimo valore della resistenza a compressione, a provino già confinato, risulta essere in funzione della massima pressione efficace di confinamento, f_l :

$$f'_{ccm} = f_{mu} + 3,3\Psi_f f_{l,eff} \quad (86)$$

Con

$$f_{l,eff} = k_a k_v f_l \quad (87)$$

$$f_l = \frac{2n_f t_f E_f \varepsilon_{fe}}{D} \quad \text{per sezione circolare} \quad (88)$$

Dove t_f è lo spessore della fibra del rinforzo, f_{mu} è la resistenza a compressione del provino non confinato, n_f numero di strati di rinforzo, D è il diametro del provino sottoposto a compressione. Il coefficiente k_a , invece, risulta essere in funzione della forma della sezione trattata:

$$k_a = 1 \quad \text{per sezione circolare} \quad (89)$$

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad \text{per sezione rettangolare con rapporto tra dimensioni maggiore di 2} \quad (90)$$

3. DATABASE SPERIMENTALE

Nel seguente capitolo, dopo essere venuti a conoscenza delle diverse modalità di rinforzo e dei materiali costituenti i vari provini, si vanno a conoscere i diversi articoli sperimentali che sono stati scelti per poter, poi, eseguire la convalidazione dei modelli adottati.

Di seguito, verranno esaminati prima gli articoli sperimentali relativi alle verifiche sul confinamento mediante FRP di colonne in calcestruzzo e in muratura, e poi per quelli rinforzati tramite FRCM.

3.1 CONFINAMENTO DI COLONNE IN CALCESTRUZZO MEDIANTE FRP

Il seguente paragrafo, va a concentrarsi sulla metodologia di confinamento delle colonne il calcestruzzo, quale vede l'uso di FRP. Entrando nello specifico, vengono presi in considerazione tre articoli sperimentali quali risultano essere i seguenti:

1. *Silva, MA, & Rodrigues, CC (2006). Effetti dimensionali e di rigidità relativa sulla rottura per compressione di colonne in calcestruzzo avvolte con vetroresina FRP. Journal of Materials in Civil Engineering 18 (3), 334-342.*
2. *Campione, G., La Mendola, L., Monaco, A., Valenza, A., & Fiore, V. (2015). Comportamento a compressione di cilindri in calcestruzzo avvolti esternamente con fibre di basalto. Compositi Parte B: Ingegneria, 69, 576-586.*
3. *Donnini, J., Spagnuolo, S., & Corinaldesi, V. (2019). Confronto tra l'uso di FRP, FRCM e HPM per il confinamento del calcestruzzo. Compositi Parte B: Ingegneria, 160, 586-594.*

3.1.a SILVA AND RODRIGUES (2006)

Nell'articolo sperimentale di *Silva and Rodrigues (2006)*, sono stati testati 12 provini cilindrici realizzati in calcestruzzo, di cui 11 presentano un diametro pari a 150 mm e un'altezza di 300 mm, mentre il restante ha un diametro di 250 mm e medesima altezza. Come caratteristiche meccaniche, tali presentano un valore medio di $f_{c0,exp}$, resistenza iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 27,4 Mpa, un valore medio di $\epsilon_{c0,exp}$, deformazione iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 0,2% ed un valore medio di E_c , modulo elastico del calcestruzzo, che risulta essere pari a 32,1 GPa.

Spostando l'attenzione sui parametri del rinforzo, tale rinforzo presenta un modulo elastico della fibra, E_f , pari a 210 GPa, e una deformazione media pari a 2,18%.

Nella successiva **Tabella 1**, sono riportati i dati iniziali relativi ai diversi provini cilindrici testati. Oltre a tali, vengono riportati i risultati finali in termini di resistenza cilindrica e deformazione ultima di confinamento, dovuti all'inserimento del FRP.

ID	D [mm]	H/D	fc [MPa]	tf [mm]	Ef [GPa]	Efu [%]	fcc [MPa]	Ecc [%]	ke
1	150	2	27,4	2,54	21	2,18	1,6	2,61	1
2	150	2	27,4	2,54	21	2,18	89,4	2,72	1
3	150	2	27,4	2,54	21	2,18	87,5	2,28	1
4	150	3	27,4	2,54	21	2,18	91,9	2,34	1
5	150	3	27,4	2,54	21	2,18	89,8	2,32	1
6	150	3	27,4	2,54	21	2,18	91,9	2,31	1
7	150	4	27,4	2,54	21	2,18	81,2	2,05	1
8	150	4	27,4	2,54	21	2,18	88,7	2,55	1
9	150	4	27,4	2,54	21	2,18	87,5	2,21	1
10	150	5	27,4	2,54	21	2,18	89,1	2,43	1
11	150	5	27,4	2,54	21	2,18	86	2,65	1
12	250	3	27,4	2,54	21	2,18	55,8	1,09	1
13	150	5	27,4	3,81	21	2,18	128,1	2,44	1

Tabella 1_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre un grafico dove si va ad evidenziare la variazione l'incremento della resistenza a compressione conseguenza del processo di confinamento (**Figura 26**). Inoltre, è stato possibile stillare un secondo grafico quale va ad indicare come varia l'incremento deformativo nei provini sottoposti al test citato (**Figura27**).

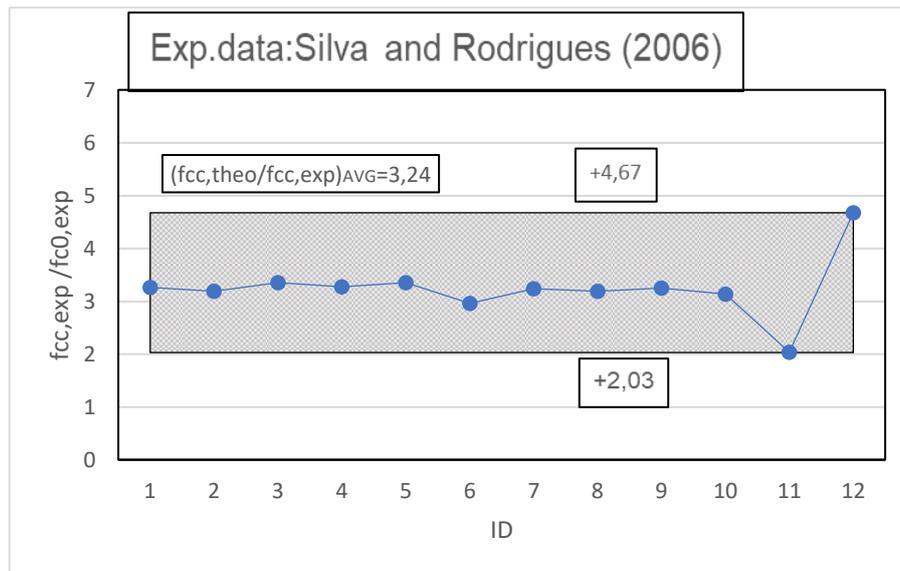


Figura 26_ Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico, si registra un incremento della resistenza cilindrica compresa tra 2,03 e 4,67 volte. Nei primi 10 provini testati, si registrano dei valori di accrescimento che oscillano tra le 3 e le 3,5 volte, con un valore medio di incremento della resistenza pari a 3,22 volte. In corrispondenza del provino n.11, ossia l'elemento con diametro pari a 250 mm, si registra un abbattimento del 36% da parte della resistenza cilindrica a provino confinato. Da notare, che questi valori ottenuti risultano essere conseguenza di un confinamento di provini cilindrici tramite applicazione di uno spessore complessivo della fibra pari a 2,54 mm. Infine l'ultimo provino, con elemento testato di diametro pari a 150 mm e spessore della fibra rinforzante pari a 3,81mm, mostra il valore picco che risulta essere 4,67 volte. Dalla prova eseguita, si può asserire, in termini di incremento di resistenza a compressione, che a parità dello spessore della fibra rinforzante, l'efficacia tende ad essere inferiore all'aumentare della sezione trasversale del provino. Altra osservazione, è il fatto che si registra un aumento dell'efficacia all'aumentare dello spessore della fibra rinforzante.

Il valore sperimentale medio di incremento della resistenza a compressione risulta essere 3,24 volte.

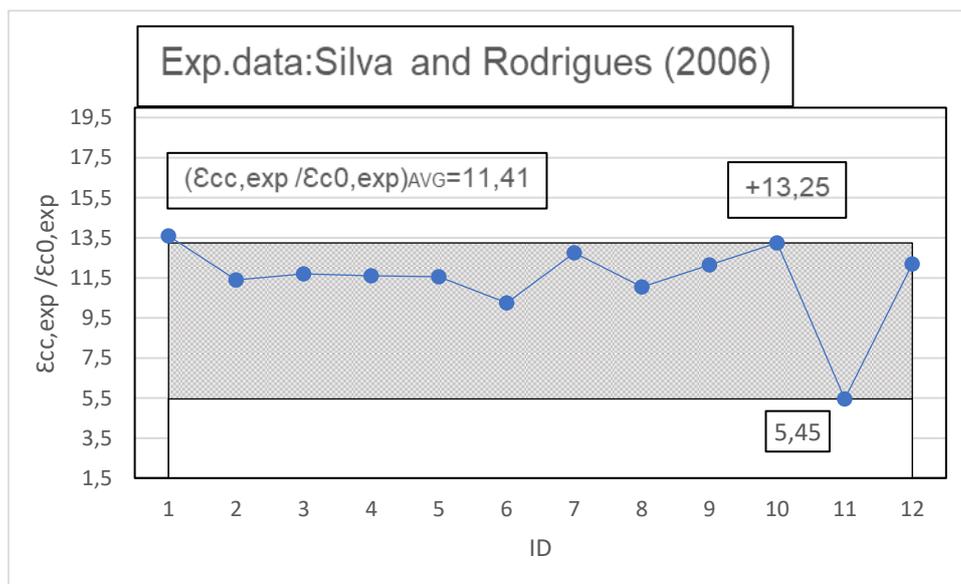


Figura 27_Valori sperimentali dell'incremento di deformazione dei provini

Come mostrato dal grafico riportato in **Figura 27**, si registra un incremento della deformazione compresa tra 5,75 e 13,25 volte. Nei primi 10 provini testati, quali vanno a presentare un diametro pari a 150 mm e spessore della fibra rinforzante pari a 2,54mm, si registrano dei valori di accrescimento che vanno ad oscillare tra le 11 e le 13,25 volte, con un valore medio di incremento della resistenza pari a 11,93 volte. In corrispondenza del provino n.11, si registra un abbattimento del 55% da parte della resistenza cilindrica a provino confinato. Tale differenziazione prestazionale è spiegata dal fatto che il provino in questione presenta un diametro più grande, ossia 250 mm. Infine l'ultimo test, mostra un incremento di 12,2 volte, quale è stato ottenuto dall'applicazione di un rinforzo fibroso con spessore pari a 3,81 mm su un provino di diametro pari a 150 mm.

3.1.b CAMPIONE ET AL. (2015)

Nell'articolo sperimentale di *Campione et al. (2015)*, sono stati presi in considerazione 8 provini cilindrici realizzati in calcestruzzo, quali presentano un diametro pari a 150 mm e un'altezza di 300 mm. Come caratteristiche meccaniche, si presenta un valore medio di $f_{c0,exp}$, resistenza iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 43,75 Mpa, un valore medio di $\epsilon_{c0,exp}$, deformazione iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 0,2% ed un valore medio di E_c , modulo elastico del calcestruzzo, che risulta essere pari a 32,2 GPa.

Spostando l'attenzione sui parametri del rinforzo, tale presenta un modulo elastico della fibra, E_f , pari a 230 GPa, una deformazione media pari a 1,8%. Nella successiva **Tabella 2**, saranno a riportati i dati iniziali relativi ai diversi provini cilindrici testati. Oltre a tali vengono riportati i risultati finali, in termini di resistenza cilindrica e deformazione di confinamento, dovuti all'inserimento del *FRP*.

ID	f_c [MPa]	ϵ_c [%]	$\epsilon_{c0,85}$ [%]	ϵ_{cu} [%]	E_c [MPa]
C1.1	40,6	0,91	0,27	0,58	27120
C1.2	44	0,22	0,33	0,66	32000
C1.3	40,7	0,2	0,28	0,67	29900
C1.4	44,2	0,2	0,275	0,1	31600
C3.1	85	/	/	1,72	33700
C3.2	86	/	/	2,2	33740
C3.3	87	/	/	2,3	36070
C3.4	85	/	/	2,4	34060

Tabella 2_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre il grafico dove si va ad evidenziare la variazione del rapporto sperimentale tra valore della resistenza cilindrica del provino una volta confinato con la resistenza cilindrica del provino privo di confinamento (**Figura 28**). Inoltre, è stato possibile stillare un secondo grafico che va ad indicare la variazione del rapporto sperimentale tra valore della deformazione a provino confinato e deformazione del provino non confinato (**Figura 29**).

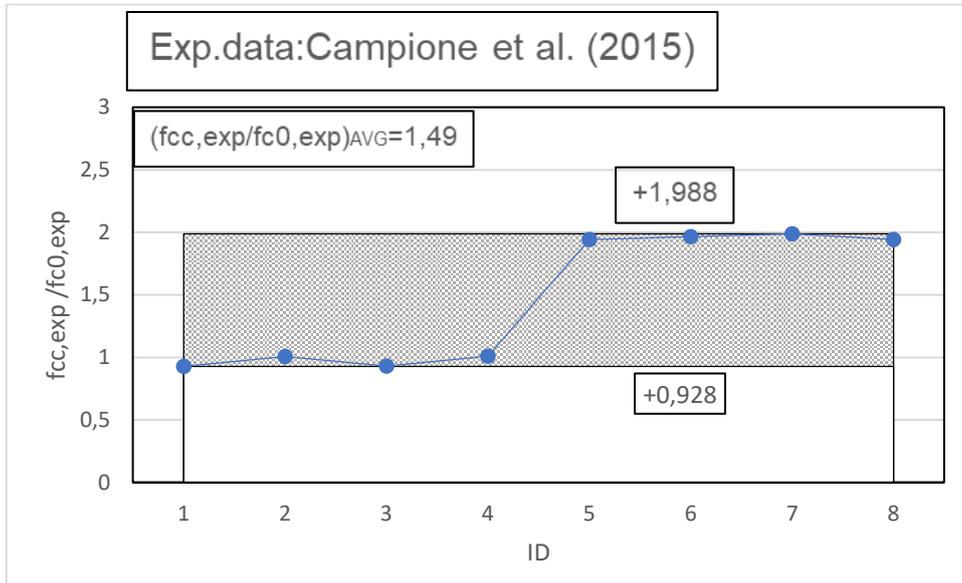


Figura 28_Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico, si registra un incremento della resistenza cilindrica compresa tra 2,03 e 1,98 volte. Nei primi 4 provini testati, quali hanno un valore medio di resistenza iniziale pari a 42 MPa, si registrano dei valori vicini all'unità, comportando una soglia minima di accrescimento in termini di resistenza a compressione. Invece, nel secondo set di provini, dove la $f_{c0,exp}$ presenta un valore doppio rispetto al precedente set, si registra un incremento molto più rilevabile con valore medio pari a 1,98 volte, quale va a corrispondere anche al valore di picco. Si può asserire che, a parità di spessore del rinforzo fibroso e dimensioni geometriche del provino, vi è un'efficacia del rinforzo che risulta essere direttamente proporzionale allo spessore del rinforzo.

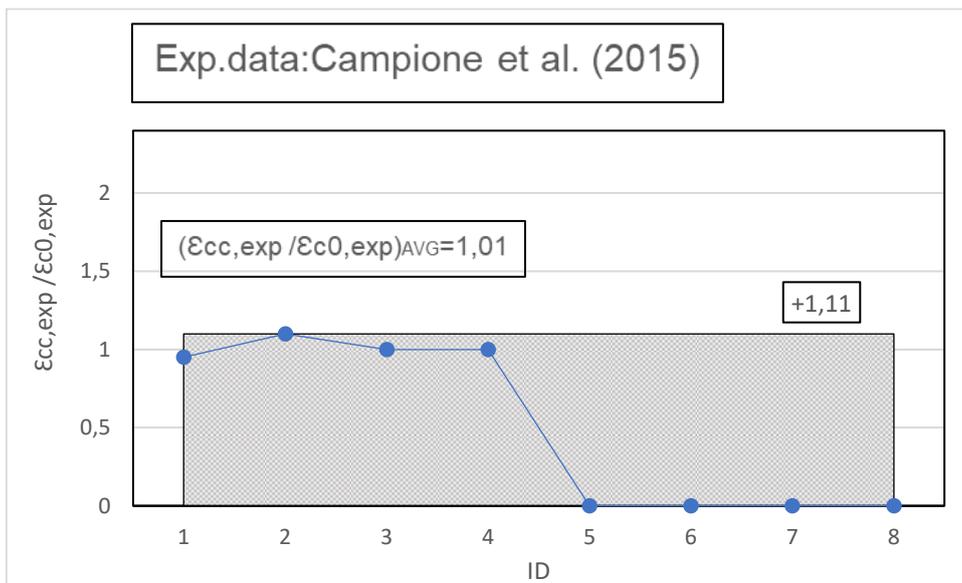


Figura 29_Valori sperimentali dell'incremento di deformazione dei provini

Invece, come possibile notare dal grafico in **Figura 29**, si registra un incremento della deformazione fino a 1,10 volte.

Qui, si hanno a disposizione i valori dei rapporti deformativi solo dei primi 4 provini e per questo, nel grafico si registra un abbattimento dei valori nella seconda parte. Nel primo gruppo di provini, si registra una variazione dei valori che presenta una media di incremento deformativo pari a 1,01 volte.

3.1.c DONNINI ET AL. (2019)

Nell'articolo di *Donnini et al. (2019)*, sono stati presi in considerazione 6 provini cilindrici realizzati in calcestruzzo, quali hanno un diametro di 140 mm e un'altezza di 300 mm. Come caratteristiche meccaniche, tali presentano un valore medio di $f_{c0,exp}$, resistenza iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 11,4 Mpa, un valore medio di $\epsilon_{c0,exp}$, deformazione iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 1,49% ed un valore medio di E_c , modulo elastico del calcestruzzo, che risulta essere pari a 26,8 GPa.

Spostando l'attenzione sui parametri del rinforzo, vengo utilizzate 3 tipologie e tali vengono riassunte nella seguente tabella:

Material	Orientation/type	Tensile strenght[KN/m]	Elastic modulus [GPa]	Ultimate strain [%]	Nominal Thickness [mm]	Fabric weight [g/m ²]
Carbon fabric (CF)	Bi-directional	240	235	1,5	0,048	172
Carbon Sheet (CF)	Unidirectional	800	240	1,8	0,164	300
PBO fabric	Unidirectional	264	270	2,5	0,046	146

Tabella 3 Parametri geometrici e meccanici del materiale di rinforzo FRP

Nella successiva **Tabella 4**, saranno a riportati i dati iniziali relativi ai diversi provini cilindrici testati nell'articolo sperimentale citato. Oltre a tali vengono riportati i risultati finali, in termini di resistenza cilindrica e deformazione di confinamento, dovuti all'inserimento del FRP.

Specimen	Fmax [KN]	fc0 [MPa]	fcc [MPa]	εc0 [%]	εcc [%]	fcc /fc0	εcc/εc0
E_CS_1	497	11,4	32,31	0,359	1,778	2,92	5,13
E_CS_2	477	11,4	31,01	0,359	1,742	2,72	4,85
E_PBO_1	330	11,4	21,45	0,359	1,271	1,94	3,67
E_PBO_2	321	11,4	20,87	0,359	1,259	1,83	3,51
E_CF_1	305	11,4	19,83	0,359	1,297	1,79	3,74
E_CF_2	297	11,4	19,31	0,359	1,107	1,69	3,08

Tabella 4 Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre un grafico dove si va ad evidenziare la variazione del rapporto sperimentale tra valore della resistenza cilindrica del provino una volta confinato con la resistenza cilindrica del provino privo di confinamento (**Figura 30**). Inoltre, è stato possibile stillare un secondo grafico che va a mostrare la variazione del rapporto sperimentale tra valore della deformazione a provino confinato e deformazione del provino non confinato (**Figura 31**).

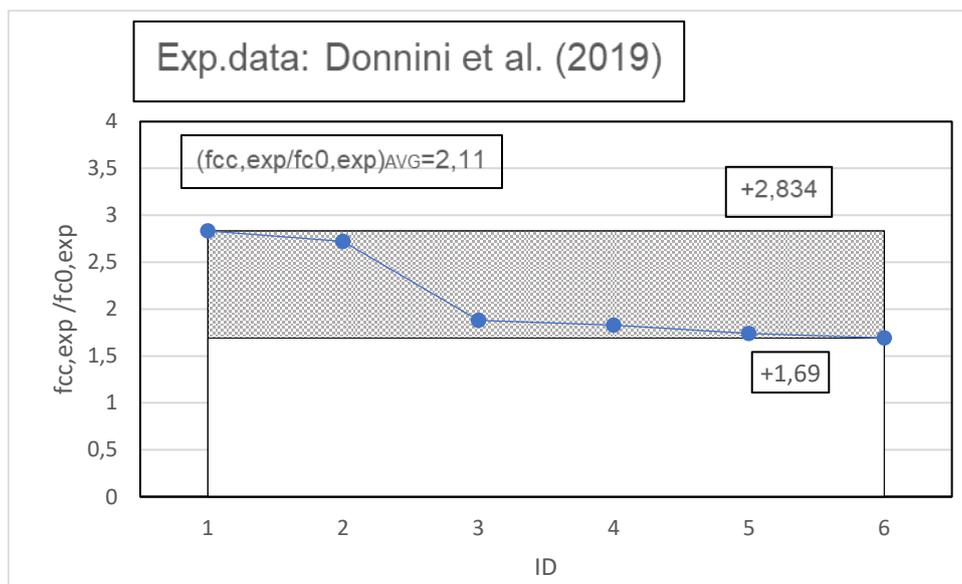


Figura 30_Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico, si registra un incremento della resistenza cilindrica compresa tra 1,69 e 2,83 volte. Nel primo set di provini, quali presentano uno spessore della fibra pari a 0,164 mm e modulo elastico pari a 240000 MPa, si registra un incremento della resistenza vicina alle 2.83 volte. Per il secondo gruppo di provini, caratterizzati da uno spessore della fibra pari a 0,046 mm e modulo elastico pari a 270 GPa, si un abbattimento della resistenza confinata di circa 31%. Infine, per le due ultime prove a compressione, si hanno dei valori molto prossimi a 1,69 volte conseguenti all'applicazione di un rinforzo fibroso dallo spessore di 0,048 mm e modulo elastico pari a 235 MPa.

Da osservare che il valore medio complessivo dei vari provini, risulta essere pari a 2,11 volte.

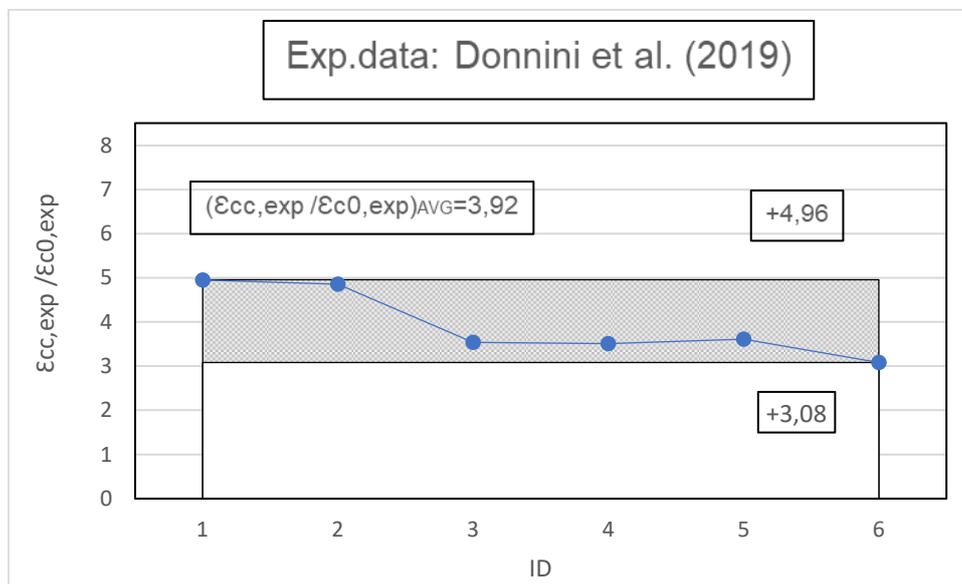


Figura 31_Valori sperimentali dell'incremento di deformazione dei provini

Grafico molto simile a quello precedente, risulta essere quello riportato in **Figura 31**, dove si registra un incremento della deformazione compresa tra 3,08 e 4,95 volte. Nei primi 2 provini testati, con uno spessore della fibra pari a 0,164 mm e modulo elastico pari a 240000 MPa, si registrano dei valori molto vicino al valore di picco con una media pari 4,9 volte. Per i successivi due provini, con uno spessore della fibra pari a 0,046 mm e modulo elastico pari a 270 GPa, si registra un incremento molto meno tangibile, dove si presenta un valore medio di accrescimento pari a 3,52 volte. Infine, per i due provini quali vedono l'applicazione di un rinforzo fibroso dallo spessore di 0,048 mm e modulo elastico pari a 235 MPa, hanno un incremento molto simile al set precedente.

3.2 CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA MEDIANTE FRP

Il seguente paragrafo, invece, va a concentrarsi sulla metodologia di confinamento delle colonne in muratura, quale vede l'uso di FRP. Entrando nello specifico, vengono presi in considerazione tre articoli sperimentali quali risultano essere i seguenti:

1. Sneed, LH, Carloni, C., Baietti, G., & Fraioli, G. (2017). Confinamento di colonne in muratura di laterizio con SRG. In *Key Engineering Materials* (Vol. 747, pp. 350-357). Trans Tech Publications Ltd.
2. Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2020). Confinement of masonry columns with textile-reinforced mortar jackets. *Construction and Building Materials*, 258, 120343.
3. Theofanis, K. D. (2015, December). Textile reinforced mortar system as a means for confinement of masonry structures. In *Proc. In: the 12th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-12) & the 5th Asia-Pacific Conference on Fiber Reinforced Polymers in Structures (APFIS-2015) Joint Conference* (Vol. 14, p. 16).

3.2.a SNEED ET AL. (2017)

Nell'articolo sperimentale di Sneed et al. (2017), sono stati presi in considerazione 15 provini quadrati realizzati in muratura con dimensione 250 x 250 mm. Come caratteristiche meccaniche, tali presentano un valore medio di $f_{m0,exp}$, resistenza iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 9,79 Mpa, un valore medio di $\epsilon_{m0,exp}$, deformazione iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 0,2% ed un valore medio di E_m , modulo elastico della muratura, che risulta essere pari a 26 GPa.

Spostando l'attenzione sui parametri del rinforzo, tale rinforzo presenta un modulo elastico della fibra, E_f , pari a 9 GPa, una deformazione media pari a 0,0209.

Nella successiva **Tabella 8**, saranno a riportati i dati iniziali relativi ai diversi provini cilindrici testati nell'articolo sperimentale citato. Oltre a tali vengono riportati i risultati finali, in termini di resistenza cilindrica e deformazione di confinamento, dovuti all'inserimento del FRP

Specimen	Fiber density	Corner radius, r [mm]	f'c0 or f'cc [MPa]	f'cc /f'c0
C-1-6-0-1	670	0	10,28	1,27
C-1-6-0-2	670	0	9,46	
C-1-6-0-3	670	0	9,14	
C-1-6-0-4	670	0	8,54	
C-1-6-9-1	670	9,5	9,21	1,28
C-1-6-9-2	670	9,5	9,07	
C-1-6-9-3	670	9,5	9,96	
C-1-6-38-1	670	38,1	9,74	1,41
C-1-6-38-2	670	38,1	10,4	
C-1-6-38-3	670	38,1	11	
C-1-6-38-4	670	38,1	10,48	
C-1-12-9-1	1200	9,5	10,42	1,35
C-1-12-9-2	1200	9,5	9,7	
C-1-12-9-3	1200	9,5	9,75	
C-1-12-9-4	1200	9,5	10,11	

Tabella 8_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre il grafico dove si va ad evidenziare la variazione del rapporto sperimentale tra valore della resistenza cilindrica del provino una volta confinato con la resistenza cilindrica del provino privo di confinamento (**Figura 32**).

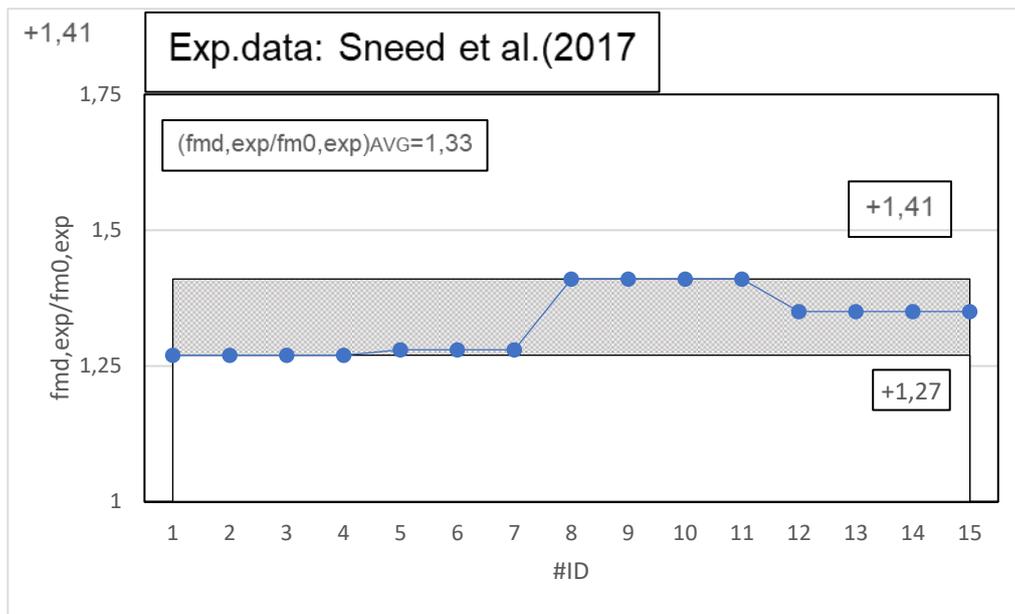


Figura 32_Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico in **Figura 32**, si registra un incremento della resistenza cilindrica compresa tra 1,27 e 1,41 volte. Nel primo set, composto da 4 provini, si registrano dei valori di accrescimento costanti quali risultano essere pari a 1,27 volte, dove tali valori si registrano in corrispondenza dei provini con raggio di curvatura, r_c , pari a 0 e densità della fibra del materiale di confinamento pari a 670 g/m^2 ; nel secondo set di 3 provini, si registrano dei valori di accrescimento poco più alti rispetto a quelli precedenti, con un valore medio di 1,28 volte, quali sono ottenuti dalla presenza di raggio di curvatura pari a 9,5 mm e densità della fibra pari a 670 g/m^2 ; nei successivi 4 provini, invece, si presenta stessa densità della fibra ma con raggio di curvatura pari a 38,1 mm, che comporta un accrescimento di resistenza pari a 1,41 volte. Infine, gli ultimi 4 provini, presentano una densità della fibra pari a 1200 g/m^2 e un raggio di curvatura pari a 9,5 mm che vanno a comportare dei valori di incremento poco più bassi, rispetto al blocco precedente, e risultano essere pari a 1,35.

Il valore sperimentale medio di incremento della resistenza cilindrica ottenuto risulta essere 1,33 volte.

3.2.b KOUTAS ET AL. (2020)

L'articolo sperimentale di *Koutas et al. (2020)*, prende in considerazione 9 provini in muratura di dimensione 215 x 215 mm. Questi presentano un valore medio della resistenza cilindrica del provino non confinato, $f_{m0,exp}$, pari a $26,2 \text{ Mpa}$, un valore medio di $\epsilon_{m0,exp}$, deformazione ultima a compressione del provino non confinato, pari a 0,37% ed un valore medio di E_m , modulo elastico della muratura, che risulta essere pari a $26,2 \text{ GPa}$.

Per quanto riguarda, invece, il materiale di rinforzo presenta un valore di modulo elastico delle fibre, E_f , pari a 9000 MPa, valore della resistenza massima a trazione della fibra, f_{fu} , pari a 4800 MPa e deformazione massima della fibra, ϵ_{fu} , pari a 0,0125 mm/m.

Specimen	Ultimate load [KN]	Compressive strength [MPa]	Normalized strength	Ultimate axial strain at peak load [KN]	Normalized axial strain
A_CH1	520	11,25	1,13	0,0076	2,05
A_CH2	679	14,69	1,47	0,0105	2,84
A_CH3	740	16,01	1,61	0,0151	4,08
A_CL1	495	10,71	1,07	0,007	1,89
A_CL3	647	14	1,4	0,0112	3,03
A_CL5	666	14,41	1,45	0,0127	3,43
A_GL3	588	12,72	1,28	0,0053	1,43
A_GL5	624	13,5	1,35	0,0075	2,03
A_GL7	685	14,82	1,59	0,0079	2,14

Tabella 9_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre il grafico dove si va ad evidenziare la variazione del rapporto sperimentale tra valore della resistenza cilindrica del provino una volta confinato con la resistenza cilindrica del provino privo di confinamento (**Figura 33**). Inoltre, è stato possibile stillare un secondo grafico

che va ad indicare la variazione del rapporto sperimentale tra valore della deformazione a provino confinato e deformazione del provino non confinato (**Figura 34**).

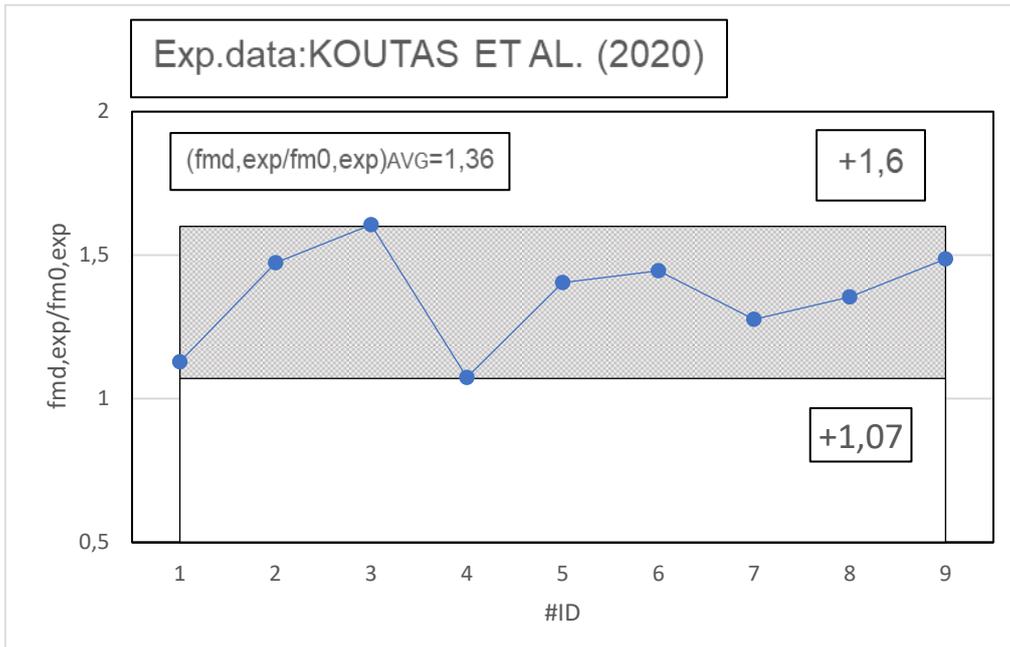


Figura 33_ Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico, si registra un incremento della resistenza cilindrica compresa tra 1,07 e 1,61 volte. I primi 3 provini risultano essere confinati tramite la fibra di carbonio pesante, indicata con la sigla *CH*, caratterizzata da una resistenza a trazione pari a 1382 Mpa, modulo elastico pari a 163,3 GPa, che fa conseguire un valore medio dell'incremento della resistenza pari a 1,39 volte. Invece, i successivi 3 provini, vengono confinati mediante l'applicazione di fibra di carbonio leggero, quale presenta una resistenza a trazione pari a 1501 Mpa, modulo elastico pari a 167 GPa, facendo presentare un valore medio di accrescimento pari a 1,30 volte. Nel terzo set, invece, vi sono 3 elementi confinati tramite fibra di vetro, quale presenta una f_{fw} pari a 794 Mpa e modulo elastico pari a 41,1 GPa, quale comporta un accrescimento medio della resistenza uguale a 1,36 volte.

Il valore sperimentale medio di incremento della resistenza cilindrica ottenuto risulta essere 1,36 volte.

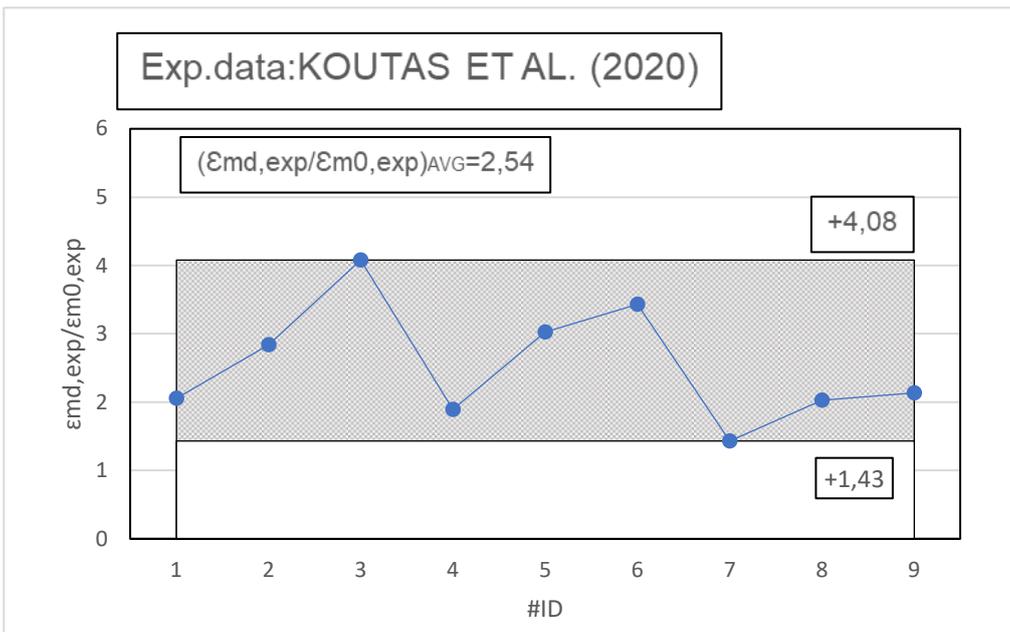


Figura 34_ Valori sperimentali dell'incremento di deformazione dei provini

Analoga analisi, è stata eseguita anche in termini deformativi. Difatti, l'articolo di *Koutas et al. (2020)* ha permesso l'estrapolazione del grafico riportato in **Figura 34**, quale va a mostrare il trend relativo all'accrescimento della deformazione ultima ottenuta mediante confinamento. I risultati sperimentali ottenuti, si presenta come molto distinti tra loro e questo aspetto è spiegato dal fatto che tali sono in funzione della tipologia di materiale rinforzante usato.

I primi 3 provini confinati tramite la fibra di carbonio pesante, indicata con la sigla *CH*, quale risulta presentare una resistenza a trazione pari a 1382 Mpa, modulo elastico pari a 163,3 GPa, comporta un valore medio dell'incremento di deformazione ultima pari a 2,98 volte. I successivi 3 provini, confinati con fibra di carbonio leggero, quale è caratterizzata da una resistenza a trazione pari a 1501 Mpa e modulo elastico pari a 167 GPa, presentano un valore medio di incremento pari a 2,78 volte. Nel terzo set, invece, vi sono 3 provini confinati con fibra di vetro, presentano un accrescimento medio della deformazione uguale a 1,86 volte. Il valore medio di incremento complessivo, risulta essere pari a 2,54 volte.

3.2.c THEOFANIS ET AL. (2015)

L'articolo sperimentale di *Theofanis et al. (2015)*, prende in considerazione 11 provini in muratura di dimensione 240 x 240 mm e altezza pari a 300 mm. Questi presentano un valore medio della resistenza cilindrica del provino non confinato, $f_{m0,exp}$, pari a 31,70 Mpa, un valore medio di $\epsilon_{m0,exp}$, deformazione iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 0,39 % ed un valore medio di E_m , modulo elastico della muratura, che risulta essere pari a 33,7 GPa. Da precisare, che i provini presi in considerazione fanno parte di quattro gruppi distinti in termini geometrici: nel *gruppo A* sono presenti provini quadrati con raggio di curvatura pari a 20 mm e confinati con uno strato di materiale rinforzate; *gruppo B*, invece, vi sono provini quadrati con raggio di curvatura pari a 10 mm e confinati con uno strato di materiale rinforzate; *gruppo C*, vi sono provini quadrati con raggio di curvatura pari a 10 mm e confinati con 2 strati di materiale rinforzate; infine, *gruppo D*, vi sono provini quadrati con raggio di curvatura pari a 10 mm e confinati con 3 strati di materiale rinforzate.

Per quanto riguarda, invece, il materiale di rinforzo presenta un valore di modulo elastico delle fibre, E_f , pari a 430 Mpa, valore della resistenza massima a trazione della fibra, f_{fu} , pari a 7,14 Mpa.

Specimen type	Compressive strenght [MPa]	Average Compressive strenght [MPa]	Ultimate strain
Group A			
C1_1_R20	1,97	2,07	0,019
C1_1_R20	2,85		0,018
C1_1_R20	1,4		0,011
Group B			
C1_1_R10	2,64	3,4	0,009
C1_1_R10	3,08		0,012
C1_1_R10	4,5		0,02
Group C			
C2_1_R10	-	4,6	-
C2_1_R10	3,99		0,013
C2_1_R10	5,22		0,024
Group D			
C3_1_R10	5,16	6,03	0,015
C3_1_R10	8,14		-
C3_1_R10	4,8		0,013

Tabella 10_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre il grafico dove si va ad evidenziare la variazione dei valori di accrescimento della resistenza a compressione da parte dei differenti provini una volta

confinati (**Figura 35**). Inoltre, è stato possibile stilare un secondo grafico che va ad indicare la variazione incrementale in termini di deformazione ultimata dovuta all'applicazione del rinforzo nei singoli provini (**Figura 36**).

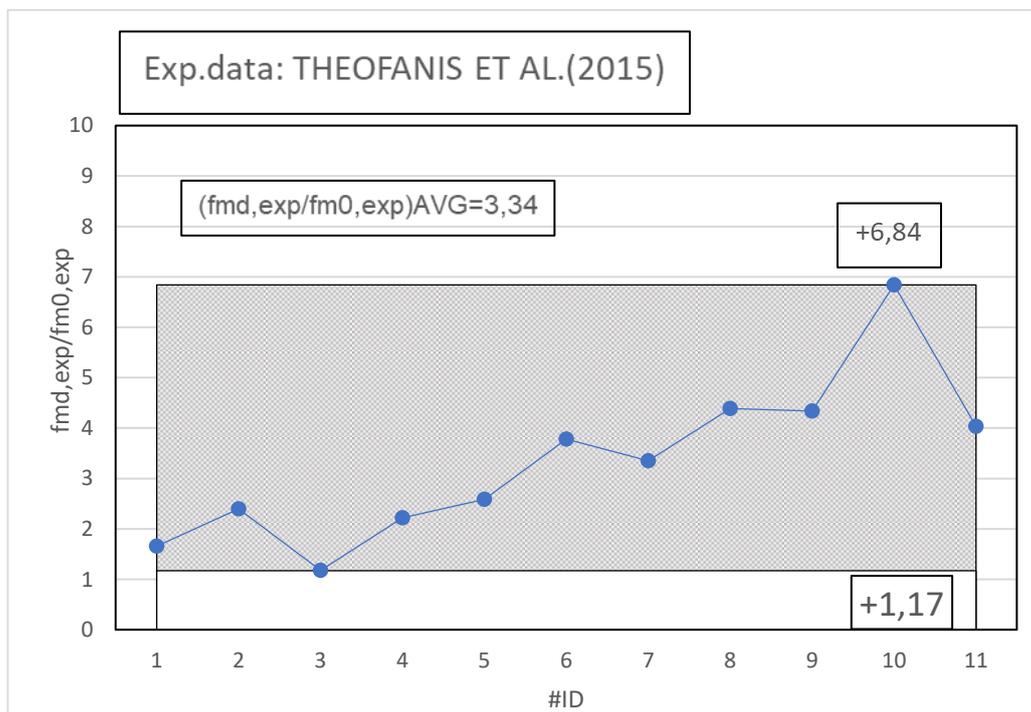


Figura 35_Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico, si registra un incremento della resistenza cilindrica fino a 6,84 volte. Come è possibile notare dalla **Tabella 10**, i valori incrementali risultano essere in funzione dell'entità del raggio di curvatura, r_c , e del numero di strato del materiale di confinamento: nel *gruppo A*, si registra un valore medio di incremento della resistenza pari a 2,07 Mpa; nel *gruppo B*, si ottiene un valore medio di crescita pari a 3,40 Mpa; nel *gruppo C*, si ha un valore medio di incremento pari a 4,60 Mpa; infine, nel *gruppo D*, si registra un valore medio di incremento della resistenza pari a 6,03 Mpa. Il valore sperimentale medio di accrescimento risulta essere 3,34 volte.

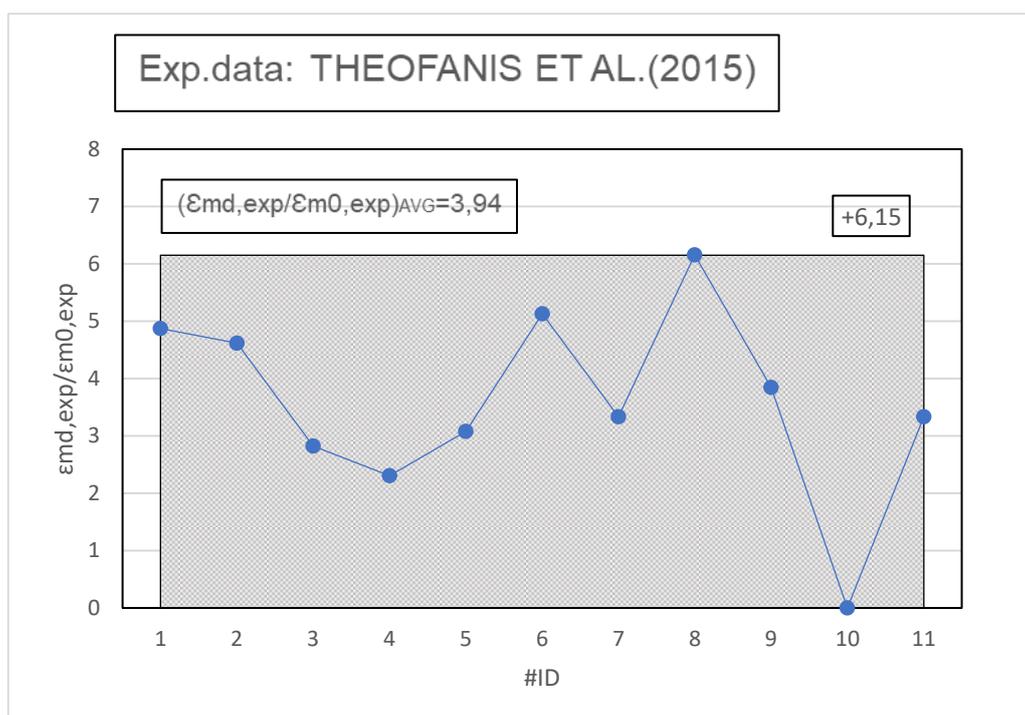


Figura 36_Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come mostrato nel grafico in **Figura 36**, si ha un incremento della deformazione cilindrica fino a 6,15 volte. Come è possibile notare dalla **Tabella 10**, i valori incrementali risultano essere in funzione dell'entità del raggio di curvatura, r_c , e del numero di strati del materiale di confinamento: infatti, nel *gruppo A*, si ha un valore medio di incremento della deformazione pari a 0,048; nel *gruppo B*, si ottiene una crescita media pari a 0,013; nel *gruppo C*, si registra un valore medio di incremento pari a 0,018; infine, nel *gruppo D*, si registra un valore medio di incremento pari a 0,014. Il valore sperimentale medio di incremento della deformazione ottenuto risulta essere 3,94 volte.

3.3 CONFINAMENTO DI COLONNE IN CALCESTRUZZO MEDIANTE FRCM

Il seguente paragrafo, invece, va a concentrarsi sulla metodologia di confinamento delle colonne in calcestruzzo, quale vede l'uso di FRCM. Entrando nello specifico, vengono presi in considerazione tre articoli sperimentali quali risultano essere i seguenti:

1. Trapko, T. (2014). *Elementi in calcestruzzo confinato con compositi PBO-FRCM. Materiali da costruzione e da costruzione*, 73, 332-338.
2. Colajanni, P., De Domenico, F., Recupero, A., & Spinella, N. (2014). *Colonne in calcestruzzo confinate con malte cementizie fibrorinforzate: sperimentazione e modellazione. Materiali da costruzione e da costruzione*, 52, 375-384.
3. Donnini, J., Spagnuolo, S., & Corinaldesi, V. (2019). *Confronto tra l'uso di FRP, FRCM e HPM per il confinamento del calcestruzzo. Compositi Parte B: Ingegneria*, 160, 586-594.

3.3.a TRAPKO ET AL. (2014)

Nell'articolo sperimentale di *Trapko et al. (2014)*, sono stati presi in considerazione 19 provini cilindrici realizzati in calcestruzzo, quali presentano un diametro pari a 113 mm e un'altezza di 300 mm. Come caratteristiche meccaniche, tali presentano un valore medio di $f_{c0,exp}$, resistenza iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 21,00 Mpa, un valore medio di $\epsilon_{c0,exp}$, deformazione iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 0,243% ed un valore medio di E_c , modulo elastico del calcestruzzo, che risulta essere pari a 30 GPa.

Spostando l'attenzione sui parametri del rinforzo, l'articolo sperimentale in questione va riassumerli nella **Tabella 11** che segue:

	FRCM
Thickness of layer [mm]	0,0455
Fabric width [mm]	1000
Ultimate load [KN/m]	240
Tensile Strength [MPa]	5270/5800
Young modulus [GPa]	270
	Cement based matrix
Tensile Strength [MPa]	3,5
Compressive strength [MPa]	29
Young modulus [GPa]	6

Tabella 11_ Parametri geometrici e meccanici del materiale di rinforzo FRCM

Invece, nella successiva **Tabella 12**, vengono riportati i dati iniziali relativi ai diversi provini cilindrici testati nell'articolo sperimentale citato. Oltre a tali vengono, si riportano i risultati finali in termini di resistenza a compressione confinata e deformazione di confinamento, dovuti all'inserimento di FRCM.

ID	a [mm]	b [mm]	r [mm]	f _{c0} [MPa]	ε _{c0} [%]	n	r [mm]	f _{cu} [MPa]	f _{cc} [MPa]	ε _{cu} [%]
1	113	113	56,5	22,6	0,2461	1	0,0455	5270	32,48	0,6184
2	113	113	56,5	22,6	0,2461	1	0,0455	5270	32,66	0,698
3	113	113	56,5	22,6	0,2461	2	0,091	5270	42,48	1,2118
4	113	113	56,5	22,6	0,2461	2	0,091	5270	42,96	1,13
5	113	113	56,5	22,6	0,2461	3	0,1365	5270	58,07	1,81
6	113	113	56,5	22,6	0,2461	3	0,1365	5270	55,8	1,7
7	113	113	56,5	22,6	0,2302	1	0,0455	5270	37,32	0,35
8	113	113	56,5	22,6	0,2302	1	0,0455	5270	36,45	0,35
9	113	113	56,5	22,6	0,2211	1	0,0455	5270	33,36	0,353
10	113	113	56,5	22,6	0,2211	1	0,0455	5270	33,13	0,347
11	113	113	56,5	22,6	0,2566	1	0,0455	5270	34,71	0,357
12	113	113	56,5	22,6	0,2566	1	0,0455	5270	34,34	0,351
13	113	113	56,5	18,26	0,2134	2	0,091	5270	40,85	0,512
14	113	113	56,5	18,26	0,2134	2	0,091	5270	36,64	0,537
15	113	113	56,5	18,26	0,2134	2	0,091	5270	39,43	0,51
16	113	113	56,5	18,26	0,2134	2	0,091	5270	39,78	0,469
17	113	113	56,5	18,26	0,2134	2	0,091	5270	37,34	0,467
18	113	113	56,5	18,26	0,2134	2	0,091	5270	32,39	0,46
19	113	113	56,5	18,26	0,2134	2	0,091	5270	32,57	0,467

Tabella 12_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali

Di seguito, andiamo ad elencare la nomenclatura dei diversi dati trattati:

- a,b, sono le dimensioni geometriche del provino;
- r, è il raggio curvatura del provino;
- f_{c0}, è la resistenza cilindrica del provino non confinato;
- ε_{c0}, è la deformazione ultima del provino non confinato;
- n, è il numero di strati del FRCC;
- t, è lo spessore del singolo strato di FRCC;
- f_u, è la resistenza ultima del provino non confinato;
- f_{cc}, è la resistenza cilindrica del provino confinato;
- ε_{cc}, è la deformazione ultima del provino confinato.

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre un grafico quale evidenzia la variazione del rapporto sperimentale tra valore della resistenza cilindrica del provino una volta confinato con la resistenza cilindrica del provino privo di confinamento (**Figura 37**). Inoltre, è stato possibile stillare un secondo grafico che va ad indicare la variazione del rapporto sperimentale tra valore della deformazione a provino confinato e deformazione del provino non confinato (**Figura 38**).

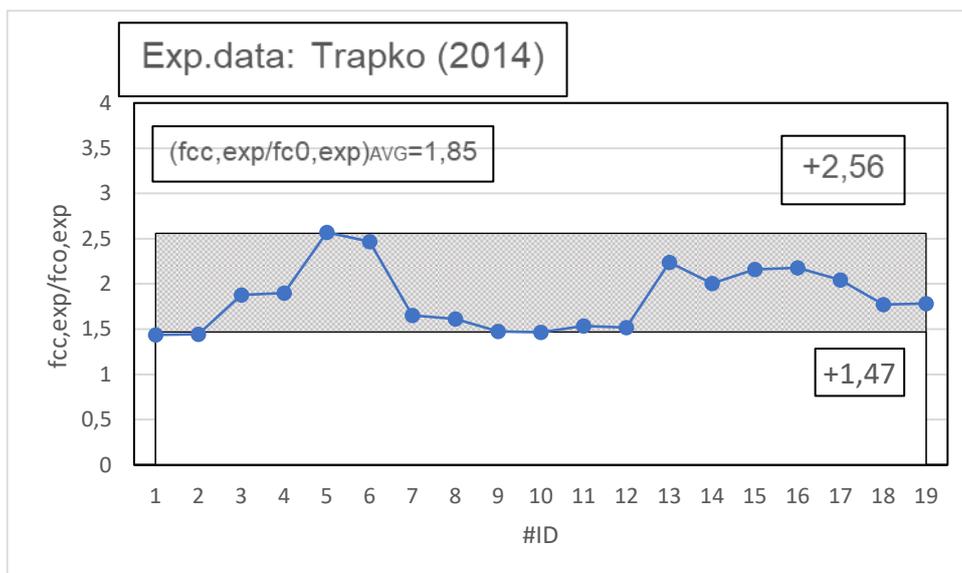


Figura 37_ Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico, si registra un incremento della resistenza cilindrica compresa tra 1,47 e 2,56 volte. Facendo riferimento alla **Tabella 2**, risulta essere chiaro che la variazione di incremento della resistenza cilindrica è in funzione del numero e dello spessore degli strati del materiale di confinamento. Nel primo di set di 6 provini, si registra un accrescimento dei valori che risulta essere lineare dettato dalla presenza di un solo strato di rinforzo e uno spessore di 0,0455mm nei primi due test, comportando un accrescimento medio pari a 1,44 volte; per il terzo e quarto provino, con la presenza di due strati di confinamento e spessore complessivo pari a 0,091 mm, si presenta un valore medio pari a 1,90 volte; infine nella terza copia, quale vede un rinforzo con spessore complessivo pari a 0,1365 dettato dai 3 strati applicati, presenta una crescita media pari a 2,51 volte.

Per i successivi provini, invece, si presentano dei valori di resistenza cilindrica che risultano essere nettamente più bassi e ciò è frutto dell'applicazione di un solo strato di FRCM con uno spessore complessivo pari a 0,0455 mm. L'abbattimento registratosi, rispetto al primo blocco di provini, risulta essere pari al 33%. Infine, negli ultimi 7 elementi testati, vi è il rinforzo mediante due strati di materiale di confinamento con uno spessore complessivo pari a 0,091mm. Come ci si aspettava, si registra un'impennata in termini di incremento pari al 19%.

Il valore sperimentale medio di incremento della resistenza cilindrica ottenuto risulta essere 1,85.

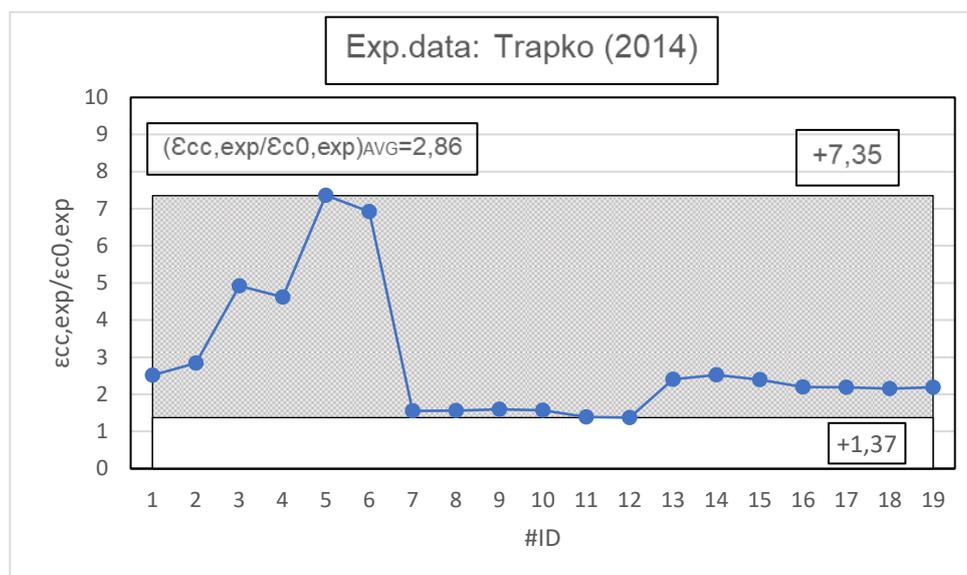


Figura 38_ Valori sperimentali dell'incremento di deformazione dei provini

Analogamente, è stata eseguita anche in termini deformativi. Difatti, l'articolo di *Trapko et al. (2014)* ha permesso l'estrapolazione del grafico riportato in **Figura 38**, quale va a mostrare l'andamento dell'incremento di deformazione

che si va ad ottenere grazie all'operazione di confinamento. I valori deformativi ottenuti nei diversi provini, risultano essere molto distinti tra loro e questo aspetto è spiegato dal fatto che tali sono in funzione del numero e spessore degli strati del materiale di confinamento. Come illustrato, il range di variazione risulta essere compreso tra 1,37 e 7,35 volte.

Nei primi 6 test a compressione, si presentano dei valori via via crescenti e tale risulta essere dettato dall'incremento del numero di strati e quindi dello spessore complessivo del confinamento: con l'applicazione di un solo strato si ha un incremento medio di 2,60 volte, mentre con due strati si ha un valore medio di incremento 2,76 volte, ed infine con tre si raggiunge un picco pari a 7,10 volte.

I successivi 6 provini, invece, presentano la sola applicazione di un solo strato di confinamento con spessore complessivo pari a 0,0455 mm ed infatti si va registrare un abbattimento del circa 500%.

Infine, con i restanti 6 test, dove i provini presentano due strati di materiale di confinamento, vi è una nuova risalita fino a raggiungere un incremento vicino a 2 volte.

Il valore medio di incremento, come mostrato dal grafico in **Figura 38**, ammonta 2,86 volte.

3.3.b COLAJANNI ET AL. (2014)

L'articolo sperimentale di *P. Colajanni et al. (2014)*, prende in considerazione dei provini in calcestruzzo con tre distinte tipologie di parametri geometrici. Infatti, sono stati considerati provini cilindrici di diametro pari a 154 mm e altezza pari a 335 mm, una seconda serie con provini di diametro pari a 200 mm e altezza pari a 335 mm ed un terzo set con forma della sezione quadrata con lati pari a 200 mm e altezza pari a 425 mm.

A scopo semplificativo, sono stati scelti solo 6 provini quali fanno parte della prima serie e che vanno a presentare un valore medio della resistenza cilindrica del provino non confinato, $f_{c0,exp}$, pari a 24,2 Mpa, un valore medio di $\epsilon_{c0,exp}$, deformazione iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 0,133% ed un valore medio di E_c , modulo elastico del calcestruzzo, che risulta essere pari a 30 GPa.

Per quanto riguarda, invece, il materiale di rinforzo si è optato per le *PBO* quale presenta un valore di modulo elastico delle fibre, E_f , pari a 270000 Mpa, valore della resistenza massima a trazione della fibra, f_{fu} , pari a 5800 Mpa e deformazione massima della fibra, ϵ_{fu} , pari a 21,5 mm/m.

Invece, nella successiva **Tabella 13**, saranno riportati i dati relativi ai diversi provini cilindrici testati nell'articolo sperimentale citato. Oltre a tali vengono riportati i risultati finali, in termini di pressione di confinamento e deformazione di confinamento, dovuti all'inserimento di *FRCM*.

Code	fc0 [MPa]	εc0 [%]	fcu [MPa]	εcu [%]	Ec [Gpa]	fcc [MPa]	εcc [%]	fccu [MPa]	εccu [%]	fcc/fc0	εccu/εcu	εfu/εfu0
CA1-2L	24,2	1,33	15,2	2,79	28	30,6	11,6	30,6	11,6	1,26	8,75	0,45
CA2-2L	24,2	1,33	15,2	2,79	28	31,3	6,82	31,3	7,11	1,29	5,13	0,4
CA3-2L	24,2	1,33	15,2	2,79	28	31,8	3,1	30,1	9,99	1,32	2,33	/
CA4-3L	24,2	1,33	15,2	2,79	28	33,8	9,63	33,8	9,63	1,4	7,24	0,5
CA5-3L	24,2	1,33	15,2	2,79	28	36,2	11,4	36,2	11,42	1,5	8,59	0,5
CA6-3L	24,2	1,33	15,2	2,79	28	39,7	14,8	39,7	14,85	1,64	11,1	0,54

Tabella 13_Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre un grafico dove quale va ad evidenziare la variazione dei valori incrementali della resistenza a compressione con provino confinato (**Figura 39**). E' possibile, inoltre, stilare un secondo grafico che va ad indicare il cambiamento dell'entità del rapporto sperimentale tra valore della deformazione ultima a provino confinato e deformazione ultima del provino non confinato (**Figura 40**).

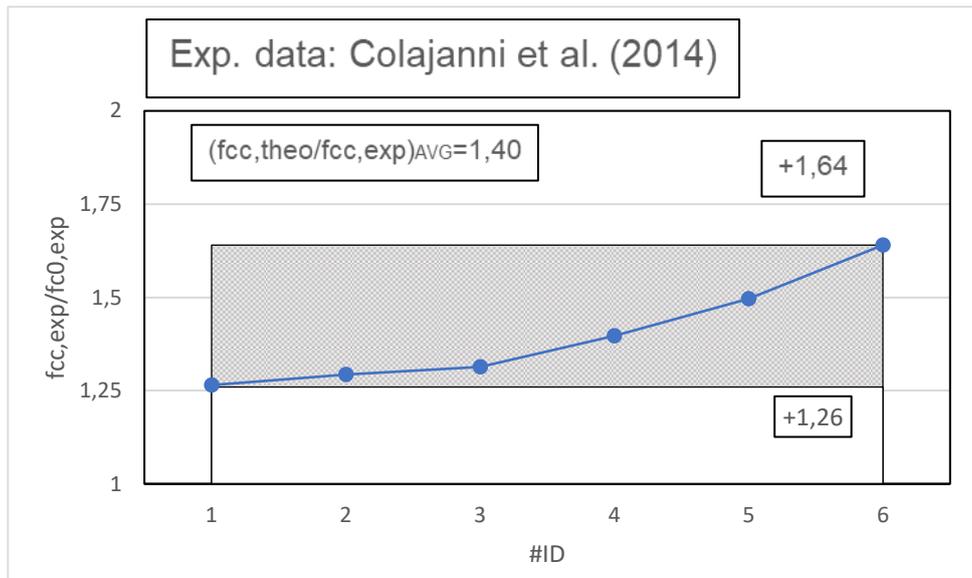


Figura 39_Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico, si registra un incremento della resistenza cilindrica compresa tra 1,26 e 1,64 volte. Facendo riferimento alla **Tabella 13**, risulta essere chiaro che la variazione di incremento della resistenza cilindrica è in funzione del numero n , e quindi, dello spessore complessivo del materiale di confinamento: nei primi 3 provini, si applica un confinamento tramite applicazione di due strati di rinforzo andando a comportare uno spessore complessivo di 0,0455 mm e valore medio di accrescimento pari a 1,29 volte; per la seconda terna di provini, si prevede inserimento di 3 strati di rinforzo e uno spessore complessivo rinforzante corrispondente a 0,1365 mm quale va a comportare un incremento medio di 1,51 volte. Quindi, a parità di parametri geometrici del provino, si ha un'efficacia maggiore del rinforzo con l'aumento del numero di strati applicati. Il valore medio di incremento registratosi risulta essere pari a 1,40 volte.

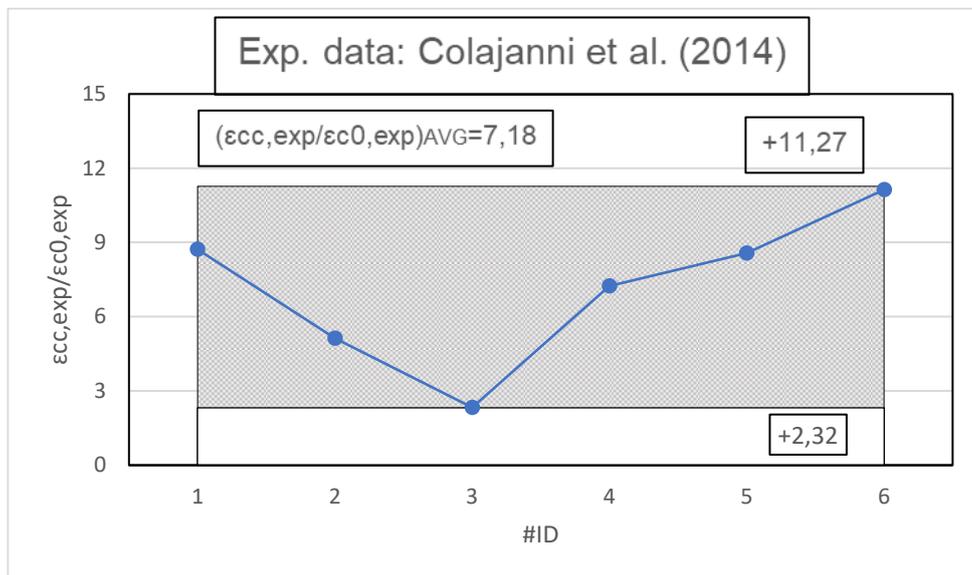


Figura 40_Valori sperimentali dell'incremento di deformazione dei provini

Analogamente è stata eseguita anche in termini deformativi. Difatti, l'articolo di *Colajanni et al. (2014)* ha permesso l'estrapolazione del grafico riportato in **Figura 40**, quale va a mostrare i diversi valori assunti dall'incremento di deformazione, nei vari provini testati, ottenuta grazie all'operazione di confinamento. Nei primi 3 provini, si registrano dei valori che tendono a diminuire fino a raggiungere il picco minimo di incremento deformativo pari al 2,32 volte. Questi valori sono conseguenza dell'applicazione di 2 strati di confinamento e spessore complessivo pari a 0,091 mm.

Successivamente, con il passaggio a 3 strati di rinforzo, si presenta una crescita fino al picco massimo pari al 11,27 volte. Il valore medio sperimentale di incremento risulta essere 7,18 volte.

3.3.c DONNINI ET AL. (2019)

Nell'articolo trattato, include ben 20 provini realizzati in calcestruzzo quali vanno a presentare un diametro pari a 140 mm ed un'altezza pari a 460 mm. Qui i provini risultano essere rinforzati tramite tre tipologie di materiale confinante differente. Per via della casistica di confinamento trattato, ci si va soffermare solo sui provini quali ottengono un rinforzo tramite l'applicazione di *FRCM* con presenza di malta *M15* o *M45*. I parametri meccanici della matrice inorganica sono stati individuati tramite provino 40 x 40 x 160 mm, dopo indurimento di 28 gg. Tali sono riportati nella tabella che segue:

Material	Compressive strenght [MPa]	Flexural strenght [MPa]	Elastic modulus [GPa]
Mortar M15	17	3,6	12,5
Mortar M45	50	6,2	34,5

Tabella 14_Parametri meccanici delle matrici inorganiche

Il *PBO* risulta essere prodotto tramite la presenza di fibre nelle due direzioni principali con spessore nominale pari a 0,046 mm nella direzione longitudinale e 0,0224 mm nella direzione trasversale (Vedi **Tabella 15**)

Material	Orientation/type	Tensile strenght [MPa]	Elastic modulus [GPa]	Ultimate strain [%]	Nominal thickness [mm]
PBO fabric	Unidirectional	264	270	2,5	0,046

Tabella 15_Parametri meccanici del PBO

Per quanto riguarda i provini in calcestruzzo considerati, tali presentano un valore sperimentale di picco della resistenza cilindrica dei provini non confinati, $f_{c0,exp}$, pari a 11,40 Mpa, valore medio di deformazione del provino non confinato, $\epsilon_{c0,exp}$, pari a 0,359% ed un valore medio di E_c , modulo elastico del calcestruzzo, che risulta essere pari a 30 GPa.

Specimen	Fmax [KN]	fc0 [MPa]	fcc [MPa]	εc0 [%]	εcc [%]	fcc /fc0	εcc/εc0
E_PBO_1	330	11,4	21,45	0,359	1,271	1,881579	3,54038997
E_PBO_2	321	11,4	20,87	0,359	1,259	1,830702	3,50696379
M15_CF_1	205	11,4	13,32	0,359	0,566	1,168421	1,57660167
M15_CF_2	215	11,4	13,98	0,359	0,55	1,226316	1,53203343
M45_PBO_1	279	11,4	18,14	0,359	1,117	1,591228	3,11142061
M45_PBO_2	265	11,4	17,27	0,359	1,062	1,514912	2,95821727
M45_CF_1	213	11,4	13,85	0,359	0,488	1,214912	1,35933148
M45_CF_2	207	11,4	13,46	0,359	0,481	1,180702	1,33983287

Tabella 16_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre un grafico dove si va ad evidenziare la variazione dell'entità incrementale della resistenza a compressione dettata dall'applicazione del rinforzo (**Figura 41**). Inoltre, è stato possibile ottenere un ulteriore grafico, che va ad indicare la variazione dell'entità della deformazione ultima dovuta all'applicazione del confinamento (**Figura 42**).

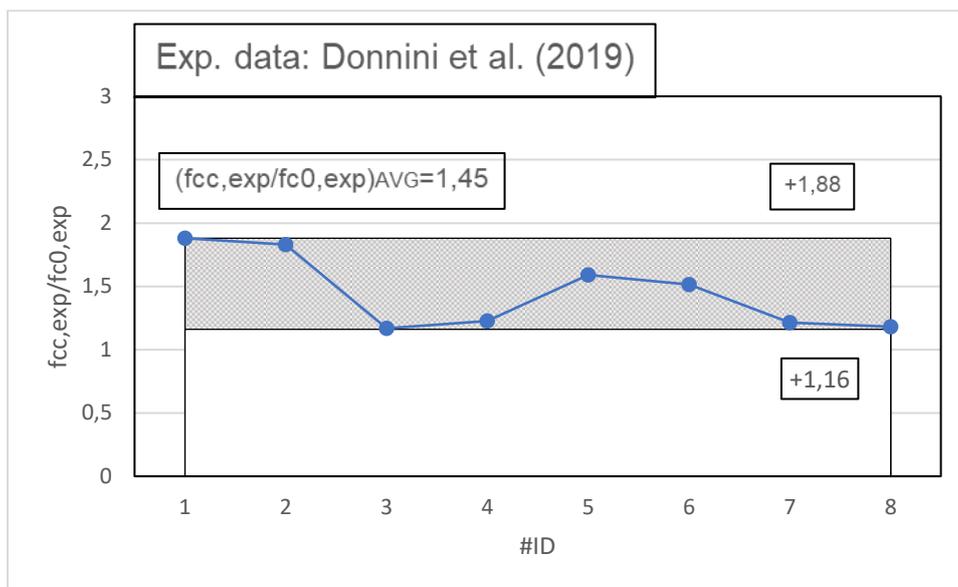


Figura 41_Valori sperimentali dell'incremento della resistenza cilindrica dei provini

Come mostra il grafico in **Figura 41**, vi sono valori incrementali che risultano essere molto differenziati tra i vari set di provini: nei primi due provini, confinati tramite applicazione di fogli di *PBO* (resistenza ultima a trazione pari a 264 MPa), si ha una crescita media pari a 1,85 volte. Di seguito, però, si verifica un abbattimento fino al valore minimo registrato per via del passaggio ad un confinamento eseguito tramite presenza della malta *M15* con fogli di carbonio dove si ha una resistenza a trazione pari a 846 MPa. Da notare, però, che ulteriore aspetto penalizzante rispetto alla prima coppia di provini testati, è la riduzione del quasi 75% del modulo elastico del calcestruzzo. Per la successiva coppia di elementi confinati, si ha una lieve crescita dettata da un confinamento eseguito tramite malta *M45* con fogli di *PBO*, quale risulta essere più performante rispetto alla combinazione successiva, ossia malta *M45*+ fibre di carbonio. Da notare, inoltre, che si registra un aumento lieve anche del modulo elastico del calcestruzzo. Infine, nella combinazione malta *M15* con fibra di carbonio, si ha una crescita media 1,20 volte. Da notare, che in tale combinazione si ha una resistenza ultima a trazione della fibra pari a 975 MPa e un modulo elastico corrispondente a 132 GPa. Il valore di picco pari al 1,88, risulta essere ottenuto tramite confinamento ottenuto con la combinazione di resina epossidica con *PBO*, mentre il valore medio risulta essere pari a 1,45 volte.

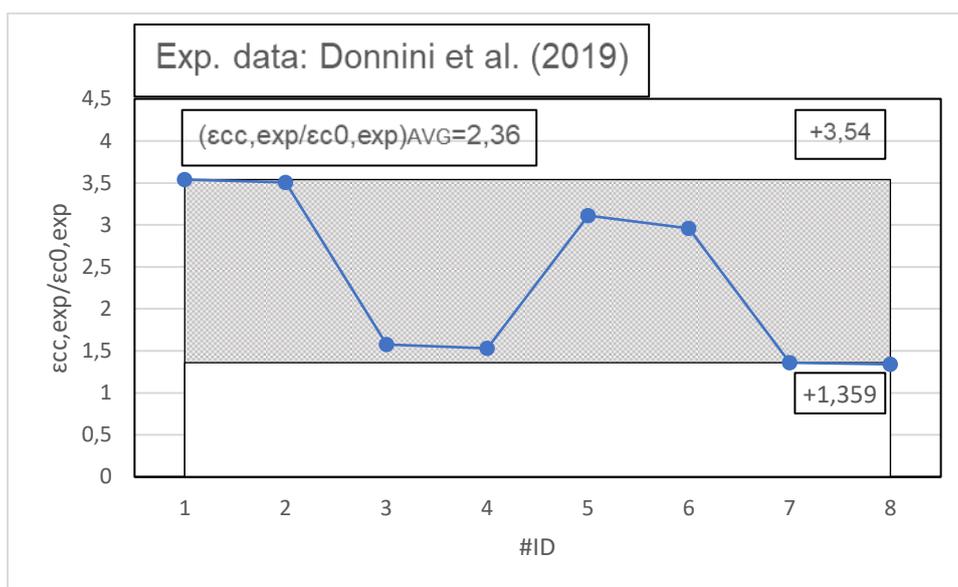


Figura 42_Valori sperimentali dell'incremento di deformazione dei provini

Il grafico in **Figura 42**, nei primi due provini, confinati tramite applicazione di fogli di *PBO*, si presentano dei valori molto simili, dove si ha un valore medio di crescita pari a 3,52 volte. Di seguito, però, si verifica un abbattimento fino al valore minimo registrato, pari a 1,55 volte, per via del passaggio a confinamento tramite presenza della malta *M15*

con fogli di carbonio quali risultano. In seguito, si ottiene una lieve crescita, dei valori di deformazione a provino confinato, dovuta al passaggio al confinamento tramite malta M45 con PBO quale risulta essere più performante rispetto alla combinazione successiva, ossia malta M45+ fibre di carbonio. In termini di valori, si registra un valore minimo pari al 1,34 volte con la combinazione malta M45 con fibra di carbonio, mentre valore di picco pari a 3,54 volte risulta essere ottenuto tramite confinamento ottenuto con la combinazione di resina epossidica con PBO. Valore medio risulta essere pari a 2,36 volte.

3.4 CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA MEDIANTE FRCM

Il seguente paragrafo, va a concentrarsi sulla metodologia di confinamento delle colonne in muratura, quale vede l'uso di FRCM. Entrando nello specifico, vengono presi in considerazione tre articoli sperimentali quali risultano essere i seguenti:

1. Cascardi, A., Micelli, F., & Aiello, MA (2018). *Colonne in muratura confinate in FRCM: indagine sperimentale sull'effetto delle proprietà della matrice inorganica. Materiali da costruzione e da costruzione*, 186, 811-825.
2. Carloni, C., Mazzotti, C., Savoia, M., & Subramaniam, K. V. (2015). *Confinement of masonry columns with PBO FRCM composites. In Key Engineering Materials (Vol. 624, pp. 644-651). Trans Tech Publications Ltd.*
3. Fossetti, M., & Minafò, G. (2017). *Comparative experimental analysis on the compressive behaviour of masonry columns strengthened by FRP, BFRCM or steel wires. Composites Part B: Engineering*, 112, 112-124.

3.4.a CASCARDI ET AL. (2018)

Nell'articolo sperimentale di Cascardi et al. (2018), sono stati presi in considerazione 15 provini cilindrici realizzati in muratura, quali presentano un diametro pari a 150 mm e un'altezza di 300 mm. Come caratteristiche meccaniche, tali presentano un valore medio di $f_{m0,exp}$, la resistenza iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 18,59 Mpa, un valore medio di $\epsilon_{m0,exp}$, deformazione iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 0,54% ed un valore medio di E_m , modulo elastico della muratura, che risulta essere pari a 18 GPa. Spostando l'attenzione sui parametri del rinforzo, l'articolo sperimentale in questione va riassumerli nella **Tabella 17** che segue:

Mortar							
M4		M4		M7		M23	
Flexural strenght	Compressive strenght						
0,83	4,15	1,46	7,26	1,46	7,26	4,61	22,93
0,01	0,49	0,22	0,39	0,22	0,39	0,26	0,63
1	12	15	12	15	12	6	6

Tabella 17_Caratteristiche meccaniche componenti del rinforzo FRCM

Invece, nella successiva **Tabella 18**, saranno a riportati i dati iniziali relativi ai diversi provini in muratura testati nell'articolo sperimentale citato. Oltre a tali vengono riportati i risultati finali, in termini di pressione di confinamento e deformazione di confinamento, dovuti all'inserimento di FRCM.

Ref.	Label	D [mm]	tf[mm]	Ef [GPa]	E0 [GPa]	tmat [mm]	fmat [MPa]	fm0 [MPa]	fmc/fm0
	A1-1	150	0,062	110	27,57	7	22,1	23,4	1,24
	A3-1	150	0,062	110	27,57	7	4,06	23,4	1,29
	A5-1	150	0,062	110	27,57	7	20,1	23,4	1,43
	A2-1	150	0,062	120	27,57	7	22,1	23,4	1,4
	A4-1	150	0,062	120	27,57	7	4,06	23,4	1,3
	A6-1	150	0,062	120	27,57	7	20,1	23,4	1,39
	A2-2	150	0,124	120	27,57	10	22,1	23,4	1,67
	A4-2	150	0,124	120	27,57	10	4,06	23,4	1,47
	A6-2	150	0,124	120	27,57	10	20,1	23,4	1,64
	B1-1	150	0,062	110	23,36	7	22,1	16,8	1,83
	B3-1	150	0,062	110	23,36	7	4,06	16,8	1,6
	B5-1	150	0,062	110	23,36	7	20,1	16,8	1,7

Tabella 18_Caratteristiche geometriche e geometriche dei provini in muratura

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre un grafico dove si va ad evidenziare la variazione del valore incrementale della resistenza a compressione una volta confinato il provino (**Figura 43**).

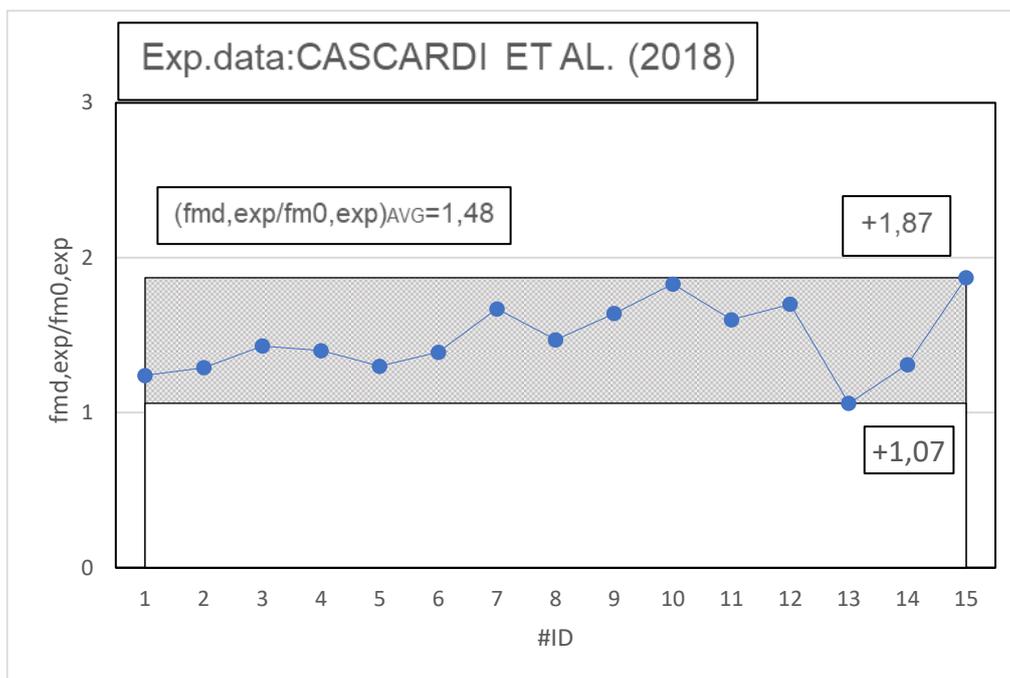


Figura 43 _Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico, si registra un incremento della resistenza cilindrica compresa tra 1,07 e 1,87 volte. Facendo riferimento alla **Tabella 18**, risulta essere chiaro che la variazione di incremento della resistenza cilindrica è in funzione dello spessore e del modulo elastico della fibra costituente il materiale di rinforzo. Difatti, nei primi 3 provini testati, si registra un valore medio di incremento pari a 1,32 volte dovuto alla presenza di un modulo elastico, E_f , pari a 110 GPa e uno spessore complessivo di confinamento pari a 0.062 mm.

Mentre, per i successivi 6 provini, si presenta un valore medio di incremento della resistenza cilindrica pari a 1,48 volte dovuta alla presenza del modulo elastico pari a 120 GPa, mentre lo spessore rimane invariato per i primi 3 provini e va a raddoppiare per gli ultimi 3. Infatti, in quest'ultimi, si registra un incremento maggiore.

Successivamente, ulteriori due elementi sono stati testati attraverso un valore di modulo elastico della fibra rinforzante pari a 110 GPa e con lo spessore di 0,062 mm, facendo in modo che si registri un incremento medio di 1,65 volte.

Infine, si è testata la risposta a compressione centrata, da parte degli ultimi tre provini, attraverso la presenza di E_f pari ad un terzo rispetto a quello presente nel blocco precedente, ma con uno spessore pari a 0,25 mm. Come conseguenza a tali parametri, si presentano un accrescimento della resistenza a compressione confinata arrivando ad un valore medio pari a 1,42 volte. Da notare, che l'ultimo provino presenta valore massimo di incremento, pari a 1,87 volte.

3.4.b CARLONI ET AL. (2015)

Nell'articolo sperimentale di *Carloni et al. (2015)*, sono stati presi in considerazione 8 provini di forma rettangolare realizzati in muratura, quali presentano delle dimensioni geometriche distinte tra loro: i primi tre risultano presentare un'area trasversale 102x100 mm, 3 elementi di dimensione 102x154 mm e, infine, gli ultimi 2 di dimensione 102x204 mm. Tutti presentano un'altezza pari a 300 mm. Come caratteristiche meccaniche, tali presentano un valore medio di $f_{m0,exp}$, resistenza iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 16,9 Mpa, un valore medio di $\epsilon_{m0,exp}$, deformazione ultima a compressione del provino non confinato, pari a 0,52% ed un valore medio di E_m , modulo elastico della muratura, che risulta essere pari a 18 GPa.

Invece, il materiale di rinforzo utilizzato presenta un valore di deformazione ultima pari a 0,5% ed un valore del modulo elastico della fibra, E_f , pari a 110 GPa. Inoltre, in tutti i provini testati, si presenta uno spessore complessivo del rinforzo che risulta essere pari a 0,092 mm.

Specimen	Cycle Ranges [KN]	Pmax [KN]	A [cm ²]	fm0 [Mpa]	fm0,avg [Mpa]	εm0
SQ-1	20-65	292,6	102	28,7	28,85422836	0,0052
SQ-2	20-90	329,85	102	32,3		0,0059
SQ-3	20-90	267,67	102	26,2		0,0047
RECT_1-1	15-110	393,79	155	25,4	21,75611814	0,0078
RECT_1-2	65-155	314,9	155	20,3		0,0056
RECT_1-3	65-155	314	155	20,3		0,0047
RECT_2-1	65-156	224,8	208	10,8	8,285367545	0,0035
RECT_2-2	20-65	122,71	208	5,9		0,0045
RECT_2-3	20-65	208,5	208	10		0,0038

Tabella 19_Caratteristiche geometriche e meccaniche dei provini in muratura

Specimen	Cycle Ranges [KN]	Pmax [KN]	A [cm ²]	fmc0 [Mpa]	fmc0,avg [Mpa]	fmc/fmc0	εmc0
SQ-C-1	20-90	364,43	101	36,1	37,25504338	1,29	0,0138
SQ-C-2	45-110	422,4	101	41,8			0,0077
SQ-C-3	45-111	349,87	101	34,6			0,0152
RECT_1 C-1	45-112	591,46	154,1	38,4	37,92886928	1,79	0,0165
RECT_1 C-2	65-135	576,16	154,1	37,4			0,0159
RECT_1 C-3	65-135	585,29	154,1	38			0,0096
RECT_2 C-1	65-135	755,71	207,1	36,5	35,2592068	3,97	0,0042
RECT_2 C-2	135-200	705,2	207,1	34,1			0,0083

Tabella 20_Risultati finali dei provini in muratura

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre un grafico dove si va ad evidenziare la variazione del rapporto sperimentale tra valore della resistenza cilindrica del provino, una volta confinato, con la resistenza cilindrica del provino stesso privo di confinamento (**Figura 44**). Inoltre, analoga analisi viene resa possibile in termini deformativi come mostrato dal grafico riportato in **Figura 45**:

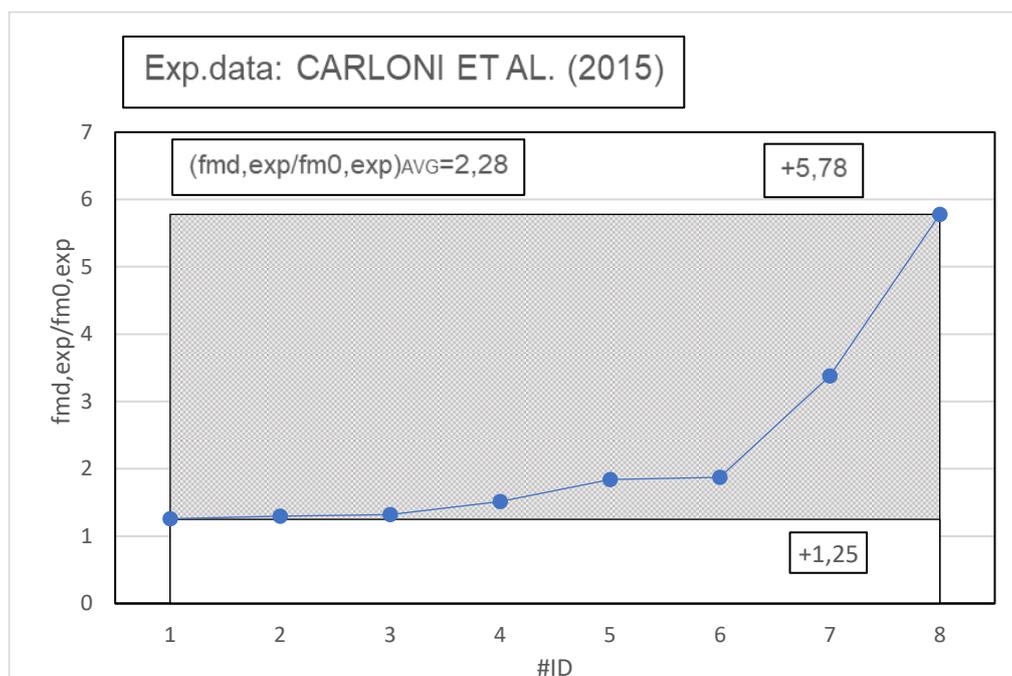


Figura 44_Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico precedente, si registra un incremento della resistenza cilindrica fino a 5,78 volte. Facendo riferimento alla **Tabella 19**, risulta essere chiaro che la variazione di incremento della resistenza cilindrica è in funzione della pressione di confinamento efficace che, a sua volta, risulta essere direttamente proporzionale alle dimensioni geometriche del provino: nei primi 3 provini di sezione 102x100 mm, si registra un valore medio di incremento pari a 1,28 volte; nei provini di sezione 102x154 mm, si registra un valore medio di incremento pari a 1,74 volte. Infine, per i provini con sezione 102x204 mm, si registra un valore medio di incremento pari a 4,57 volte. Da notare che il picco massimo raggiunto si presenta nell'ultimo provino, dove l'entità dell'incremento è pari a 5,77 volte.

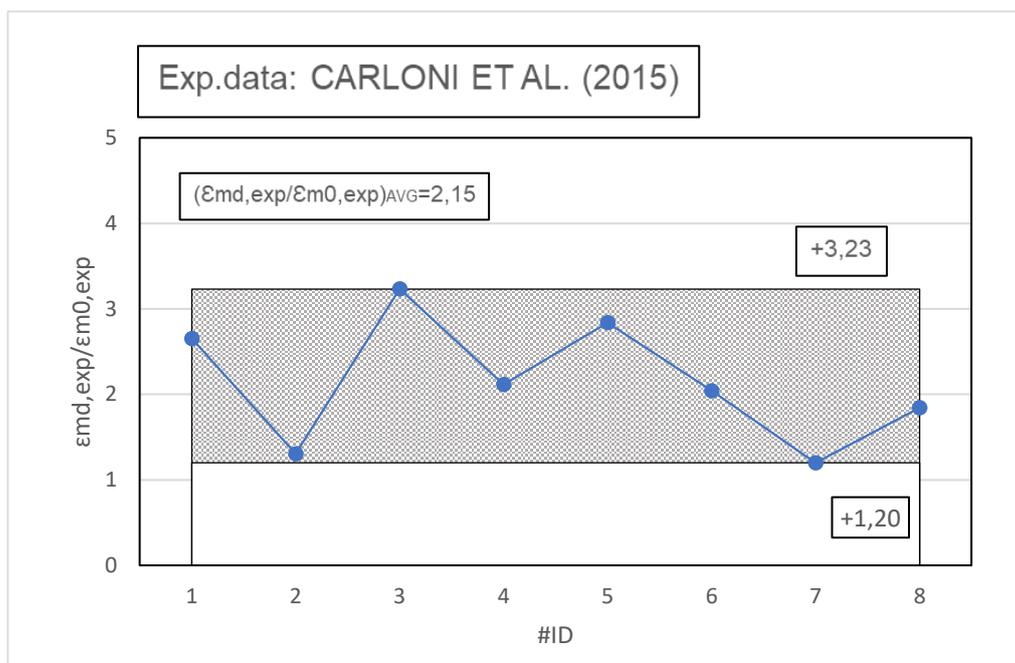


Figura 45_Valori sperimentali dell'incremento di deformazione a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico precedente, si registra un incremento della deformazione fino a 3,23 volte.

Facendo riferimento alla **Tabella 19**, risulta essere chiaro che la variazione di incremento della deformazione è in funzione della pressione di confinamento efficace che, a sua volta, risulta essere direttamente proporzionale alle dimensioni geometriche del provino. Difatti, nei primi 3 provini di sezione 102x100 mm, si registra un valore medio di incremento pari a 2,15 volte; nei provini di sezione 102x154 mm, si registra un valore medio di incremento pari a 2,42 volte. Infine, per i provini con sezione 102x204 mm, si registra un valore medio di incremento pari a 1,72 volte. Quindi, all'aumentare della sezione trasversale del provino, l'incremento della deformazione del provino tende a ridursi.

3.4.c FOSSETTI ET AL. (2016)

Nell'articolo sperimentale di *Fossetti et al. (2016)*, sono stati presi in considerazione 8 provini in muratura di forma quadrata e di dimensioni 230 x 230 mm e altezza pari a 960 mm. Come caratteristiche meccaniche, tali presentano un valore medio di $f_{m0,exp}$, resistenza iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 6,92 Mpa, un valore medio di $\epsilon_{m0,exp}$, deformazione iniziale a compressione del provino non confinato, pari a 1,23% ed un valore medio di E_m , modulo elastico della muratura, che risulta essere pari a 18 GPa.

Per quanto riguarda la questione relativa al rinforzo, invece, sono stati utilizzati quattro possibili combinazioni: malta M1+ matrice in fibre di balsato, malta M1+fibre in acciaio, malta M3+ matrice in fibre di balsato, malta M3+fibre in acciaio. La malta M1, presenta una resistenza a trazione pari a 0,44 Mpa, mentre per la malta M3 risulta essere pari a 3,13 Mpa.

Specimen	Mortar	Reinforcement	Normalized Maximum stress	Normalized Ultimate stress	Normalized Axial strain at Maximum stress	Normalized Ultimate axial strain	Normalized Absorbed Energy
M1_BF-1	M1	Basalt fiber mesh	1,81	1,72	1,58	1,6	2,8
M1_BF-2	M1	Basalt fiber mesh	1,67	1,66	1,4	1,47	2,52
M1-SW-1	M1	steel wires	1,3	1,3	2,48	2,37	3,9
M1-SW-2	M1	steel wires	1,35	1,32	2,41	2,7	4,33
M3-BF-1	M3	Basalt fiber mesh	1,19	1,19	1,05	1,03	1,39
M3-BF-2	M3	Basalt fiber mesh	1,09	1,09	1,25	1,26	1,5
M3-SW-1	M3	steel wires	1,02	1,03	1,3	1,32	1,57
M3-SW-2	M3	steel wires	1,33	1,32	1,61	1,63	2,3

Tabella 21_Caratteristiche geometriche e meccaniche dei provini in muratura

Grazie ai parametri e ai dati a disposizione, è stato possibile riuscire ad estrarre un grafico dove si va ad evidenziare la variazione del rapporto sperimentale tra valore della resistenza cilindrica del provino, una volta confinato, con la resistenza cilindrica del provino stesso privo di confinamento (**Figura 46**). Inoltre, analoga analisi viene resa possibile in termini deformativi come mostrato dal grafico riportato in **Figura 47**:

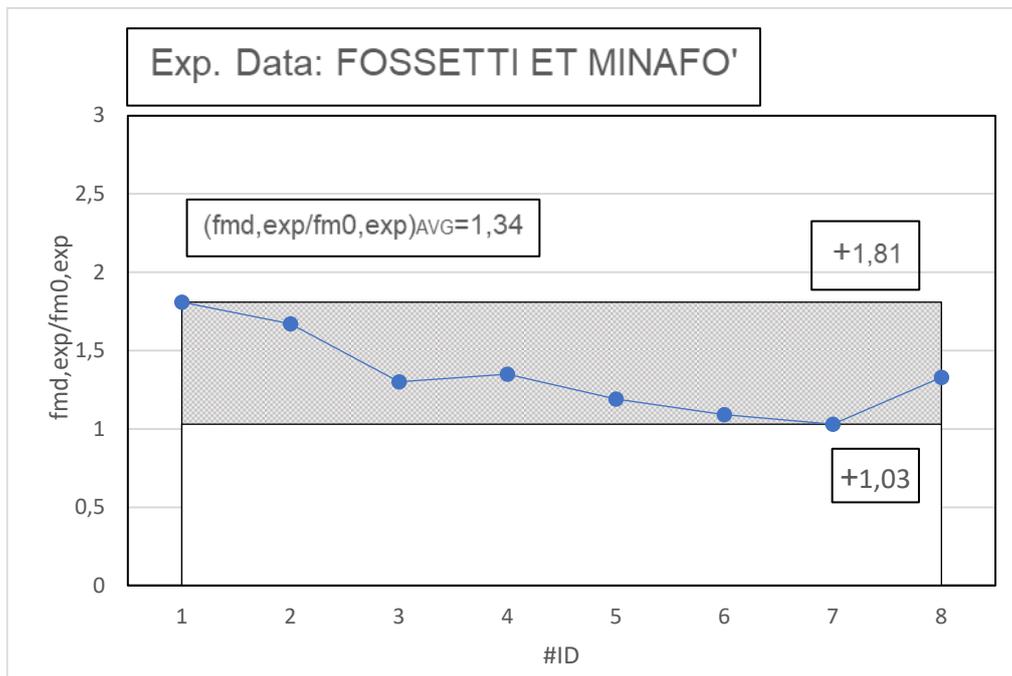


Figura 46_Valori sperimentali dell'incremento della resistenza a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico precedente, si registra un incremento della resistenza cilindrica compreso tra 1,03 e 1,81 volte. Facendo riferimento alla **Tabella 21**, risulta essere chiaro che la variazione di incremento della resistenza cilindrica è in funzione della tipologia di rinforzo utilizzata. Difatti, nei primi 2 provini dove il rinforzo è costituito da malta M1+fibre di carbonio, si registra un valore medio di incremento pari a 1,74 volte; nei 2 provini dove il rinforzo è costituito da malta M1+fibre in acciaio, si registra un valore medio di incremento pari a 1,32 volte; nei primi 2 provini dove il rinforzo è costituito da malta M3+fibre di carbonio, si registra un valore medio di incremento pari a 1,14 volte; nei 2 provini dove il rinforzo è costituito da malta M3+fibre in acciaio, si registra un valore medio di incremento pari a 1,18 volte. Va sottolineato che tale test, è stato eseguito lasciando invariati valori del modulo elastico della fibra, E_f , pari a 89 GPa e spessore complessivo della fibra pari a 0,045 mm.

Quindi a parità di dimensioni geometriche e spessore della fibra, il rinforzo, costituito da malta M1 e da fibre di carbonio, comporta un maggiore incremento in termini di resistenza cilindrica.

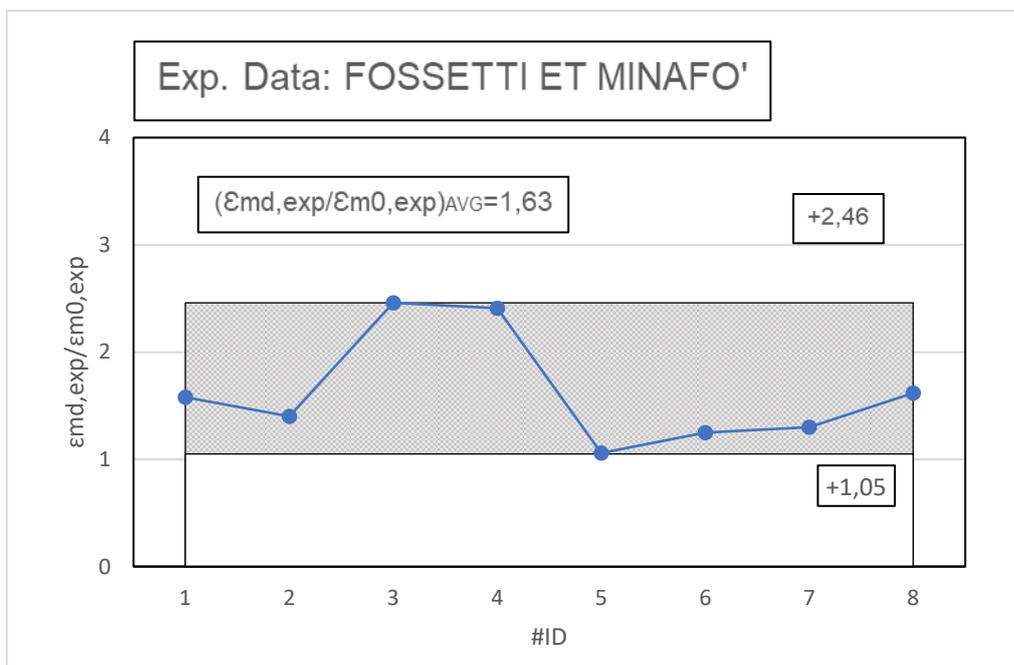


Figura 47_Valori sperimentali dell'incremento di deformazione a compressione dei provini

Come è possibile notare dal grafico precedente, si registra un incremento della deformazione compreso tra 1,05 e 2,46 volte. Facendo riferimento alla **Tabella 21**, risulta essere chiaro che la variazione di incremento della resistenza cilindrica è in funzione della tipologia di rinforzo utilizzata. Difatti, nei primi 2 provini dove il rinforzo è costituito da malta *M1*+fibre di carbonio, si registra un valore medio di incremento pari a 1,49 volte; nei 2 provini dove il rinforzo è costituito da malta *M1*+fibre in acciaio, si registra un valore medio di incremento pari a 2,425 volte; nei primi 2 provini dove il rinforzo è costituito da malta *M3*+fibre di carbonio, si registra un valore medio di incremento pari a 1,15 volte; nei 2 provini dove il rinforzo è costituito da malta *M3*+fibre in acciaio, si registra un valore medio di incremento pari a 1,45 volte. Va sottolineato che tale test, è stato eseguito lasciando invariati valori del modulo elastico della fibra, E_f , pari a 89 *GPa* e spessore complessivo della fibra pari a 0,045 mm. Quindi, a parità di dimensioni geometriche e spessore della fibra, il rinforzo, costituito da malta *M1* e da fibre di acciaio, comporta un maggiore incremento in termini di resistenza cilindrica.

4. VALIDAZIONE DEI MODELLI ANALITICI

In questo capitolo, si procede alla determinazione e valutazione del livello di attendibilità dei diversi modelli analitici scelti per la previsione della resistenza a compressione e della deformazione ultima di colonne in calcestruzzo e in muratura confinate e caricate assialmente.

Nella praticità, tale fase prevede l'inserimento dei parametri geometrici e meccanici, derivanti dagli articoli sperimentali di riferimento, all'interno di ciascun modello. Questo porterà alla determinazione di nuovi valori relativi alla resistenza a compressione e della deformazione ultima ottenuti con l'introduzione del rinforzo sul provino esaminato.

Al fine di valutare il modello che va a fornire risultati con il minimo scarto dai valori reali, viene eseguita una comparazione tra gli strumenti analitici quali hanno visto l'inserimento dei dati relativi ai medesimi articoli sperimentali.

Di seguito, verranno trattati le casistiche di confinamento delle colonne in calcestruzzo e in muratura, mediante uso di *FRP*.

4.1 CONFRONTO TEORICO-SPERIMENTALE PER CAMPIONI CONFINATI CON FRP

4.1.a VALIDAZIONE SU COLONNE IN CALCESTRUZZO

Il seguente paragrafo, va a concentrarsi sulla metodologia di confinamento delle colonne in calcestruzzo, quale vede l'uso di *FRP*. Entrando nello specifico, vengono considerati diversi modelli analitici che vanno a trattare il confinamento delle colonne in calcestruzzo mediante *FRP*:

- *Articolo sperimentale di SPOELSTRA AND MONTI (1999);*
- *Articolo sperimentale di CAMPIONE ET AL. (2003);*
- *CIRCOLARE CNR DT 200 R1-2013;*

Una volta estratti i valori teorici dei parametri meccanici di nostro interesse, si procederà alla comparazione dei tre modelli indicati con lo scopo di determinare lo strumento analitico più consono alla previsione della resistenza a compressione e della deformazione ultima di una colonna in calcestruzzo mediante uso di un sistema *FRP*.

SPOELSTRA ET AL. (1999)

In tale paragrafo, si va a trattare il modello relativo all'articolo sperimentale di *Spoelstra and Monti (1999)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in calcestruzzo mediante *FRP*, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

	CARATTERISTICHE PROVINI IN CLS											CARATTERISTICHE DEL RINFORZO-I		
	#ID	Base [mm]	Altezza [mm]	Diametro [mm]	fc0,exp [Mpa]	εc0,exp	Ec0 [Mpa]	fcc,exp	ecc,exp	fcc,exp/fc0,exp	ecc,exp/εc0,exp	tf [mm]	pf	Ef [Mpa]
SILVA AND RODRIGUES (2006)	1	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	89,4	0,0272	3,262773723	13,6	0,12	0,0016	240000
	2	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	87,5	0,0228	3,193430657	11,4	0,35	0,004667	240000
	3	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	91,9	0,0234	3,354014599	11,7	0,7	0,009333	240000
	4	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	89,8	0,0232	3,277372263	11,6	0,17	0,002267	235000
	5	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	91,9	0,0231	3,354014599	11,55	0,5	0,006667	235000
	6	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	81,2	0,0205	2,96350365	10,25	0,34	0,004533	230000
	7	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	88,7	0,0255	3,237226277	12,75	0,34	0,004533	230000
	8	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	87,5	0,0221	3,193430657	11,05	0,85	0,011333	230000
	9	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	89,1	0,0243	3,251824818	12,15	0,85	0,011333	230000
	10	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	86	0,0265	3,138686131	13,25	0,34	0,004533	230000
	11	176,7766953	176,7766953	250	27,4	0,002	32145,76	55,8	0,0109	2,03649635	5,45	1,02	0,00816	230000
	12	106,0660172	106,0660172	150	27,4	0,002	32145,76	128,1	0,0244	4,675182482	12,2	0,17	0,002267	230000
CAMPIONE ET AL. (2015)	13	106,0660172	106,0660172	150	43,75	0,002	27120	40,6	0,0019	0,928	0,95	0,159	0,00212	230000
	14	106,0660172	106,0660172	150	43,75	0,002	32000	44	0,0022	1,005714286	1,1	0,159	0,00212	230000
	15	106,0660172	106,0660172	150	43,75	0,002	29900	40,7	0,002	0,930285714	1	0,159	0,00212	230000
	16	106,0660172	106,0660172	150	43,75	0,002	31600	44,2	0,002	1,010285714	1	0,159	0,00212	230000
	17	106,0660172	106,0660172	150	43,75	0,002	33700	85 /		1,942857143 /		0,159	0,00212	230000
	18	106,0660172	106,0660172	150	43,75	0,002	33740	86 /		1,965714286 /		0,159	0,00212	230000
	19	106,0660172	106,0660172	150	43,75	0,002	36070	87 /		1,988571429 /		0,159	0,00212	230000
	20	106,0660172	106,0660172	150	43,75	0,002	34060	85 /		1,942857143 /		0,159	0,00212	230000
DONNINI ET AL. (2015)	21	98,99494937	98,99494937	140	11,4	0,00359	30279,04	32,31	0,01778	2,834210526	4,95264624	0,164	0,002343	240000
	22	98,99494937	98,99494937	140	11,4	0,00359	30588,56	31,01	0,01742	2,720175439	4,852367688	0,164	0,002343	240000
	23	98,99494937	98,99494937	140	11,4	0,00359	30890,94	21,45	0,01271	1,881578947	3,540389972	0,046	0,000657	270000
	24	98,99494937	98,99494937	140	11,4	0,00359	31186,57	20,87	0,01259	1,830701754	3,506963788	0,046	0,000657	270000
	25	98,99494937	98,99494937	140	11,4	0,00359	31475,81	19,83	0,01297	1,739473684	3,61281337	0,048	0,000686	235000
	26	98,99494937	98,99494937	140	11,4	0,00359	31758,97	19,31	0,01107	1,693859649	3,08356546	0,048	0,000686	235000

FRP e RESISTENZA DEL PROVINO CONFINATO													
flu [Mpa]	fju [Mpa]	ε _{fu}	fcc,theo[Mpa]	ecc,theo	Esec,u [M]	β	Esec,0		v	α	elim	fcc,theo/fcc,exp	ecc,theo/ecc,exp
6,2592	3912	0,0163	56,71988386	0,012701	238714,4	1,346406	13700		0,5	1	0,001	0,634450602	0,466937042
18,256	3912	0,0163	84,02367255	0,022666	238714,4	1,346406	13700		0,5	1	0,001	0,960270543	0,994104119
36,512	3912	0,0163	102,7850055	0,029513	238714,4	1,346406	13700		0,5	1	0,001	1,11844402	1,261229731
7,936733333	3501,5	0,0149	61,95736814	0,014612	233741,2	1,346406	13700		0,5	1	0,001	0,68994842	0,629835265
23,34333333	3501,5	0,0149	91,04544842	0,025228	233741,2	1,346406	13700		0,5	1	0,001	0,990701289	1,092132721
14,59733333	3220	0,014	77,68536347	0,020352	228767,9	1,346406	13700		0,5	1	0,001	0,956716299	0,992796216
14,59733333	3220	0,014	77,68536347	0,020352	228767,9	1,346406	13700		0,5	1	0,001	0,87582146	0,798130292
36,49333333	3220	0,014	102,7732482	0,029508	228767,9	1,346406	13700		0,5	1	0,001	1,174551408	1,335225554
36,49333333	3220	0,014	102,7732482	0,029508	228767,9	1,346406	13700		0,5	1	0,001	1,153459575	1,214340936
14,59733333	3220	0,014	77,68536347	0,020352	228767,9	1,346406	13700		0,5	1	0,001	0,90331818	0,768012167
26,2752	3220	0,014	94,35263009	0,026435	228767,9	1,346406	13700		0,5	1	0,001	1,690907349	2,425253803
7,298666667	3220	0,014	60,04508801	0,013914	228767,9	1,346406	13700		0,5	1	0,001	0,46873605	0,570256791
8,7768	4140	0,018	86,37341518	0,011742	229779,6	0,239771	21875		0,5	1	0,001	2,127424019	6,180260472
8,7768	4140	0,018	86,37341518	0,011742	229575	0,462857	21875		0,5	1	0,001	1,963032163	5,337497681
8,7768	4140	0,018	86,37341518	0,011742	229663	0,366857	21875		0,5	1	0,001	2,122196933	5,871247449
8,7768	4140	0,018	86,37341518	0,011742	229591,7	0,444571	21875		0,5	1	0,001	1,954149665	5,871247449
8,7768	4140	0,018	86,37341518	0,011742	229503,7	0,540571	21875		0,5	1	0,001	1,016157826	/
8,7768	4140	0,018	86,37341518	0,011742	229502,1	0,5424	21875		0,5	1	0,001	1,004342037	/
8,7768	4140	0,018	86,37341518	0,011742	229404,5	0,648914	21875		0,5	1	0,001	0,992797876	/
8,7768	4140	0,018	86,37341518	0,011742	229488,7	0,557029	21875		0,5	1	0,001	1,016157826	/
10,12114286	4320	0,018	38,36378398	0,046046	226141,4	8,535241	3175,487		0,5	1	0,001	1,187365645	2,58977129
10,12114286	4320	0,018	38,36378398	0,046046	225992,3	8,632714	3175,487		0,5	1	0,001	1,23714234	2,643291248
4,435714286	6750	0,025	28,79552386	0,03098	254077,8	8,727938	3175,487		0,5	1	0,001	1,342448665	2,43747604
4,435714286	6750	0,025	28,79552386	0,03098	253918,1	8,821035	3175,487		0,5	1	0,001	1,379756774	2,460708536
2,417142857	3525	0,015	22,96323103	0,021797	220866,9	8,912118	3175,487		0,5	1	0,001	1,158004591	1,68057188
2,417142857	3525	0,015	22,96323103	0,021797	220734,1	9,001288	3175,487		0,5	1	0,001	1,189188557	1,969016918

Tabella22_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante articolo di Spoelstra and Monti. (1999)

Come ben visibile in **Tabella 22**, sono stati riportati anche i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione ultima a provino già confinato. Questo aspetto risulta essere favorevole nei confronti di un'immediata comparazione tra i valori effettivi e teorici. Infatti, grazie ai dati a disposizione, si va ad estrarre un primo grafico dove si va ad evidenziare la relazione tra la resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

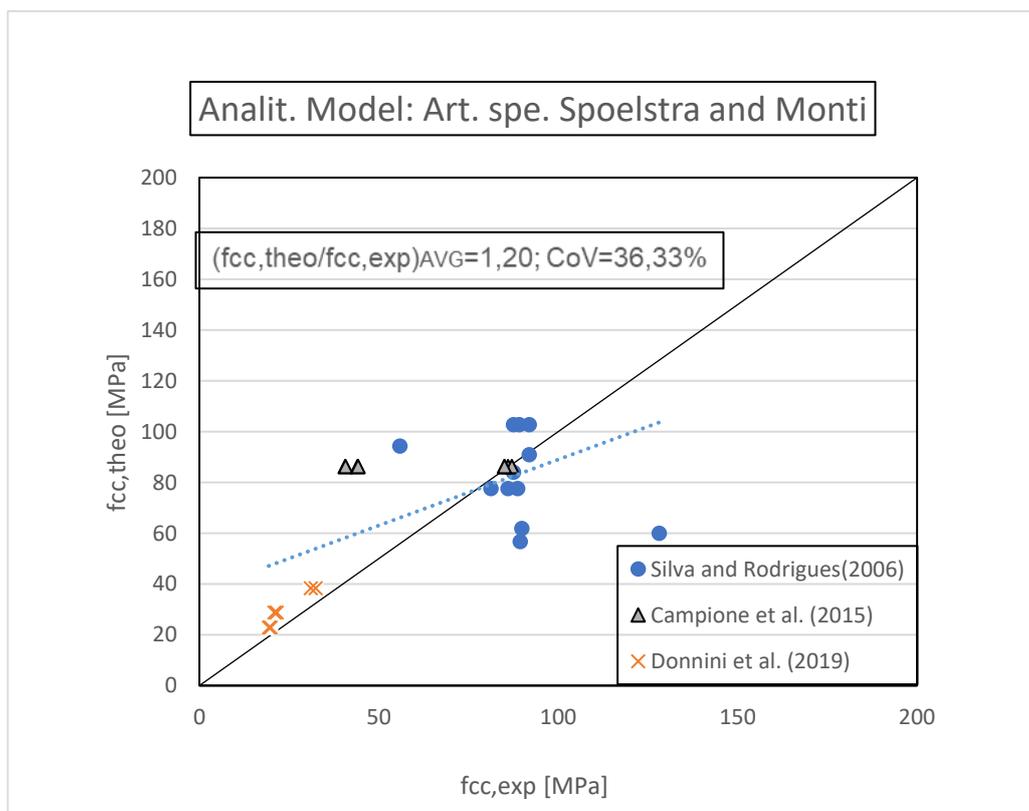


Figura 48 _Relazione resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Il grafico riportato in **Figura 48**, presenta una retta di equazione $y=x$, che sancisce rapporto unitario tra valore teorico e sperimentale della resistenza cilindrica, e da tale evidenza il comportamento del modello trattato: i punti relativi a *Silva et al. (2006)*, risultano presentare una distribuzione prevalente al di sotto della retta di riferimento, rendendolo più conservativo rispetto all'articolo sperimentale. Il modello tende a fornire dei valori di resistenza a compressione confinata che sono direttamente proporzionali allo spessore del rinforzo fibroso: difatti, si nota che fino per valori prossimi ai 30 mm, questo va a sottostimare la resistenza, mentre esegue una sovrastima per spessori di entità maggiore, come si attesta nei provini confinati con fibre con spessore di 0,85 mm e 1,02 mm.

Per l'articolo di *Donnini et al. (2019)*, il modello tende a restituire una sovrastima. Questo aspetto, risulta essere dettato dal valore elevato della resistenza a trazione della fibra e dal suo spessore. Infatti, l'incremento minimo registrato, si presenta in corrispondenza dei valori minimi di spessore e di resistenza a trazione della fibra, quali sono rispettivamente 0,0046 m e 3525 MPa.

Infine, per quanto riguarda l'articolo di *Campione et al. (2015)*, il modello tende a presentare valori del rapporto incrementale che sono posizionati in corrispondenza della retta, per una resistenza vicina a 85 Mpa, mentre i restanti tendono ad essere sovrastimati.

La distribuzione dei dati risulta essere lineare. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range ristretto tra 0,46 e 2,12. Il valore medio risulta essere pari a 1,20 mentre il valore CoV pari a 36,33%. In termini matematici, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che i valori dei vari rapporti tra le due resistenze risultano essere molto variabili rispetto al valore medio.

Analoga analisi, tende ad essere eseguita in termini deformativi come mostrato nel grafico a dispersione riportato nella **Figura 49**:

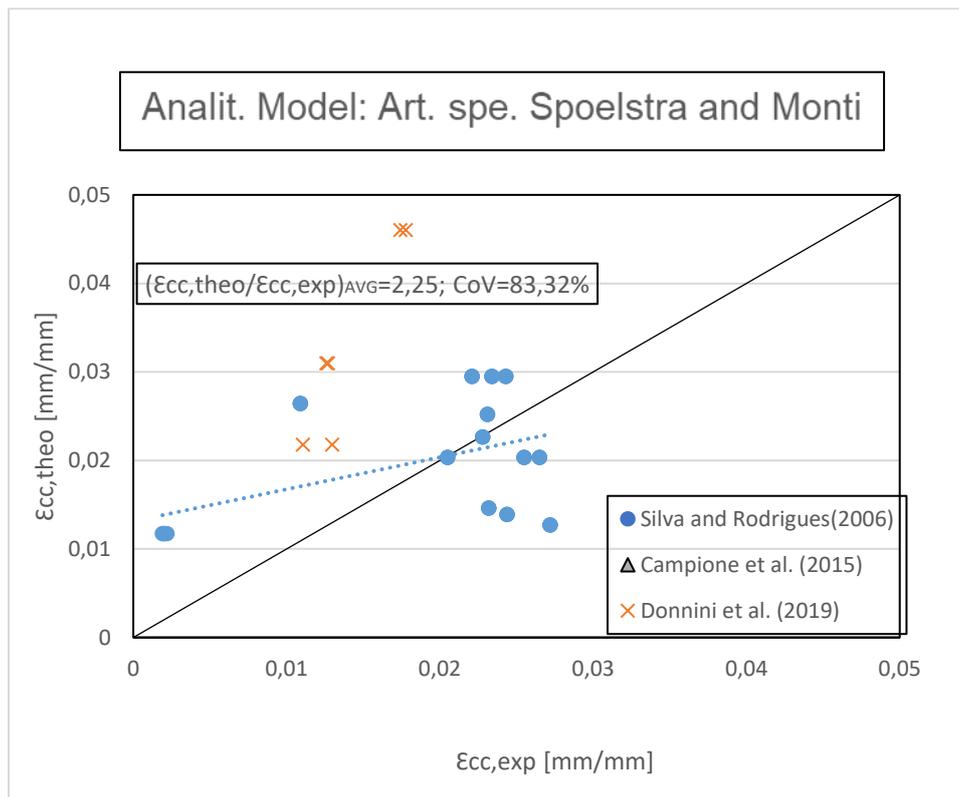


Figura 49 Relazione Deformazione confinata teorica- Deformazione confinata sperimentale

Il grafico riportato in **Figura 49**, vede la retta di equazione $y=x$, che indica la condizione di coincidenza del valore sperimentale e quello teorico, e che va ad agevolare il commento della risposta del modello nei confronti dei termini deformativi: il modello tende a far registrare una sovrastima dei valori deformativi per gli articoli di *Campione et al. (2015)* e *Donnini et al. (2019)*. Invece, per i punti ottenuti dall' articolo di *Silva et al. (2006)*, le deformazioni restituite risultano essere distribuiti su ambo i lati della retta. Ciò, risulta essere spiegato dal fatto che vi sussiste una relazione direttamente proporzionale tra la deformazione ultima confinata e la resistenza a trazione della fibra: difatti, nell'articolo di *Silva et al. (2005)*, si vanno a presentare valori minimi di tale parametro, andando a scaturire una sottostima della deformazione ultima.

Come risulta essere ben visibile dalla linea di tendenza in **Figura 49**, la distribuzione dei dati risulta essere lineare. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range molto ampio, ossia tra 0,46 e 6,18. Per quanto riguarda il valore medio, si può asserire che tale risulta essere pari a 2,25 e un valore CoV pari a 83,32%. Nonostante il valore sia aumentato rispetto al CoV relativo alle resistenze cilindriche, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che la variabilità dei valori dei rapporti tra le due deformazioni, risulta essere molto contenuta rispetto al valore medio.

Infine, come fase ultima dello studio della risposta da parte del modello di *Spoelstra and Monti (1999)*, andiamo a stilare degli istogrammi dove si evidenzia la variazione dello scarto tra i parametri teorici e sperimentali in funzione del singolo provino esaminato.

Questo step, viene eseguito in modo singolo per ognuno dei tre articoli.

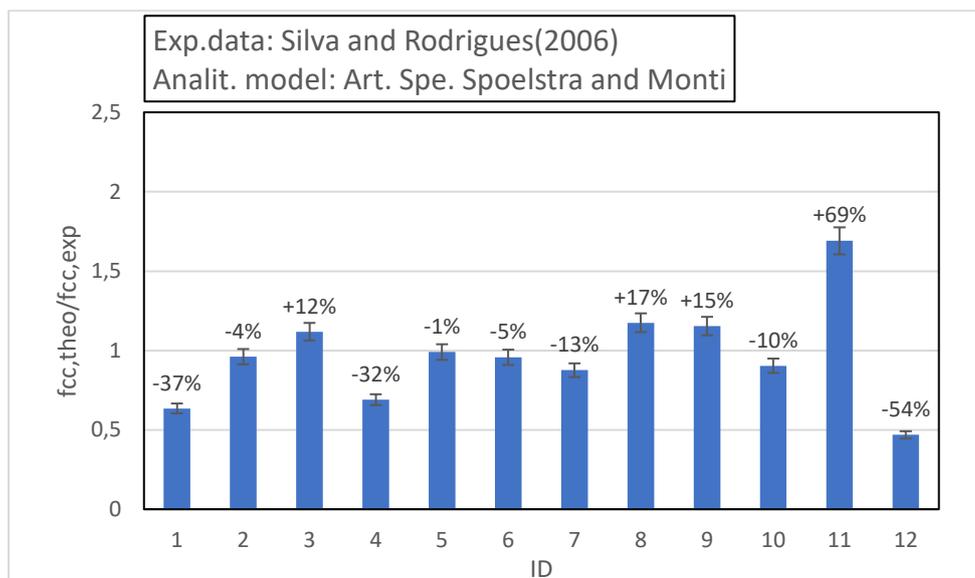


Figura 50_Articolo sperimentale di *Silva et al. (2006)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

La **Figura 50** riporta lo sviluppo del discostamento tra valori teorici e sperimentali, relativi i valori della resistenza a compressione del provino confinato, riguardanti l'articolo di *Silva et al. (2006)*.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -54% e +69%. La variabilità dei valori è in funzione del modulo elastico della fibra e del suo spessore.

Difatti, si registra una diminuzione dello scarto dei risultati per provini con un rinforzo a piccolo spessore. Il valore massimo di scarto, ossia +69%, si registra in corrispondenza di 1,02 mm che risulta essere il valore massimo tra gli spessori utilizzati. Invece, il valore minimo discostamento, che va anche a coincidere con il provino n.5, dove lo spessore del rinforzo risulta essere pari a 0,5 mm. Come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 50**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 48** nel quale i punti individuati, per l'articolo citato sono distribuiti in ambo i lati rispetto la retta di riferimento.

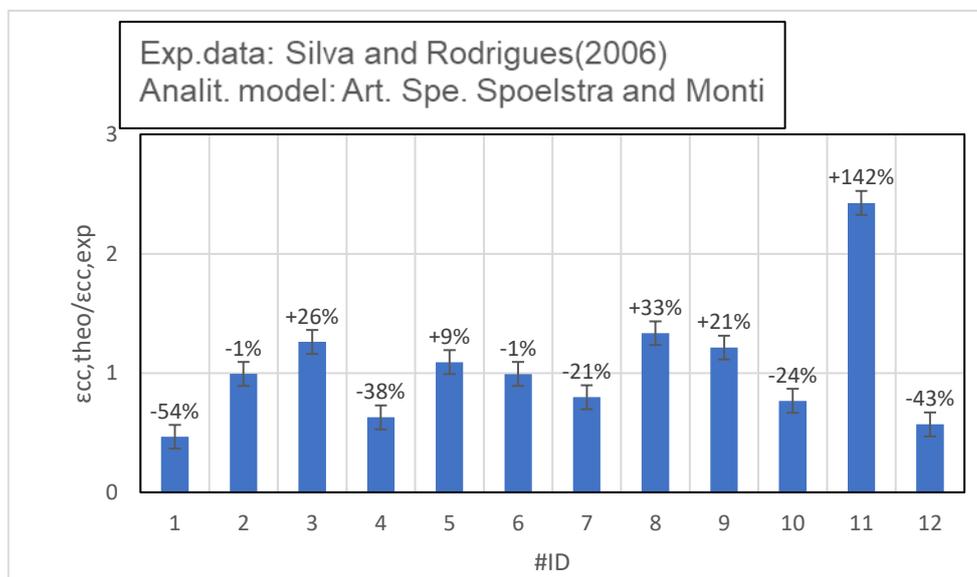


Figura 51_Articolo sperimentale di *Silva et al. (2006)*: *Rapporto deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale*

Continuando la trattazione del medesimo articolo, la **Figura 51** mostra la variazione dello scarto tra il valore analitico e quello sperimentale relativo alla deformazione ultima a provino confinato.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -54% e +142%. Il discostamento della risposta da parte del modello, risulta essere legata al modulo elastico e allo spessore del rinforzo.

Difatti, man mano che lo spessore aumenta, vengono restituiti dei valori deformativi in aumento e comportando delle sovrastime di tali. Il valore massimo di scarto registrato, ossia +142%, si registra in corrispondenza dei provini che presentano uno spessore di rinforzo pari a 1,02 mm. Per quanto riguarda il valore di scarto minimo, invece, bisogna andare a cercarlo nel provino quale tende a presentare uno spessore di rinforzo pari a 0,17 mm, uno tra i valori minimi presenti di spessore. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 51**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 49** nel quale i punti individuati, dell'articolo in questione, sono distribuiti in modo equo in ambo i lati della retta di riferimento.

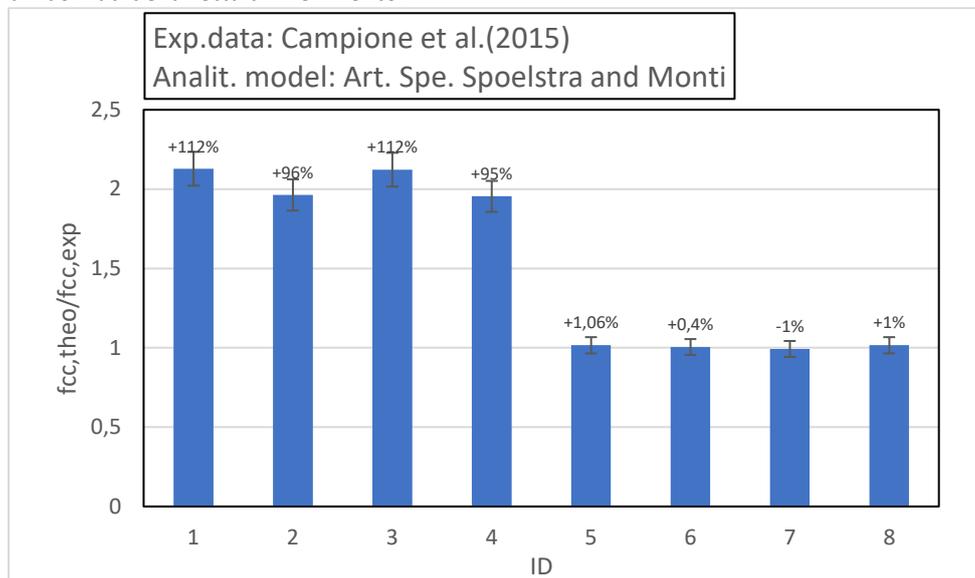


Figura 52_Articolo sperimentale di *Campione et al. (2015)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Trattando i risultati restituiti dal modello per quanto riguarda l'articolo di *Campione et al. (2015)*, la **Figura 52** va ad esporre un istogramma che tratta lo sviluppo dello scarto tra valore teorico e sperimentale della deformazione ultima per ognuno dei provini testati.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -1% e +112%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione del modulo elastico della fibra e del suo spessore, oltre che dai valori sperimentali della resistenza: nei primi quattro provini, si registra una sovrastima della resistenza da parte del modello e questo è dovuto anche a piccoli valori sperimentali ottenuti; nel secondo set, invece, i valori teorici sono rimasti costanti mentre il valore sperimentale è raddoppiato, comportando un abbattimento dell'incremento, fino a portarlo ad ottenere una minima sottostima.

Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 52**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 48** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Campione et al. (2015)*, sono al di sopra rispetto alla retta di riferimento di equazione $y=x$.

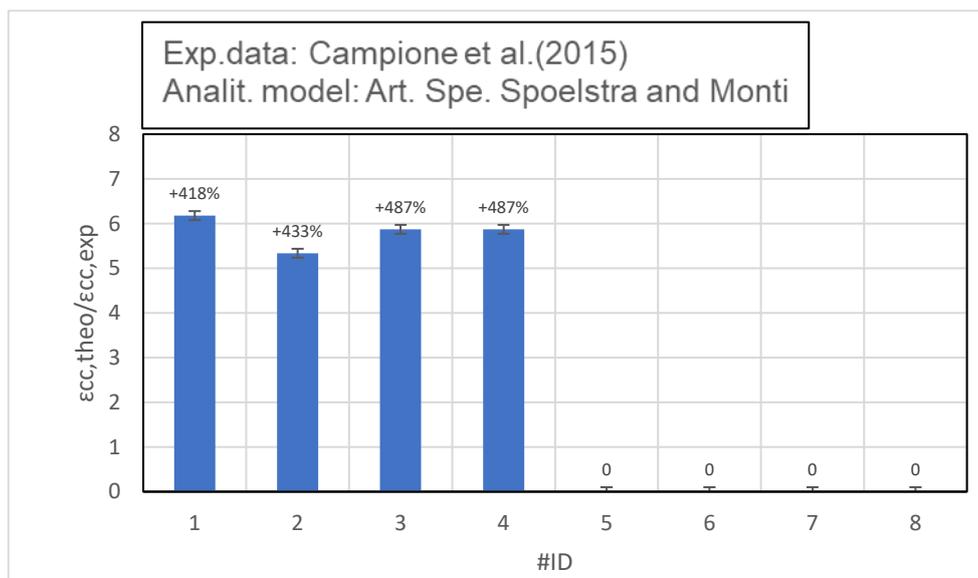


Figura 53_ Articolo sperimentale di *Campione et al. (2015)*: Rapporto deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale

Analoga analisi, ma in termini di discostamento deformativo, viene eseguita nella **Figura 53**. L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso +433% e +518%. Va precisato, che i valori sperimentali di deformazione degli ultimi quattro provini non era disponibili, e quindi il rapporto incrementale non poteva essere calcolato. La variabilità dei valori risulta essere in funzione del modulo elastico della fibra, dello spessore complessivo del materiale di rinforzo e del valore sperimentale di deformazione

Difatti, i valori sperimentali e teorici di deformazione risultano essere pressochè simili, comportando degli incrementi molto simili. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 53**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 49** nel quale i punti individuati, dell'articolo in questione, sono tutti al di sopra della retta di riferimento.

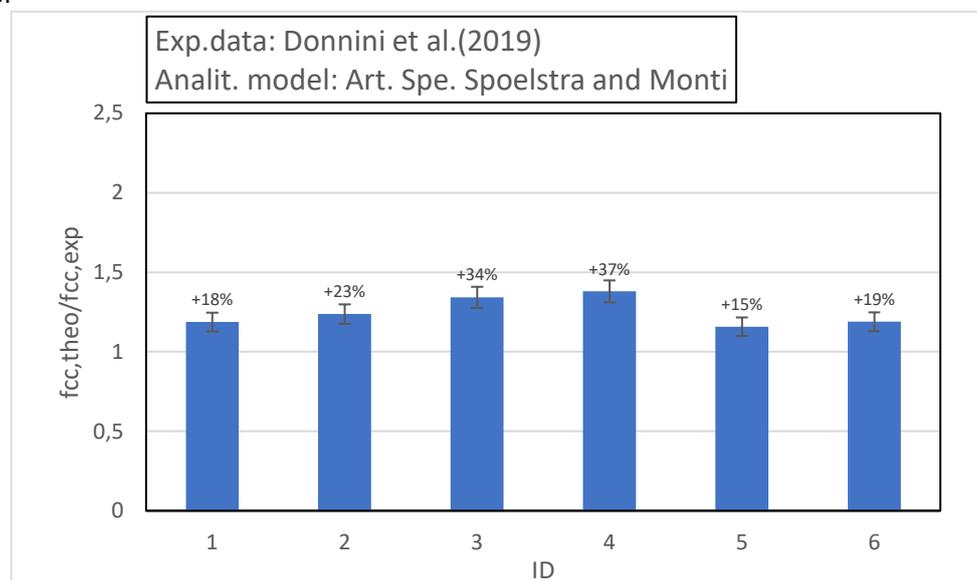


Figura 54_ Articolo sperimentale di *Donnini et al. (2019)*: Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

La **Figura 54**, invece, va ad indicare la variazione del rapporto tra la resistenza a compressione analitica e quella sperimentale, relative all'articolo di *Donnini et al. (2019)*.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso +15% e +30%. Le resistenze teoriche restituite, sono legate al modulo elastico e allo spessore della fibra: nei primi 2 provini con E_f pari a 240 GPa

e spessore pari a 0,164 mm, si registra una sovrastima con valore medio pari al 20,5%; per i successivi due provini, con E_f pari a 270 GPa e spessore pari a 0,046 mm, si registra una sovrastima con valore medio pari al 35,5%; infine, negli ultimi due provini, con E_f pari a 235 GPa e spessore pari a 0,048 mm, si registra una sovrastima con valore medio pari al 17%.

Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 54**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 48** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Donnini et al. (2019)*, sono posizionati al di sopra della retta di riferimento di equazione $y=x$.

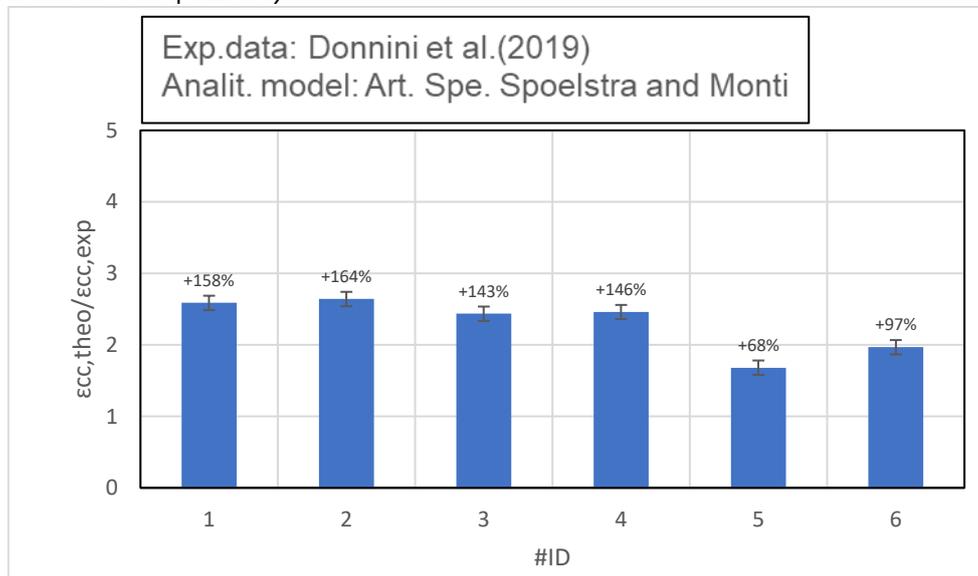


Figura 55_Articolo sperimentale di *Donnini et al. (2019)*: *Rapporto deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 55**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due deformazioni confinate (sperimentale e teorica) e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -20% e +2%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione del modulo elastico della fibra, del suo spessore e del valore sperimentale di deformazione.

La variabilità dei valori risulta essere in funzione del modulo elastico della fibra e dello spessore complessivo del materiale di rinforzo: nei primi 2 provini con E_f pari a 240 GPa e spessore pari a 0,164 mm, si registra una stima con valore medio pari al 161%; per i successivi due provini, con E_f pari a 270 GPa e spessore pari a 0,046 mm, si registra una sovrastima con valore medio pari al 144,5%; infine, negli ultimi due provini, con E_f pari a 235 GPa e spessore pari a 0,048 mm, si registra una sottostima con valore medio pari al 83%. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 55**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 49** nel quale i punti individuati, dell'articolo in questione, sono tutti al di sopra della retta di riferimento.

CAMPIONE AND MIRAGLIA (2003)

In tale paragrafo, si va a trattare la risposta relativa all'articolo sperimentale di *Campione and Miraglia (2003)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in calcestruzzo mediante FRP, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

	CARATTERISTICHE PROVINI IN CLS										CARATTERISTICHE DEL RINFORZO-FRP					
	#ID	Diametro [mm]	Base [mm]	Altezza [mm]	rc [mm]	fc0_exp [Mpa]	sc0_exp	fcc_exp	ecc_exp	fcc_exp/fc0_exp	ecc_exp/sc0_exp	Ec0 [Mpa]	tf [mm]	pf	Ef [Mpa]	ef
SILVA AND RODRIGUES (2006)	1	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	89,4	0,0272	3,262773723	13,6	32145,76	2,54	0,06773333	210000	0,0218
	2	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	87,5	0,0228	3,193430657	11,4	32145,76	2,54	0,06773333	210000	0,0218
	3	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	91,9	0,0234	3,354014599	11,7	32145,76	2,54	0,06773333	210000	0,0218
	4	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	89,8	0,0232	3,277372263	11,6	32145,76	2,54	0,06773333	210000	0,0218
	5	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	91,9	0,0231	3,354014599	11,55	32145,76	2,54	0,06773333	210000	0,0218
	6	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	81,2	0,0205	2,96350365	10,25	32145,76	2,54	0,06773333	210000	0,0218
	7	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	88,7	0,0255	3,237226277	12,75	32145,76	2,54	0,06773333	210000	0,0218
	8	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	87,5	0,0221	3,193430657	11,05	32145,76	2,54	0,06773333	210000	0,0218
	9	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	89,1	0,0243	3,251824818	12,15	32145,76	2,54	0,06773333	210000	0,0218
	10	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	86	0,0265	3,138686131	13,25	32145,76	2,54	0,06773333	210000	0,0218
	11	250	176,776695	176,7766953	0	27,4	0,002	55,8	0,0109	2,03649635	5,45	32145,76	2,54	0,04064	210000	0,0218
12	150	106,066017	106,0660172	0	27,4	0,002	128,1	0,0244	4,675182482	12,2	32145,76	3,81	0,1016	210000	0,0218	
13	150	106,066017	106,0660172	0	43,75	0,002	40,6	0,0019	0,928	0,95	27120	0,159	0,00444	230000	0,018	
14	150	106,066017	106,0660172	0	43,75	0,002	44	0,0022	1,005714286	1,1	32000	0,159	0,00444	230000	0,018	
15	150	106,066017	106,0660172	0	43,75	0,002	40,7	0,002	0,930285714	1	29900	0,159	0,00444	230000	0,018	
16	150	106,066017	106,0660172	0	43,75	0,002	44,2	0,002	1,010285714	1	31600	0,159	0,00444	230000	0,018	
17	150	106,066017	106,0660172	0	43,75	0,002	85	/	1,942857143	/	33700	0,159	0,0133	230000	0,018	
18	150	106,066017	106,0660172	0	43,75	0,002	86	/	1,965714286	/	33740	0,159	0,0133	230000	0,018	
19	150	106,066017	106,0660172	0	43,75	0,002	87	/	1,988571429	/	36070	0,159	0,0133	230000	0,018	
20	150	106,066017	106,0660172	0	43,75	0,002	85	/	1,942857143	/	34060	0,159	0,0133	230000	0,018	
21	140	98,9949494	98,99494937	0	11,4	0,00359	32,31	0,01778	2,834210526	4,95264624	26838,81	0,164	0,0133	240000	0,018	
22	140	98,9949494	98,99494937	0	11,4	0,00359	31,01	0,01742	2,720175439	4,852367688	26838,81	0,164	0,0133	240000	0,018	
23	140	98,9949494	98,99494937	0	11,4	0,00359	21,45	0,01271	1,881578947	3,540389972	26838,81	0,046	0,0133	270000	0,025	
24	140	98,9949494	98,99494937	0	11,4	0,00359	20,87	0,01259	1,830701754	3,506963788	26838,81	0,046	0,0133	270000	0,025	
25	140	98,9949494	98,99494937	0	11,4	0,00359	19,83	0,01297	1,739473684	3,61281337	26838,81	0,048	0,0133	235	0,015	
26	140	98,9949494	98,99494937	0	11,4	0,00359	19,31	0,01107	1,693859649	3,083565646	26838,81	0,048	0,0133	235	0,015	

fu [Mpa]	ef	Ag [mm^2]	Ac [mm^2]	fcc,theo [Mpa]	ki	fl [Mpa]	ke	fl [Mpa]	Ae [mm^2]	Acc [mm^2]	pcc	Aa [mm^2]	Ac [mm^2]	Fu [Mpa]	ecc,theo	fcc,theo/fcc,exp	ecc,theo/ ecc,exp
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	246,62882	2	109,614411	1	109,6144112	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	2,75871166	/
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	246,62882	2	109,614411	1	109,6144112	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	2,818615113	/
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	246,62882	2	109,614411	1	109,6144112	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	2,683665097	/
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	246,62882	2	109,614411	1	109,6144112	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	2,746423412	/
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	246,62882	2	109,614411	1	109,6144112	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	2,683665097	/
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	246,62882	2	109,614411	1	109,6144112	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	3,037300768	/
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	246,62882	2	109,614411	1	109,6144112	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	2,780482778	/
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	246,62882	2	109,614411	1	109,6144112	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	2,818615113	/
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	246,62882	2	109,614411	1	109,6144112	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	2,768000251	/
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	246,62882	2	109,614411	1	109,6144112	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	2,867777005	/
3236,646	0,0218	49062,5	49062,5	158,93729	2	65,7686467	1	65,76864672	49062,5	48612,5	0,009172	450	49062,5	4578	/	2,848338592	/
3236,646	0,0218	17662,5	17662,5	356,24323	2	164,421617	1	164,4216168	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4578	/	2,780977624	/
3900	0,018	17662,5	17662,5	60,286	2	8,268	1	8,268	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4140	/	1,484876847	/
3900	0,018	17662,5	17662,5	60,286	2	8,268	1	8,268	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4140	/	1,370136364	/
3900	0,018	17662,5	17662,5	60,286	2	8,268	1	8,268	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4140	/	1,481228501	/
3900	0,018	17662,5	17662,5	60,286	2	8,268	1	8,268	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4140	/	1,363936652	/
3900	0,018	17662,5	17662,5	60,286	2	8,268	1	8,268	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4140	/	0,709247059	/
3900	0,018	17662,5	17662,5	60,286	2	8,268	1	8,268	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4140	/	0,701	/
3900	0,018	17662,5	17662,5	60,286	2	8,268	1	8,268	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4140	/	0,692942529	/
3900	0,018	17662,5	17662,5	60,286	2	8,268	1	8,268	17662,5	17212,5	0,0254777	450	17662,5	4140	/	0,709247059	/
800	0,018	15386	15386	15,148571	2	1,87428571	1	1,874285714	15386	14936	0,0292474	450	15386	4320	/	0,468850864	/
800	0,018	15386	15,148571	2	1,87428571	1	1,874285714	15386	14936	0,0292474	450	15386	4320	/	0,488506012	/	
264	0,025	15386	15386	11,746971	2	0,17348571	1	0,173485714	15386	14936	0,0292474	450	15386	6750	/	0,547644356	/
264	0,025	15386	15386	11,746971	2	0,17348571	1	0,173485714	15386	14936	0,0292474	450	15386	6750	/	0,562863988	/
240	0,015	15386	15386	11,729143	2	0,16457143	1	0,164571429	15386	14936	0,0292474	450	15386	3,525	/	0,591484763	/
240	0,015	15386	15386	11,729143	2	0,16457143	1	0,164571429	15386	14936	0,0292474	450	15386	3,525	/	0,607412887	/

Tabella 23_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante articolo di Campione et al. (2003)

Come ben visibile in **Tabella 23**, sono stati riportati i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione ultima a provino già confinato. Questo è un fattore che va a facilitare un'immediata comparazione tra valori teorici e sperimentali dei parametri meccanici che sono di importanza elevata nella seguente indagine. Infatti, con questi dati a disposizione, si va ad estrarre il primo grafico dove si va ad evidenziare la relazione tra resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

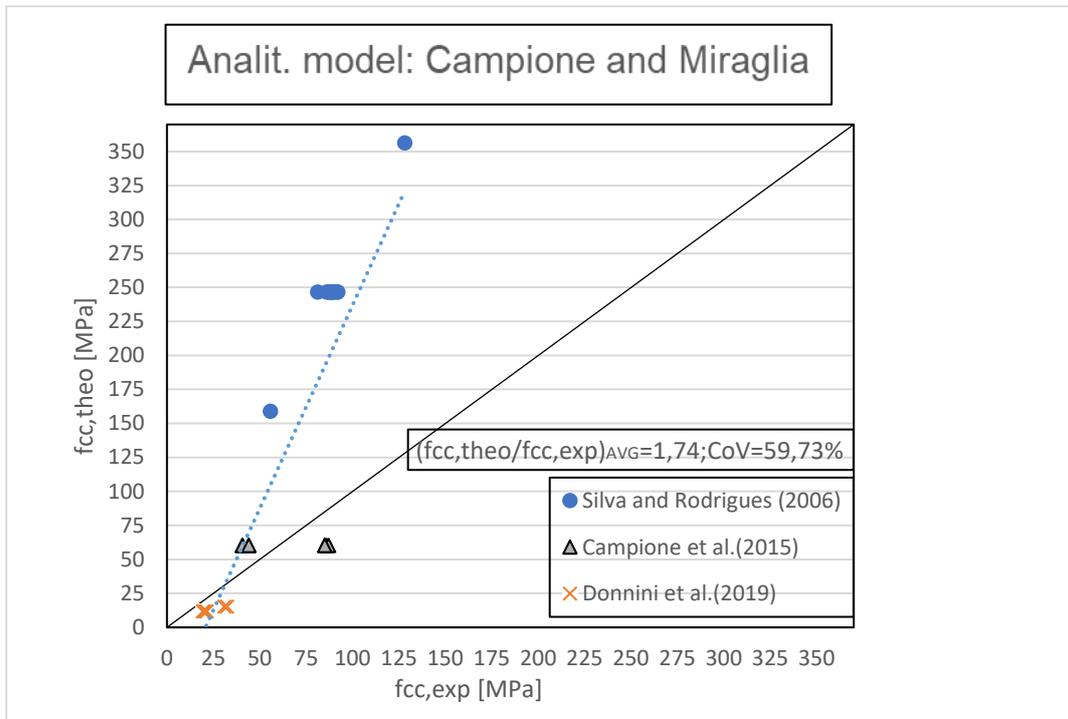


Figura 56 _Relazione resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Dal grafico riportato in **Figura 56**, si possono eseguire alcune conclusioni: nell'articolo di *Silva et al. (2006)* si ha una sovrastima dei valori, e ciò è conseguenza della diretta proporzionalità della resistenza a compressione per un provino confinato rispetto spessore della fibra. Il valore adottato risulta essere pari a 2,54 mm, corrispondente al valore più alto registratosi tra i tre modelli e questo motiva anche il fatto che la sovrastima più alta si ha in questo modello.

Per i dati relativi a *Donnini et al. (2019)*, risultano il modello tende ad essere molto più cautelativo: infatti, tutti i punti tendono a posizionarsi al di sotto della retta di riferimento. Quest'esito, è giustificato dal fatto che vengo impiegati degli spessori di un ordine più piccolo rispetto al modello precedentemente citato.

Infine, per quanto riguarda l'articolo di *Campione et al. (2015)*, presenta dei valori distribuiti in ambo i due lati della retta di riferimento. Questo è motivato dal fatto che la resistenza a compressione confinata, è legata allo spessore della fibra e dalla sua resistenza, che vanno a comportare una sovrastima nella casistica di calcestruzzo con modulo elastico basso, mentre una sottostima per valori più alti di tale parametro. Quindi, si può asserire che per valori alti di rigidità del materiale, il modello tende ad essere più cautelativo.

La distribuzione dei dati risulta essere lineare. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range ristretto tra 0,46 e 3,03. Il valore medio, infatti, risulta essere pari a 1,74 mentre il valore CoV pari a 59,73%. In termini matematici, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che i valori dei vari rapporti tra le due resistenze risultano essere molto variabili rispetto al valore medio.

Infine, come fase ultima dello studio degli articoli sperimentali in esame attraverso il modello analitico dell'articolo di *Campione et al. (2003)*, andiamo a stilare degli istogrammi dove si evidenzia la variazione del comportamento del rapporto dei parametri teorici e sperimentali in funzione del singolo provino esaminato.

Questo step, viene eseguito in modo singolo per ognuno dei tre articoli.

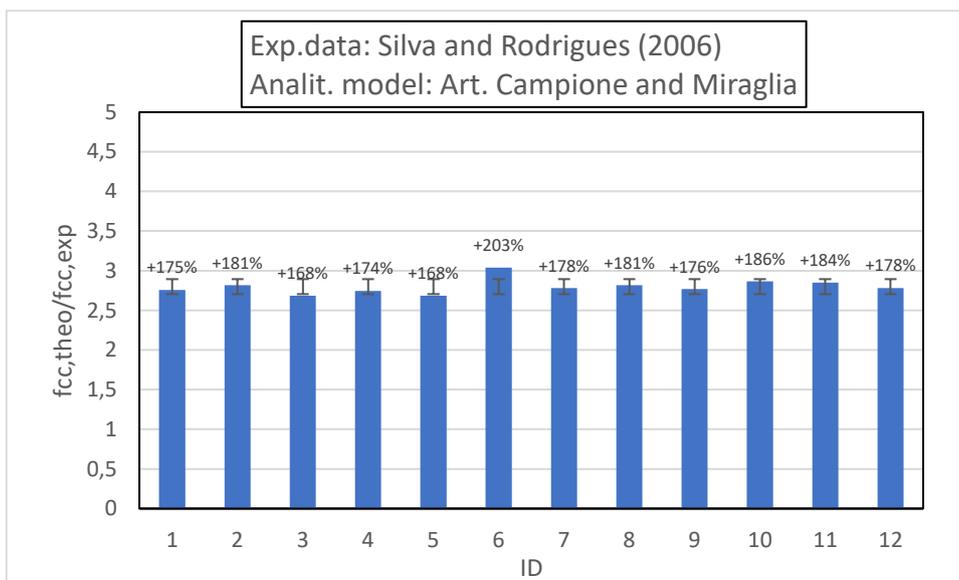


Figura 57_Articolo sperimentale di *Silva et al. (2006)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Andando a focalizzarsi esclusivamente sull'articolo di *Silva et al. (2006)*, la **Figura 57**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate (sperimentale e teorica) e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso +174% e +203%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione della pressione di confinamento e dello spessore complessivo del materiale di rinforzo. Da notare che la eterogeneità dei valori, risultano essere pressochè limitata, anche nella casistica di differenti parametri geometrici, come succede nel provino n.11. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 57**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 56** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Silva et al. (2006)* risultano essere al di sopra della retta di equazione $y=x$.

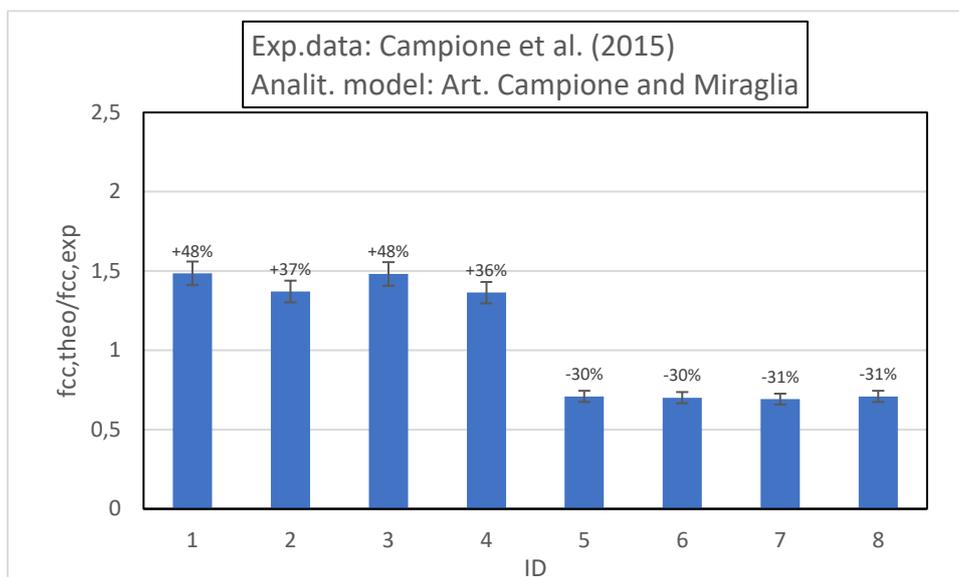


Figura 58_Articolo sperimentale di *Campione et al. (2015)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Nella **Figura 58**, invece, si va ad eseguire un'analogia analisi per l'articolo di *Campione et al. (2015)*.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -31% e +48%. L'andamento dei valori risulta essere in funzione della pressione di confinamento e dello spessore complessivo del materiale di rinforzo. Da notare che la differenziazione incrementale, risulta essere legata dalle resistenze ottenute per via sperimentale.

Difatti, dal modello vengono estrapolati dei valori di resistenza costanti e ciò è conseguenza dell'applicazione di una pressione di confinamento fissa che è dipendente, a sua volta, dal modulo elastico fibra e dal suo spessore. Infatti, nel primo set di provini, la sovrastima è dovuta a valori sperimentali di resistenza molto bassi, mentre nei restanti 4 i valori sperimentali sono raddoppiati e quindi si passa ad una sottostima della resistenza cilindrica. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 58**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 56** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Campione et al. (2015)*, dove i primi quattro provini sono al di sopra della retta di equazione $y=x$, mentre i restanti sono al di sotto.

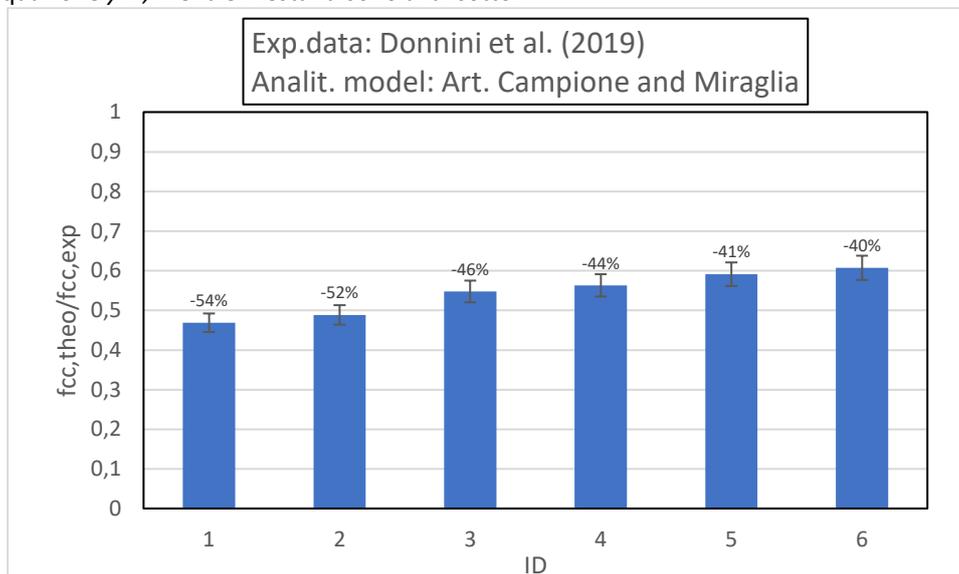


Figura 59_Articolo sperimentale di *Donnini et al. (2019)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

La **Figura 59**, mostra la variazione del discostamento della resistenza cilindrica analitica da quella sperimentale per la trattazione dell'articolo sperimentale di *Donnini et al. (2019)*.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -54% e -40%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione del modulo elastico della fibra e dello spessore complessivo del materiale di rinforzo. Difatti, nei provini con E_f pari a 240 GPa e spessore della fibra di 0,018 mm, si presentano i valori di scarto più elevati, mentre per i provini con modulo elastico della fibra pari a 235 Mpa e spessore pari a 0,015mm, si presentano valori minimi di scarto rispetto all'unità.

CIRCOLARE CNR DT200 R1- 2013

In tale paragrafo, si va a trattare il modello analitico relativo all'articolo sperimentale di *Circolare CNR DT200 R1 (2013)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in calcestruzzo mediante FRP, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

	#ID	Diametro [mm]	Base [mm]	Altezza [mm]	Raggio [mm]	fc0,exp[Mpa]	ec0,exp	Ec0 [Mpa]	fcc,exp	ecc,exp	fcc,exp/fc0,exp	ecc,exp/ec0,exp	tf [mm]	pf [%]	Ef [Mpa]
REALFONZO AND NAPOLI	1	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	89,4	0,0272	3,262773723	13,6	0,12	0,0032	240000
	2	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	87,5	0,0228	3,193430657	11,4	0,35	0,009333333	240000
	3	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	91,9	0,0234	3,354014599	11,7	0,7	0,018666667	240000
	4	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	89,8	0,0232	3,277372263	11,6	0,17	0,004533333	235000
	5	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	91,9	0,0231	3,354014599	11,55	0,5	0,013333333	235000
	6	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	81,2	0,0205	2,96350365	10,25	0,34	0,009066667	230000
	7	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	88,7	0,0255	3,237226277	12,75	0,34	0,009066667	230000
	8	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	87,5	0,0221	3,193430657	11,05	0,85	0,022666667	230000
	9	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	89,1	0,0243	3,251824818	12,15	0,85	0,022666667	230000
	10	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	86	0,0265	3,138686131	13,25	0,34	0,009066667	230000
	11	250	176,7766953	176,7766953	0	27,4	0,002	32145,75715	55,8	0,0109	2,03649635	5,45	1,02	0,01632	230000
	12	150	106,0660172	106,0660172	0	27,4	0,002	32145,75715	128,1	0,0244	4,675182482	12,2	0,17	0,004533333	230000
DONINI ET AL. (2) CAMPIONE ET AL. (2015)	13	150	106,0660172	106,0660172	0	43,75	0,002	27120	40,6	0,0019	0,928	0,95	0,159	0,00424	230000
	14	150	106,0660172	106,0660172	0	43,75	0,002	32000	44	0,0022	1,005714286	1,1	0,159	0,00424	230000
	15	150	106,0660172	106,0660172	0	43,75	0,002	29900	40,7	0,002	0,930285714	1	0,159	0,00424	230000
	16	150	106,0660172	106,0660172	0	43,75	0,002	31600	44,2	0,002	1,010285714	1	0,159	0,00424	230000
	17	150	106,0660172	106,0660172	0	43,75	0,002	33700	85 /		1,942857143 /		0,159	0,00424	230000
	18	150	106,0660172	106,0660172	0	43,75	0,002	33740	86 /		1,965714286 /		0,159	0,00424	230000
	19	150	106,0660172	106,0660172	0	43,75	0,002	36070	87 /		1,988571429 /		0,159	0,00424	230000
	20	150	106,0660172	106,0660172	0	43,75	0,002	34060	85 /		1,942857143 /		0,159	0,00424	230000
DONINI ET AL. (2) CAMPIONE ET AL. (2015)	21	140	98,99494937	98,99494937	0	11,4	0,00359	49374,32773	32,31	0,01778	2,834210526	4,95264624	0,164	0,004685714	240000
	22	140	98,99494937	98,99494937	0	11,4	0,00359	49374,32773	31,01	0,01742	2,720175439	4,852367688	0,164	0,004685714	240000
	23	140	98,99494937	98,99494937	0	11,4	0,00359	49374,32773	21,45	0,01271	1,881578947	3,540389972	0,046	0,001314286	270000
	24	140	98,99494937	98,99494937	0	11,4	0,00359	49374,32773	20,87	0,01259	1,830701754	3,506963788	0,046	0,001314286	270000
	25	140	98,99494937	98,99494937	0	11,4	0,00359	49374,32773	19,83	0,01297	1,739473684	3,61281337	0,048	0,001371429	235000
	26	140	98,99494937	98,99494937	0	11,4	0,00359	49374,32773	19,31	0,01107	1,693859649	3,08356546	0,048	0,001371429	235000

fcd [Mpa]	YRd	Ac[mm^2]	fcc,theo [Mpa]	efd,rid	KH	Kα	Kv	Keff	fl,eff,[Mg]	γf	γfd	ηa	nf	Ag [mm^2]	ecc,theo	fcc,the/fcc,exp	ecc,theo/ecc,exp
27,4	1	17662,5	37,8348052	0,004	1	1	1	1	1,536	1	1	0,85	1	17662,5	0,007051498	0,423208112	0,259246253
27,4	1	17662,5	48,70143583	0,004	1	1	1	1	4,48	1	1	0,85	1	17662,5	0,009565338	0,556587838	0,419532354
27,4	1	17662,5	61,21392165	0,004	1	1	1	1	8,96	1	1	0,85	1	17662,5	0,012077683	0,666092727	0,516140291
27,4	1	17662,5	40,37878017	0,004	1	1	1	1	2,13067	1	1	0,85	1	17662,5	0,007682864	0,44965234	0,331157927
27,4	1	17662,5	54,04288592	0,004	1	1	1	1	6,26667	1	1	0,85	1	17662,5	0,010673552	0,588061871	0,462058545
27,4	1	17662,5	47,70924862	0,004	1	1	1	1	4,17067	1	1	0,85	1	17662,5	0,009352194	0,587552323	0,456204588
27,4	1	17662,5	47,70924862	0,004	1	1	1	1	4,17067	1	1	0,85	1	17662,5	0,009352194	0,537872025	0,366752708
27,4	1	17662,5	64,80995582	0,004	1	1	1	1	10,4267	1	1	0,85	1	17662,5	0,012753131	0,740685209	0,577064763
27,4	1	17662,5	64,80995582	0,004	1	1	1	1	10,4267	1	1	0,85	1	17662,5	0,012753131	0,727384465	0,524820216
27,4	1	17662,5	47,70924862	0,004	1	1	1	1	4,17067	1	1	0,85	1	17662,5	0,009352194	0,554758705	0,352912983
27,4	1	49062,5	57,45214851	0,004	1	1	1	1	7,5072	1	1	0,85	1	49062,5	0,011351542	1,029608396	1,041425892
27,4	1	17662,5	40,19402493	0,004	1	1	1	1	2,08533	1	1	0,85	1	17662,5	0,007638126	0,313770686	0,313037955
43,75	1	17662,5	82,73134638	0,018	1	1	1	1	8,7768	1	1	0,85	1	17662,5	0,010218469	2,037717891	5,378141691
43,75	1	17662,5	82,73134638	0,018	1	1	1	1	8,7768	1	1	0,85	1	17662,5	0,010218469	1,880257872	4,644758733
43,75	1	17662,5	82,73134638	0,018	1	1	1	1	8,7768	1	1	0,85	1	17662,5	0,010218469	2,032711213	5,109234607
43,75	1	17662,5	82,73134638	0,018	1	1	1	1	8,7768	1	1	0,85	1	17662,5	0,010218469	1,871749918	5,109234607
43,75	1	17662,5	82,73134638	0,018	1	1	1	1	8,7768	1	1	0,85	1	17662,5	0,010218469	0,973309957	0
43,75	1	17662,5	82,73134638	0,018	1	1	1	1	8,7768	1	1	0,85	1	17662,5	0,010218469	0,9619924	0
43,75	1	17662,5	82,73134638	0,018	1	1	1	1	8,7768	1	1	0,85	1	17662,5	0,010218469	0,950935016	0
43,75	1	17662,5	82,73134638	0,018	1	1	1	1	8,7768	1	1	0,85	1	17662,5	0,010218469	0,973309957	0
11,4	1	15386	38,7796569	0,018	1	1	1	1	10,1211	1	1	0,85	1	15386	0,017633627	1,200236982	0,991767521
11,4	1	15386	38,7796569	0,018	1	1	1	1	10,1211	1	1	0,85	1	15386	0,017633627	1,25055327	1,01226329
11,4	1	15386	27,19734155	0,025	1	1	1	1	4,43571	1	1	0,85	1	15386	0,012856655	1,267941331	1,011538551
11,4	1	15386	27,19734155	0,025	1	1	1	1	4,43571	1	1	0,85	1	15386	0,012856655	1,3031788	1,021179903
11,4	1	15386	21,93925334	0,015	1	1	1	1	2,41714	1	1	0,85	1	15386	0,010407009	1,106366785	0,802390789
11,4	1	15386	21,93925334	0,015	1	1	1	1	2,41714	1	1	0,85	1	15386	0,010407009	1,136160194	0,940109172

Tabella 24_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante articolo di Campione et al. (2003)

Come ben visibile in **Tabella 24**, sono stati riportati anche i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione a provino già confinato. Questo aspetto risulta essere molto importante in quanto rende immediata una possibile comparazione con i vari ottenuti per via teorica attraverso il modello analitico relativo alla *Circolare CNR DT200 R1-2013*. Infatti, seguendo questo filo logico, si va ad estrarre il primo grafico dove si va ad evidenziare la relazione tra resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

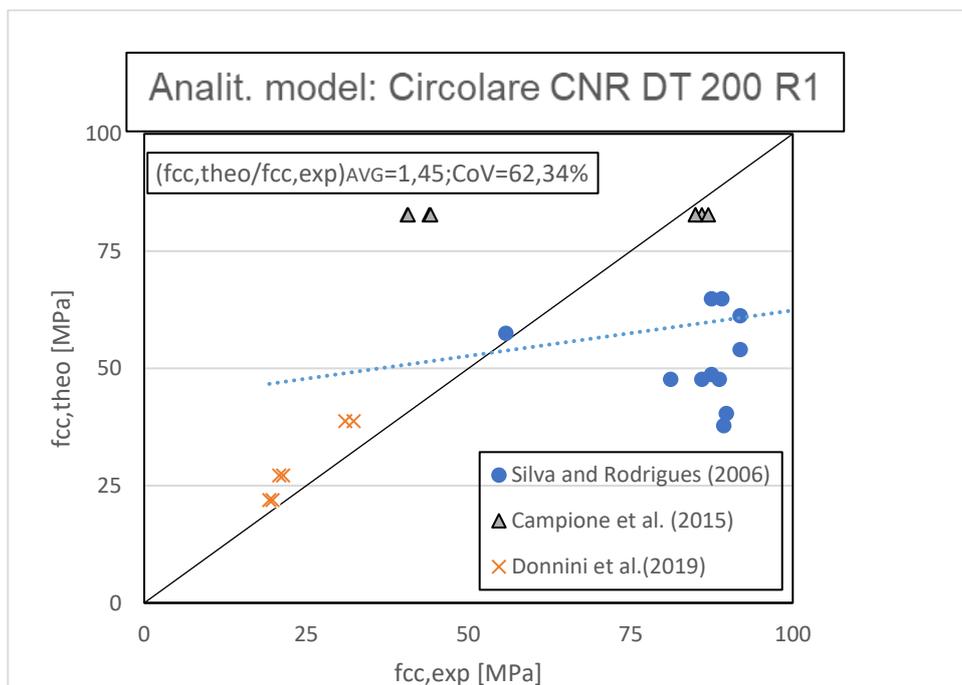


Figura 60_Relazione resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Il grafico riportato in **Figura 60**, è stato prodotto andando a considerare i valori teorici e sperimentali di tutti e tre gli articoli di riferimento. Prendendo in riferimento la retta di equazione $y=x$, che sancisce rapporto unitario tra valore teorico e sperimentale della resistenza cilindrica di uno stesso provino, risulta che: per *Silva et al. (2006)* il modello tende a fornire una sottostima e ciò risulta essere legato al fatto che vengono utilizzati degli spessori della fibra con entità molto piccole. Infatti, l'unico provino quale fa registrare una sovrastima, presenta lo spessore più elevato ed è pari a 1,02 mm.

Per *Donnini et al. (2019)*, il modello fa registrare delle resistenze cilindriche confinate più grandi rispetto a quelle sperimentali. Tale aspetto, risulta essere conseguenza dei valori alti del modulo elastico della fibra, oltre che lo spessore della stessa.

Infine, per quanto riguarda l'articolo di *Campione et al. (2015)*, si registra una sovrastima della resistenza a compressione a provino confinato. Da notare, però, che il modello risulta essere molto più conservativo nella casistica di provini con parametri meccanici iniziali più ottimali e comportando, così, una riduzione dello scarto tra valore sperimentale e teorico della resistenza.

La distribuzione dei dati risulta essere lineare. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range ristretto tra 0,31 e 1,92. Il valore medio, infatti, risulta essere pari a 1,45 mentre il valore *CoV* pari a 62,34%. In termini matematici, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che i valori dei vari rapporti tra le due resistenze risultano essere molto variabili rispetto al valore medio.

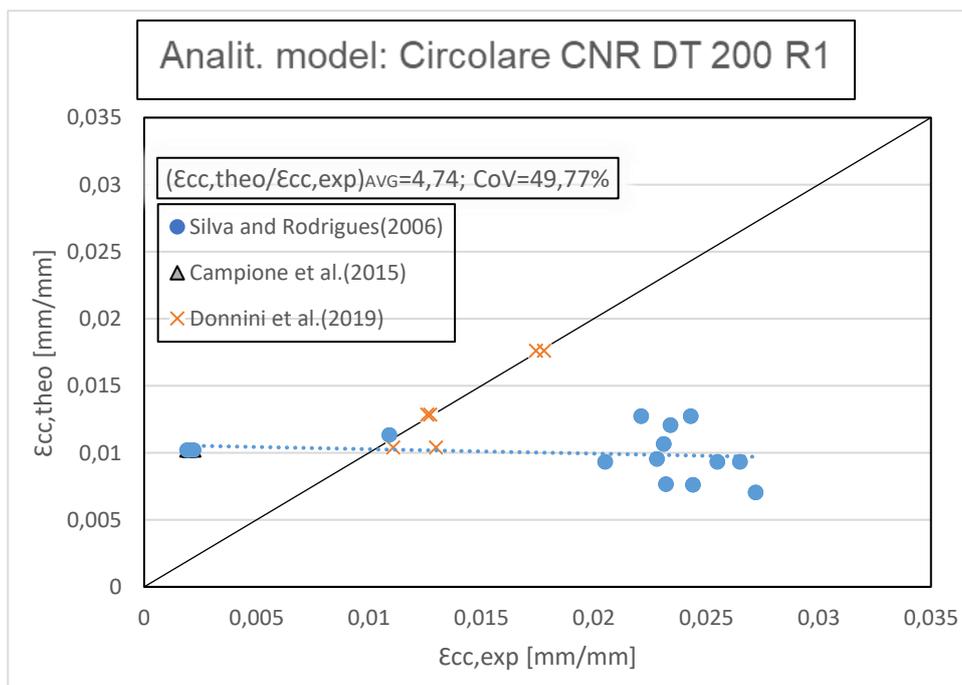


Figura 61_Relazione Deformazione confinata teorica- Deformazione confinata sperimentale

Analoga analisi, ma in termini deformativi, viene mostrata in **Figura 61**. Prendendo in riferimento la retta di equazione $y=x$, che sancisce rapporto unitario tra valore teorico e sperimentale della deformazione di uno stesso provino, risulta essere ben evidente che tutti i punti ottenuti dagli articoli sperimentali di *Silva et al. (2006)* e *Donnini et al. (2019)* risultano essere in corrispondenza o al di sotto della retta stessa. Questo è dovuto al fatto che la deformazione ultima confinata risulta essere legata direttamente al valore della pressione efficace di confinamento laterale quale, a sua volta è in funzione della resistenza iniziale. Infatti, in questo caso, si presentano dei valori molto bassi. Invece, per valori più alti, come nell' articolo di *Campione et al. (2015)*, si registra una maggiore efficacia da parte del confinamento.

Come risulta essere ben visibile dalla linea di tendenza in **Figura 61**, la distribuzione dei dati risulta essere lineare. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range molto ampio, ossia tra 2,89 e 6,37. Per quanto riguarda il valore medio, invece, si può asserire che tale risulta essere pari a 4,74 e un valore CoV pari a 49,77 %. Nonostante il valore sia aumentato rispetto al CoV relativo alle resistenze cilindriche, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che la variabilità dei valori dei rapporti tra le due deformazioni, risulta essere molto contenuta rispetto al valore medio.

Infine, come fase ultima dello studio degli articoli sperimentali in esame attraverso il modello analitico della *Circolare CNR DT200 R1-2013*, andiamo a stilare degli istogrammi dove si evidenzia la variazione del comportamento del rapporto dei parametri teorici e sperimentali in funzione del singolo provino esaminato.

Questo step, viene eseguito in modo singolo per ognuno dei tre articoli.

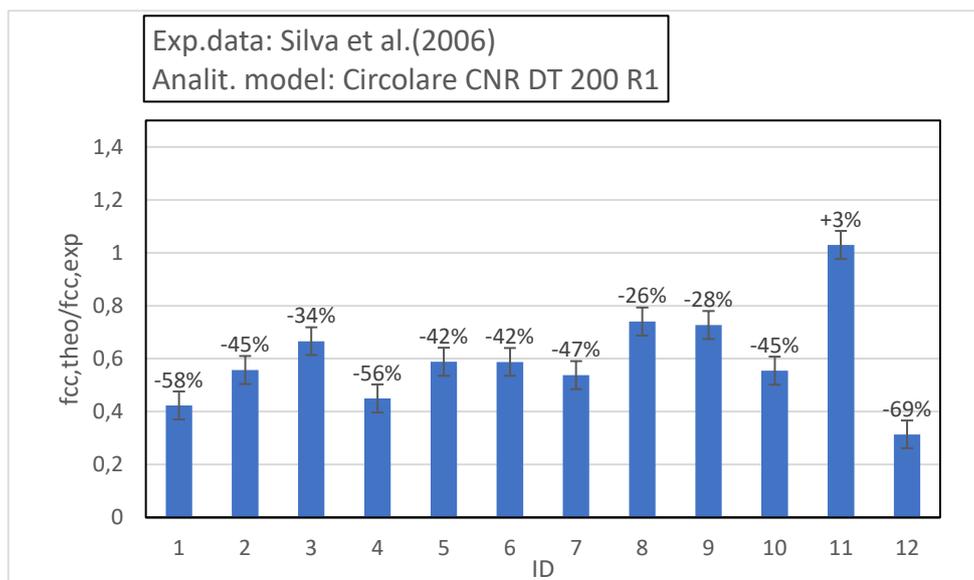


Figura 62_Articolo sperimentale di *Silva et al. (2006)*: Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

Trattando l'articolo di *Silva et al. (2006)*, la **Figura 62**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate (sperimentale e teorica) e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -69% e +3%. L'oscillazione valori risulta essere in funzione della rigidezza e dello spessore del rinforzo fibroso.

Difatti, man mano che lo spessore aumenta va a diminuire l'entità dello scarto. Il valore massimo di scarto, ossia -69%, si registra in corrispondenza di 0,17 mm che risulta essere uno dei valori minimi di spessore utilizzati. Invece, il valore minimo di scarto, che va anche a coincidere con l'unico caso di sovrastima della resistenza da parte del modello, si registra in corrispondenza del provino che presenta il massimo spessore complessivo di rinforzo, ossia 1,02 mm. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 62**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 60** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Silva et al. (2006)*, sono tutti al di sotto della retta di riferimento tranne uno che va a coincidere con il provino con spessore di rinforzo maggiore.

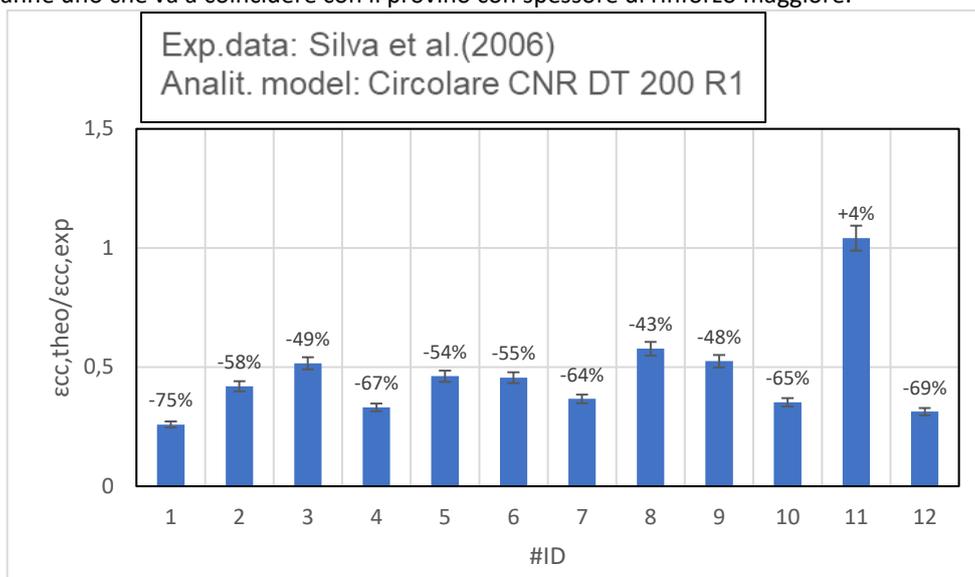


Figura 63_Articolo sperimentale di *Silva et al. (2006)*: Rapporto deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale

Analoga analisi, ma in termini deformativi, viene proposta nella **Figura 63** dove si ha un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due deformazioni confinate (sperimentale e teorica) e

del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati. L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -75% e +4%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione del modulo elastico della fibra e del suo spessore. Difatti, man mano che lo spessore aumenta va a diminuire l'entità dello scarto. Il valore massimo di scarto, ossia -75%, si registra in corrispondenza dei provini che presentano uno spessore di rinforzo pari a 0,12 mm che risulta essere lo spessore minimo in questa esperienza. Per quanto riguarda il valore di scarto minimo, invece, bisogna andare a cercarlo nel provino quale tende a presentare uno spessore di rinforzo pari a 1,02 mm, ossia valore massimo di spessore registrato. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 63**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 61** nel quale i punti individuati, dell'articolo in questione, sono tutti al di sotto della retta di riferimento tranne uno che va a coincidere con il provino con spessore di rinforzo maggiore.

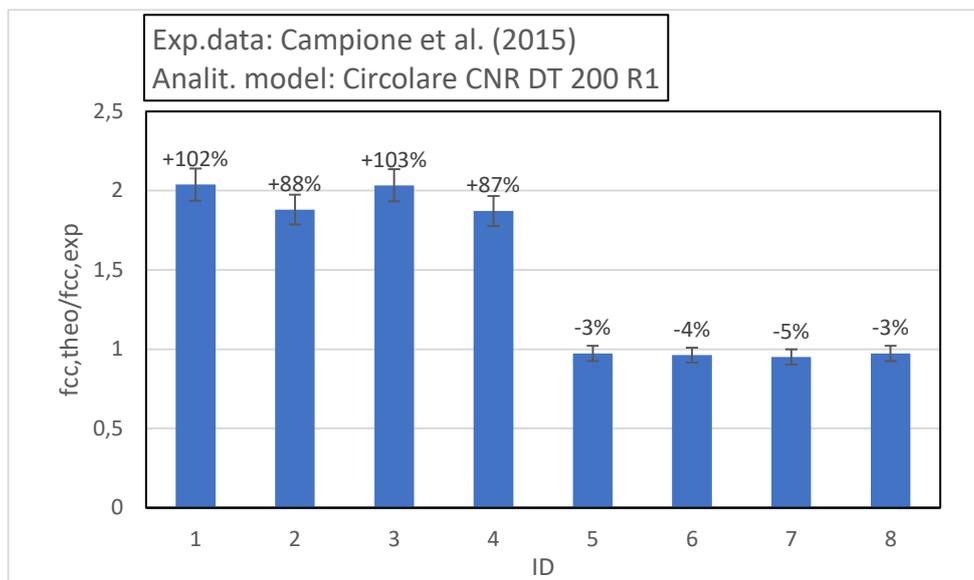


Figura 64 _Articolo sperimentale di *Campione et al. (2015)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Trattando *Campione et al. (2015)*, la **Figura 64**, vede una variazione dello scarto compreso -5% e +102%. Ciò, risulta essere legato alla rigidità e spessore del rinforzo fibroso, e soprattutto ai valori sperimentali della resistenza: nei primi quattro provini, si registra una sovrastima della resistenza da parte del modello e questo è dovuto anche a piccoli valori sperimentali ottenuti; nel secondo set, invece, i valori teorici sono rimasti costanti mentre il valore sperimentale è raddoppiato, comportando un abbattimento dell'incremento, fino a portarlo ad ottenere una minima sottostima.

Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 64**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 60** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Campione et al. (2015)*, sono distribuiti in modo equo in ambo i lati rispetto alla retta di riferimento di equazione $y=x$.

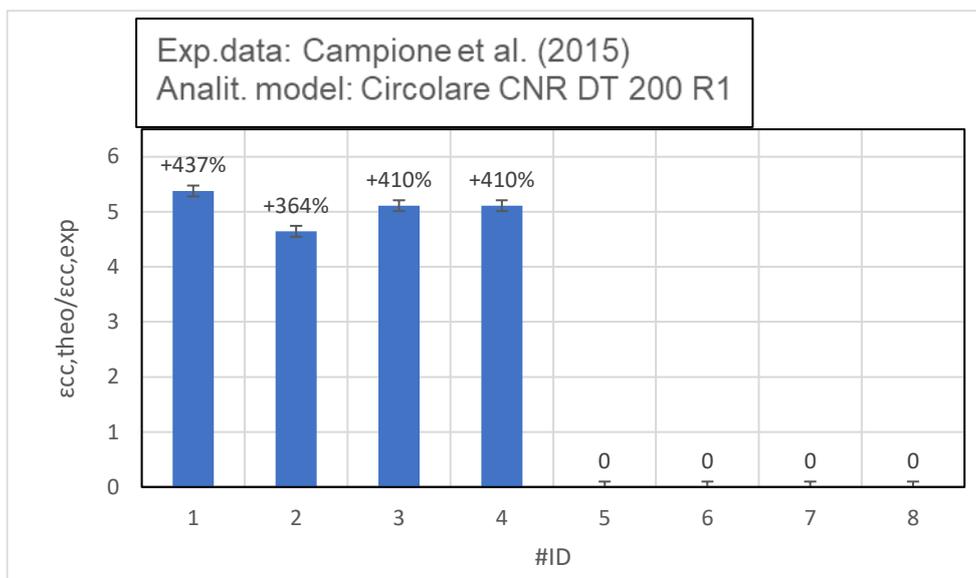


Figura 65_Articolo sperimentale di *Campione et al. (2015)*: Rapporto deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale

Come detto in precedenza, la **Figura 65**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due deformazioni confinate (sperimentale e teorica) e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso +410% e +435%. Va precisato, che i valori sperimentali di deformazione degli ultimi quattro provini non era disponibili, e quindi il rapporto incrementale non poteva essere calcolato e considerato. La variabilità incrementale risulta essere in funzione del modulo elastico della fibra, dello spessore complessivo e del valore sperimentale di deformazione.

Come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 65**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 61** nel quale i punti individuati, dell'articolo in questione, sono tutti al di sopra della retta di riferimento.

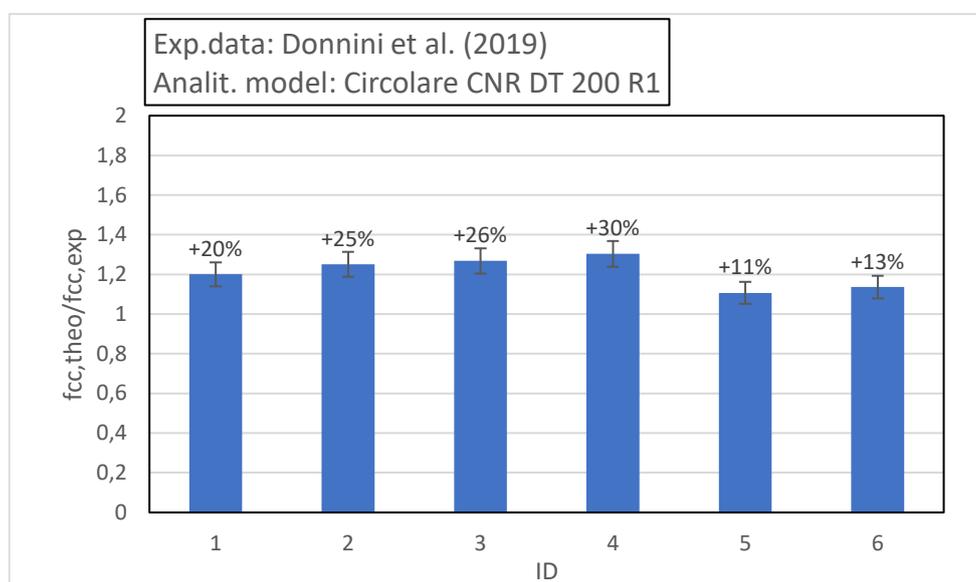


Figura 66_Articolo sperimentale di *Donnini et al. (2019)*: Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

Infine, andando a considerare *Donnini et al. (2019)*, la **Figura 66** presenta lo sviluppo dello scarto tra valore teorico e sperimentale della resistenza a compressione a provino confinato.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso +11% e +30%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione del modulo elastico della fibra e dello spessore complessivo: nei primi 2 provini con E_f pari a 240 GPa e spessore pari a 0,164 mm, si registra una sovrastima con valore medio pari al 22,5%; per i successivi

due provini, con E_f pari a 270 GPa e spessore pari a 0,046 mm, si registra una sovrastima con valore medio pari al 28%; infine, negli ultimi due provini, con E_f pari a 235 GPa e spessore pari a 0,048 mm, si registra una sovrastima con valore medio pari al 12%.

Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 66**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 60** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Donnini et al. (2019)*, sono posizionati al di sopra della retta di riferimento di equazione $y=x$.

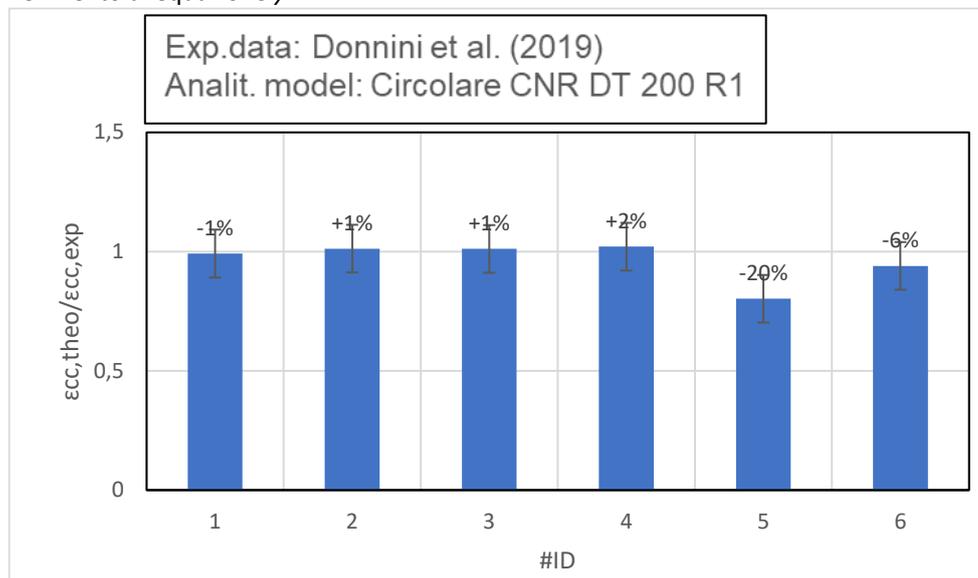


Figura 67_Articolo sperimentale di *Donnini et al. (2019)*: Rapporto deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale

Infine, la **Figura 67** presenta un intervallo di oscillazione dello scarto compreso tra -20% e +2%. Ciò, risulta essere in funzione della rigidezza e dello spessore della fibra, oltre che dal valore sperimentale di deformazione.

La variabilità dei valori risulta essere in funzione del modulo elastico della fibra e dello spessore complessivo del materiale di rinforzo: nei primi 2 provini con E_f pari a 240 GPa e spessore pari a 0,164 mm, si registra una stima con valore medio pari al 0%; per i successivi due provini, con E_f pari a 270 GPa e spessore pari a 0,046 mm, si registra una sovrastima con valore medio pari al 1,5%; infine, negli ultimi due provini, con E_f pari a 235 GPa e spessore pari a 0,048 mm, si registra una sottostima con valore medio pari al 13%. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 67**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 61** nel quale i punti individuati, dell'articolo in questione, sono tutti al di sopra della retta di riferimento.

4.1.b VALIDAZIONE SU COLONNE IN MURATURA

Nel seguente sottoparagrafo, si va a trattare l'operazione di consolidamento di colonne realizzate in muratura mediante all'applicazione del sistema composito FRP.

Per tale casistica di confinamento, vengono esaminati e confrontati i seguenti articoli e normative tecniche:

- *Articolo sperimentale di KREVAIKAS ET AL. (2005)*;
- *Articolo sperimentale di DI LUDOVICO ET AL. (2010)*;
- *Circolare CNR DT200 R1-(2013)*.

KREVAIKAS ET AL. (2005)

Tale paragrafo, va a discutere della risposta che si ottiene da parte del modello relativo all'articolo sperimentale di *Krevaikas et al. (2005)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in muratura mediante FRP, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

	CARATTERISTICHE PROVINI IN MURATURA										CARATTERISTICHE DEL RINFORZO-FRI		
	ID	Base [mm]	Altezza [mm]	Raggio [mm]	fm0,exp	em0,exp	fmd,exp	emd,exp	fmd,exp/fm0,exp	emd,exp/em0,exp	fmd,theo	tf [mm]	pf [%]
SNEED ET AL	1	250	250	176,7766953	10,28	/	13,0556	/	1,27	/	10,7552	8	0,09051
	2	250	250	176,7766953	9,46	/	12,0142	/	1,27	/	9,9352	8	0,09051
	3	250	250	176,7766953	9,14	/	11,6078	/	1,27	/	9,6152	8	0,09051
	4	250	250	176,7766953	8,54	/	10,8458	/	1,27	/	9,0152	8	0,09051
	5	250	250	176,7766953	9,21	/	11,7888	/	1,28	/	9,6852	8	0,09051
	6	250	250	176,7766953	9,07	/	11,6096	/	1,28	/	9,5452	8	0,09051
	7	250	250	176,7766953	9,96	/	12,7488	/	1,28	/	10,4352	8	0,09051
	8	250	250	176,7766953	9,74	/	13,7334	/	1,41	/	10,2152	8	0,09051
	9	250	250	176,7766953	10,4	/	14,664	/	1,41	/	10,8752	8	0,09051
	10	250	250	176,7766953	11	/	15,51	/	1,41	/	11,4752	8	0,09051
	11	250	250	176,7766953	10,48	/	14,7768	/	1,41	/	10,9552	8	0,09051
	12	250	250	176,7766953	10,42	/	14,067	/	1,35	/	10,8952	8	0,09051
	13	250	250	176,7766953	9,7	/	13,095	/	1,35	/	10,1752	8	0,09051
	14	250	250	176,7766953	9,75	/	13,1625	/	1,35	/	10,2252	8	0,09051
	15	250	250	176,7766953	10,11	/	13,6485	/	1,35	/	10,5852	8	0,09051
KOUTAS ET AL. (2020)	16	215	215	152,027958	9,97	0,0037	11,25	0,0076	1,128385155	2,054054054	10,83394767	0,095	0,00125
	17	215	215	152,027958	9,97	0,0037	14,69	0,0105	1,473420261	2,837837838	10,83394767	0,095	0,00125
	18	215	215	152,027958	9,97	0,0037	16,01	0,0151	1,605817452	4,081081081	10,83394767	0,095	0,00125
	19	215	215	152,027958	9,97	0,0037	10,71	0,007	1,074222668	1,891891892	10,53383953	0,062	0,000816
	20	215	215	152,027958	9,97	0,0037	14	0,0112	1,404212638	3,027027027	10,53383953	0,062	0,000816
	21	215	215	152,027958	9,97	0,0037	14,41	0,0127	1,445336008	3,432432432	10,53383953	0,062	0,000816
	22	215	215	152,027958	9,97	0,0037	12,72	0,0053	1,275827482	1,432432432	10,24653284	0,044	0,000579
	23	215	215	152,027958	9,97	0,0037	13,5	0,0075	1,354062187	2,027027027	10,24653284	0,044	0,000579
	24	215	215	152,027958	9,97	0,0037	14,82	0,0079	1,486459378	2,135135135	10,24653284	0,044	0,000579
THEOFANIS (2015)	25	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	1,97	0,019	1,655462185	4,871794872	1,191439497	0,044	0,000519
	26	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	2,85	0,018	2,394957983	4,615384615	1,191439497	0,044	0,000519
	27	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	1,4	0,011	1,176470588	2,820512821	1,191439497	0,044	0,000519
	28	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	2,64	0,009	2,218487395	2,307692308	1,191439497	0,044	0,000519
	29	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	3,08	0,012	2,588235294	3,076923077	1,191439497	0,044	0,000519
	30	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	4,5	0,02	3,781512605	5,128205128	1,191439497	0,044	0,000519
	31	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	3,99	0,013	3,352941176	3,333333333	1,191439497	0,044	0,000519
	32	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	5,22	0,024	4,386554622	6,153846154	1,191439497	0,044	0,000519
	33	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	5,16	0,015	4,336134454	3,846153846	1,191439497	0,044	0,000519
	34	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	8,14	/	6,840336134	/	1,191439497	0,044	0,000519
	35	240	240	169,7056275	1,19	0,0039	4,8	0,013	4,033613445	3,333333333	1,191439497	0,044	0,000519

p e RESISTENZA PROVINO CONFINATO														
Ef [Gpa]	εMC [%]	σl [Mpa]	ke	rc	b' [mm]	h' [mm]	Ag [mm^2]	σlu [Mpa]	εf	Ac [mm^2]	nf	εmd,exp	fmd,theo/fmd,exp	emd,theo/εmd,exp
9000	/	0,288	0,33333333	0	250	250	62500	0,288	0,0015	62500	1	/	0,823799749	/
9000	/	0,288	0,33333333	0	250	250	62500	0,288	0,0015	62500	1	/	0,82695477	/
9000	/	0,288	0,33333333	0	250	250	62500	0,288	0,0015	62500	1	/	0,828339565	/
9000	/	0,288	0,33333333	0	250	250	62500	0,288	0,0015	62500	1	/	0,83121577	/
9000	/	0,288	0,33333333	9,5	231	231	53361	0,288	0,0015	62500	1	/	0,821559446	/
9000	/	0,288	0,33333333	9,5	231	231	53361	0,288	0,0015	62500	1	/	0,822181643	/
9000	/	0,288	0,33333333	9,5	231	231	53361	0,288	0,0015	62500	1	/	0,818524096	/
9000	/	0,288	0,33333333	38,1	173,8	173,8	30206,44	0,288	0,0015	62500	1	/	0,743821632	/
9000	/	0,288	0,33333333	38,1	173,8	173,8	30206,44	0,288	0,0015	62500	1	/	0,74162575	/
9000	/	0,288	0,33333333	38,1	173,8	173,8	30206,44	0,288	0,0015	62500	1	/	0,739858156	/
9000	/	0,288	0,33333333	38,1	173,8	173,8	30206,44	0,288	0,0015	62500	1	/	0,741378377	/
9000	/	0,288	0,33333333	9,5	231	231	53361	0,288	0,0015	62500	1	/	0,774521931	/
9000	/	0,288	0,33333333	9,5	231	231	53361	0,288	0,0015	62500	1	/	0,777029401	/
9000	/	0,288	0,33333333	9,5	231	231	53361	0,288	0,0015	62500	1	/	0,776843305	/
9000	/	0,288	0,33333333	9,5	231	231	53361	0,288	0,0015	62500	1	/	0,775557754	/
225000	/	0,523604651	0,33333333	0	215	215	46225	0,523605	0,0079	46225	1	/	0,963017571	/
225000	/	0,523604651	0,33333333	0	215	215	46225	0,523605	0,0079	46225	1	/	0,737504947	/
225000	/	0,523604651	0,33333333	0	215	215	46225	0,523605	0,0079	46225	1	/	0,676698793	/
225000	/	0,34172093	0,33333333	0	215	215	46225	0,341721	0,0079	46225	1	/	0,983551777	/
225000	/	0,34172093	0,33333333	0	215	215	46225	0,341721	0,0079	46225	1	/	0,75241711	/
225000	/	0,34172093	0,33333333	0	215	215	46225	0,341721	0,0079	46225	1	/	0,731008989	/
74000	/	0,167595659	0,33333333	0	215	215	46225	0,167596	0,0166	46225	1	/	0,805545034	/
74000	/	0,167595659	0,33333333	0	215	215	46225	0,167596	0,0166	46225	1	/	0,759002432	/
74000	/	0,167595659	0,33333333	0	215	215	46225	0,167596	0,0166	46225	1	/	0,691398977	/
430	/	0,000872422	0,33333333	20	200	200	40000	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,604791623	/
430	/	0,000872422	0,33333333	20	200	200	40000	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,418048946	/
430	/	0,000872422	0,33333333	20	200	200	40000	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,851028212	/
430	/	0,000872422	0,33333333	10	220	220	48400	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,45130284	/
430	/	0,000872422	0,33333333	10	220	220	48400	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,386831005	/
430	/	0,000872422	0,33333333	10	220	220	48400	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,264764333	/
430	/	0,000872422	0,33333333	10	220	220	48400	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,29860639	/
430	/	0,000872422	0,33333333	10	220	220	48400	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,228245114	/
430	/	0,000872422	0,33333333	10	220	220	48400	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,230899127	/
430	/	0,000872422	0,33333333	10	220	220	48400	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,146368489	/
430	/	0,000872422	0,33333333	10	220	220	48400	0,000872	0,0166	57600	1	/	0,248216562	/

Tabella 25_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante articolo di Krevaias et al. (2005)

Come ben visibile in **Tabella 25**, sono stati riportati anche i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione ultima a provino già confinato. Questo tende a favorire una comparazione tra valori teorici e sperimentali dei parametri meccanici di nostro interesse. Essendo in possesso di tali dati, si va ad estrarre un primo grafico dove si evidenzia la relazione tra resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

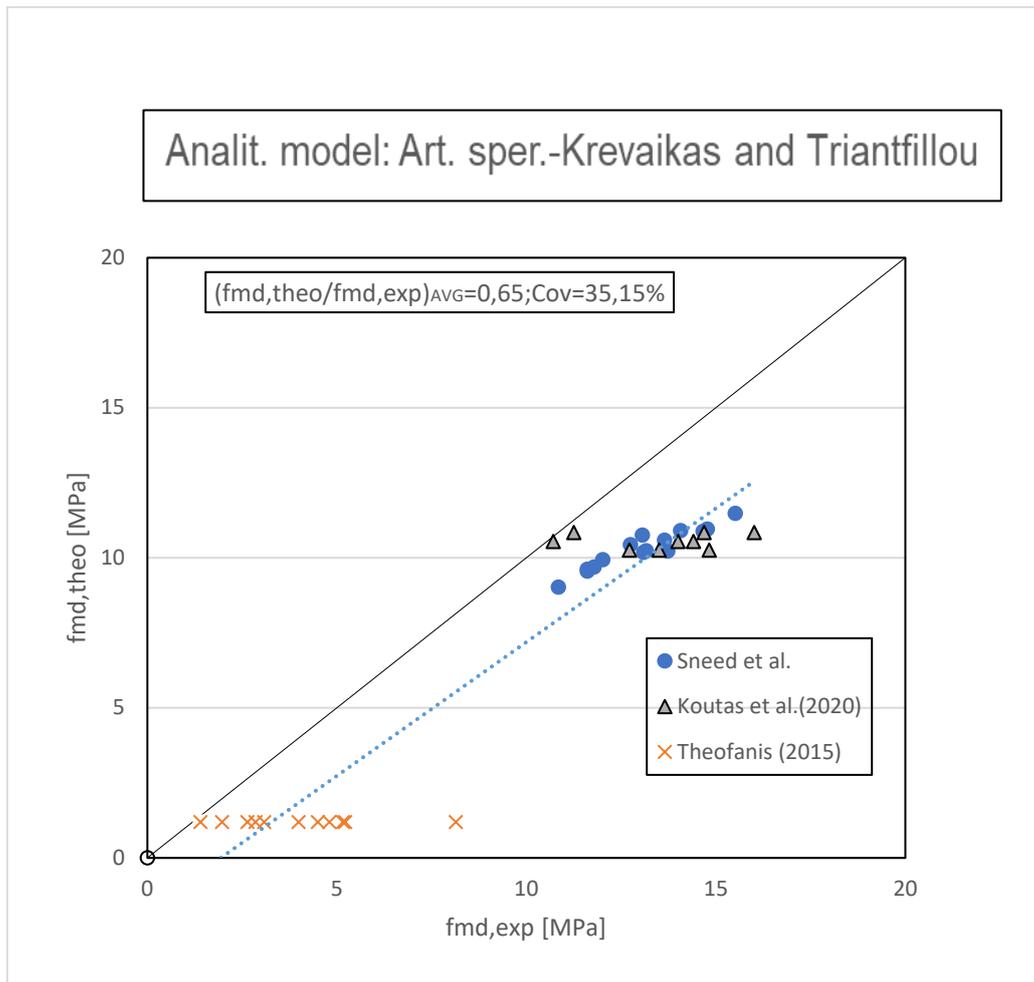


Figura 68_Relazione resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Il grafico riportato in **Figura 68**, è ottenuto mediante la considerazione dei valori teorici e sperimentali di tutti e tre gli articoli di riferimento. Prendendo in riferimento la retta di equazione $y=x$, che sancisce rapporto unitario tra valore teorico e sperimentale della resistenza cilindrica di uno stesso provino, risulta che: i punti relativi i tre articoli sperimentali considerati, risultano essere al di sotto di essa. Questo aspetto, tende a far asserire che il modello risulta essere molto cautelativo nella casistica di elementi con resistenza a compressione iniziale bassa.

La distribuzione dei dati risulta essere lineare. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range ristretto tra 0,14 e 0,98. Il valore medio, infatti, risulta essere pari a 0,65 mentre il valore CoV pari a 35,15%. In termini matematici, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che i valori dei vari rapporti tra le due resistenze risultano essere molto variabili rispetto al valore medio.

Infine, come fase ultima dello studio della risposta dell'articolo di *Krevaikas et al. (2005)*, si va a stilare degli istogrammi dove si evidenzia la variazione del discostamento del rapporto dei parametri teorici e sperimentali in funzione del singolo provino esaminato. Questo step, viene eseguito in modo singolo per ognuno dei tre articoli.

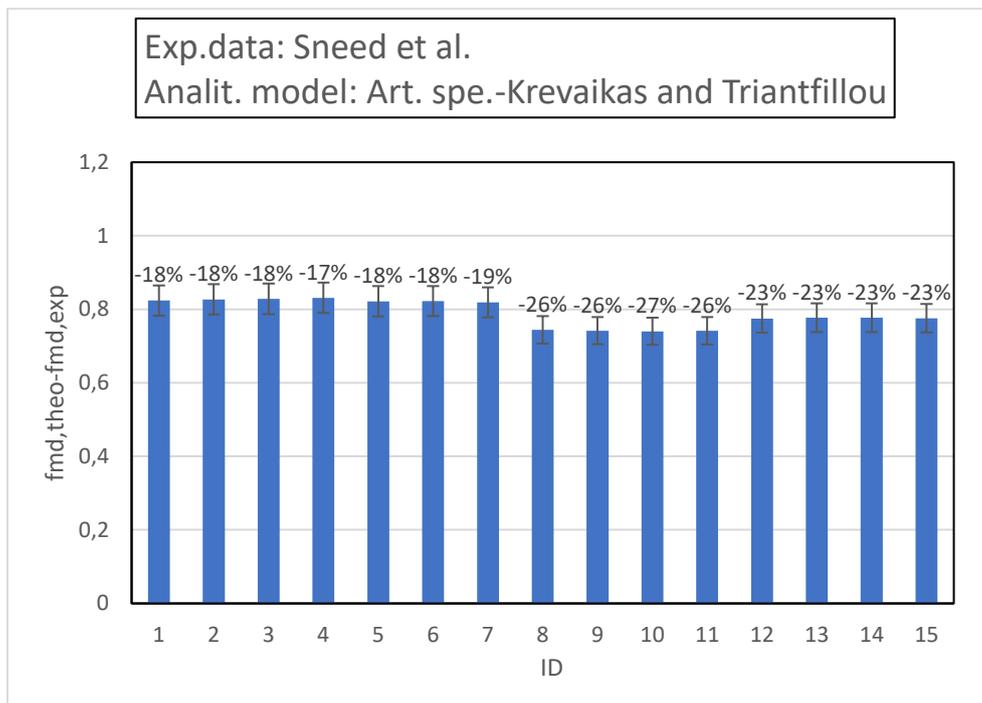


Figura 69_Articolo sperimentale di *Sneed et al. (2017)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Nella trattazione dell'articolo di *Sneed et al. (2017)*, la **Figura 69** mostra un istogramma indicante lo sviluppo del discostamento tra valore teorico e sperimentale relativo alla resistenza a compressione con provino confinato. L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -23% e -18%. Ciò è legato direttamente alla pressione di confinamento e alla rigidità del rinforzo. Infatti, la variazione dei valori incrementali risulta essere direttamente proporzionale al valore della pressione efficace di confinamento. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 69**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 68** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Sneed et al. (2017)* risultano essere al di sotto della retta di equazione $y=x$.

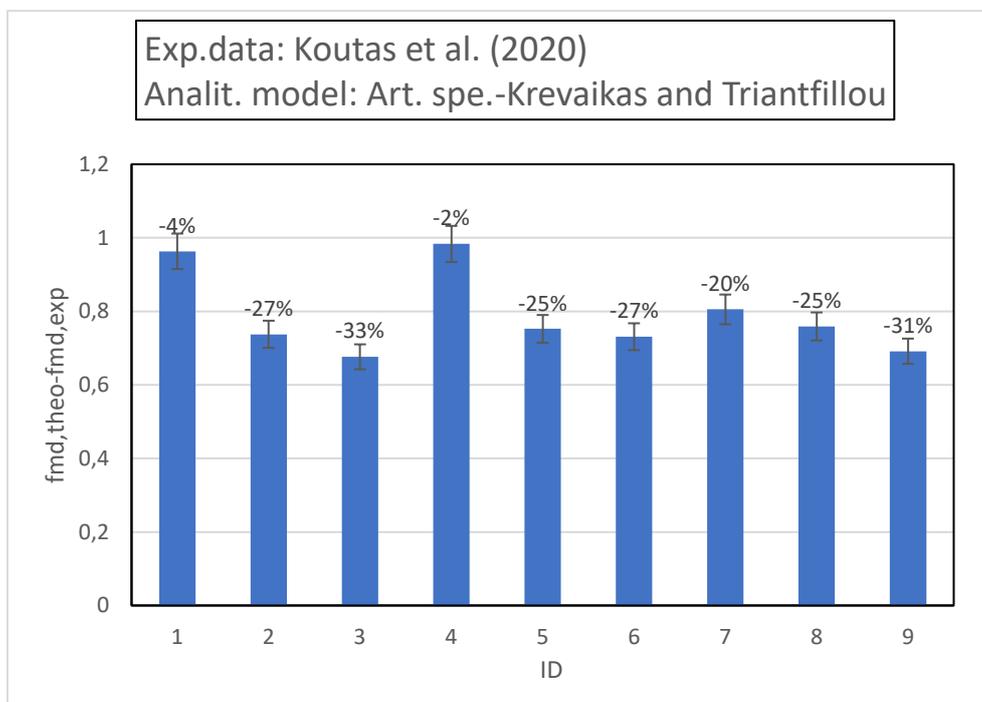


Figura 70_Articolo sperimentale di *Koutas et al. (2020)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Analoga analisi viene effettuata per l'articolo sperimentale di *Koutas et al. (2020)*, come si dimostra col grafico riportato in **Figura 70**. L'intervallo di oscillazione degli scarti rispetto all'unità, risulta essere compreso -31% e -2%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione della pressione di confinamento e dello spessore della fibra. Infatti, la resistenza confinata è direttamente proporzionale ai due parametri citati. Da notare, che tutti i provini testati rientrano nella casistica di sottostima della resistenza da parte del modello. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 70**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 68** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Koutas et al. (2020)* risultano essere al di sotto della retta di equazione $y=x$.

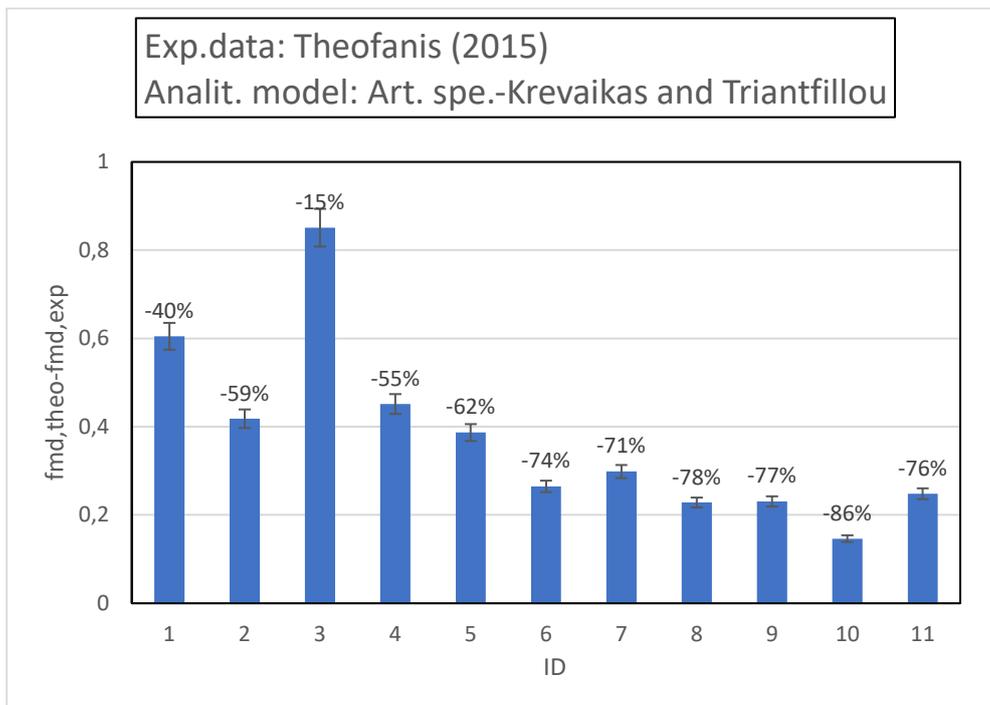


Figura 71_Articolo sperimentale di *Theofanis et al. (2015)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Infine, la **Figura 71**, vede la trattazione dello scarto tra valore teorico e sperimentale della resistenza confinata relativa all'articolo di *Theofanis et al. (2015)*. L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -86% e -15%. Tale è legato all'entità della pressione di confinamento, dello spessore della fibra e soprattutto del valore sperimentale della resistenza confinata. Infatti, i valori teorici risultano essere costanti in quanto vi è stesso valore per pressione di confinamento e di spessore fibra, mentre variano i valori sperimentali. Il modello, in questo caso, tende a sottostimare i valori della resistenza rispetto ai suoi corrispondenti parametri sperimentali. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 71**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 68** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Theofanis et al. (2015)* risultano essere al di sotto della retta di equazione $y=x$.

DI LUDOVICO ET AL. (2010)

In tale paragrafo, si va a trattare il modello analitico relativo all'articolo sperimentale di *Di Ludovico et. (2010)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in muratura mediante *FRP*, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

	#ID	Base [mm]	Altezza [mm]	Diametro [mm]	fm0,exp[Mpa]	em0,exp	fmd,exp	emd,exp	fmd,exp/fm0,exp	emd,exp/em0,exp	Materiale	tf [mm]	ffu [MPa]	Ef [Mpa]
SNEED ET AL	1	250	250	353,5533906	10,28	0,002	13,0556	/	1,27	/	SRG	8	4,3	6700
	2	250	250	353,5533906	9,46	0,002	12,0142	/	1,27	/	SRG	8	4,3	9000
	3	250	250	353,5533906	9,14	0,002	11,6078	/	1,27	/	SRG	8	4,3	9000
	4	250	250	353,5533906	8,54	0,002	10,8458	/	1,27	/	SRG	8	4,3	9000
	5	250	250	353,5533906	9,21	0,002	11,7888	/	1,28	/	SRG	8	4,3	9000
	6	250	250	353,5533906	9,07	0,002	11,6096	/	1,28	/	SRG	8	4,3	9000
	7	250	250	353,5533906	9,96	0,002	12,7488	/	1,28	/	SRG	8	4,3	9000
	8	250	250	353,5533906	9,74	0,002	13,7334	/	1,41	/	SRG	8	4,3	9000
	9	250	250	353,5533906	10,4	0,002	14,664	/	1,41	/	SRG	8	4,3	9000
	10	250	250	353,5533906	11	0,002	15,51	/	1,41	/	SRG	8	4,3	9000
	11	250	250	353,5533906	10,48	0,002	14,7768	/	1,41	/	SRG	8	4,3	9000
	12	250	250	353,5533906	10,42	0,002	14,067	/	1,35	/	SRG	8	4,3	9000
	13	250	250	353,5533906	9,7	0,002	13,095	/	1,35	/	SRG	8	4,3	9000
	14	250	250	353,5533906	9,75	0,002	13,1625	/	1,35	/	SRG	8	4,3	9000
	15	250	250	353,5533906	10,11	0,002	13,6485	/	1,35	/	SRG	8	4,3	9000
KOUTAS ET AL. (2020)	16	215	215	304,0559159	9,97	0,0037	11,25	0,0076	1,128385155	2,054054054	SRG	0,095	4800	225000
	17	215	215	304,0559159	9,97	0,0037	14,69	0,0105	1,473420261	2,837837838	SRG	0,095	4800	225000
	18	215	215	304,0559159	9,97	0,0037	16,01	0,0151	1,605817452	4,081081081	SRG	0,095	4800	225000
	19	215	215	304,0559159	9,97	0,0037	10,71	0,007	1,074222668	1,891891892	SRG	0,062	3800	225000
	20	215	215	304,0559159	9,97	0,0037	14	0,0112	1,404212638	3,027027027	SRG	0,062	3800	225000
	21	215	215	304,0559159	9,97	0,0037	14,41	0,0127	1,445336008	3,432432432	SRG	0,062	3800	225000
	22	215	215	304,0559159	9,97	0,0037	12,72	0,0053	1,275827482	1,432432432	SRG	0,044	1400	74000
	23	215	215	304,0559159	9,97	0,0037	13,5	0,0075	1,354062187	2,027027027	SRG	0,044	1400	74000
	24	215	215	304,0559159	9,97	0,0037	14,82	0,0079	1,486459378	2,135135135	SRG	0,044	1400	74000
	25	240	240	339,411255	1,19	0,0039	1,97	0,019	1,655462185	4,871794872	SRG	0,044	7,14	430
THEOFANIS (2015)	26	240	240	339,411255	1,19	0,0039	2,85	0,018	2,394957983	4,615384615	SRG	0,044	7,14	430
	27	240	240	339,411255	1,19	0,0039	1,4	0,011	1,176470588	2,820512821	SRG	0,044	7,14	430
	28	240	240	339,411255	1,19	0,0039	2,64	0,009	2,218487395	2,307692308	SRG	0,044	7,14	430
	29	240	240	339,411255	1,19	0,0039	3,08	0,012	2,588235294	3,076923077	SRG	0,044	7,14	430
	30	240	240	339,411255	1,19	0,0039	4,5	0,02	3,781512605	5,128205128	SRG	0,044	7,14	430
	31	240	240	339,411255	1,19	0,0039	3,99	0,013	3,352941176	3,333333333	SRG	0,044	7,14	430
	32	240	240	339,411255	1,19	0,0039	5,22	0,024	4,386554622	6,153846154	SRG	0,044	7,14	430
	33	240	240	339,411255	1,19	0,0039	5,16	0,015	4,336134454	3,846153846	SRG	0,044	7,14	430
	34	240	240	339,411255	1,19	0,0039	8,14	/	6,840336134	/	SRG	0,044	7,14	430
	35	240	240	339,411255	1,19	0,0039	4,8	0,013	4,033613445	3,333333333	SRG	0,044	7,14	430

efu	pf	pf*Ef	emd,theo	fmd,theo	α	k'	fl_eff[Mpa]	kv	kH	fl [Mpa]	B' [mm]	H'[mm]	rc [mm]	Ac [mm^2]	fmd,theo/fmd,exp	emd,theo/emd,exp
0,0209	0,128	857,6	/	10,51715	0,5	1,8	2,987306667	1	0,33333333	8,96192	250	250	0	62500	0,805566347	/
0,0209	0,128	1152	/	11,95304	0,5	1,8	4,0128	1	0,33333333	12,0384	250	250	0	62500	0,994909357	/
0,0209	0,128	1152	/	11,79304	0,5	1,8	4,0128	1	0,33333333	12,0384	250	250	0	62500	1,015958235	/
0,0209	0,128	1152	/	11,49304	0,5	1,8	4,0128	1	0,33333333	12,0384	250	250	0	62500	1,059676557	/
0,0209	0,128	1152	/	13,9404	0,5	1,8	5,186335334	1	0,430816	12,0384	231	231	9,5	62500	1,182512521	/
0,0209	0,128	1152	/	13,8704	0,5	1,8	5,186335334	1	0,430816	12,0384	231	231	9,5	62500	1,194735702	/
0,0209	0,128	1152	/	14,3154	0,5	1,8	5,186335334	1	0,430816	12,0384	231	231	9,5	62500	1,122882436	/
0,0209	0,128	1152	/	19,55729	0,5	1,8	8,159603122	1	0,67779797	12,0384	173,8	173,8	38,1	62500	1,424067283	/
0,0209	0,128	1152	/	19,88729	0,5	1,8	8,159603122	1	0,67779797	12,0384	173,8	173,8	38,1	62500	1,356197874	/
0,0209	0,128	1152	/	20,18729	0,5	1,8	8,159603122	1	0,67779797	12,0384	173,8	173,8	38,1	62500	1,301565804	/
0,0209	0,128	1152	/	19,92729	0,5	1,8	8,159603122	1	0,67779797	12,0384	173,8	173,8	38,1	62500	1,348552164	/
0,0209	0,128	1152	/	14,5454	0,5	1,8	5,186335334	1	0,430816	12,0384	231	231	9,5	62500	1,034008929	/
0,0209	0,128	1152	/	14,1854	0,5	1,8	5,186335334	1	0,430816	12,0384	231	231	9,5	62500	1,083268698	/
0,0209	0,128	1152	/	14,2104	0,5	1,8	5,186335334	1	0,430816	12,0384	231	231	9,5	62500	1,079612809	/
0,0209	0,128	1152	/	14,3904	0,5	1,8	5,186335334	1	0,430816	12,0384	231	231	9,5	62500	1,054357886	/
0,0079	0,00177	397,67442	/	5,927488	0,5	1,8	0,523604651	1	0,33333333	1,57081395	215	215	0	46225	0,526887855	/
0,0079	0,00177	397,67442	/	5,927488	0,5	1,8	0,523604651	1	0,33333333	1,57081395	215	215	0	46225	0,403504995	/
0,0079	0,00177	397,67442	/	5,927488	0,5	1,8	0,523604651	1	0,33333333	1,57081395	215	215	0	46225	0,370236625	/
0,0079	0,00115	259,53488	/	5,600098	0,5	1,8	0,34172093	1	0,33333333	1,02516279	215	215	0	46225	0,522884937	/
0,0079	0,00115	259,53488	/	5,600098	0,5	1,8	0,34172093	1	0,33333333	1,02516279	215	215	0	46225	0,400006977	/
0,0079	0,00115	259,53488	/	5,600098	0,5	1,8	0,34172093	1	0,33333333	1,02516279	215	215	0	46225	0,388625793	/
0,0166	0,00082	60,576744	/	5,286672	0,5	1,8	0,167595659	1	0,33333333	0,50278698	215	215	0	46225	0,415618883	/
0,0166	0,00082	60,576744	/	5,286672	0,5	1,8	0,167595659	1	0,33333333	0,50278698	215	215	0	46225	0,391605347	/
0,0166	0,00082	60,576744	/	5,286672	0,5	1,8	0,167595659	1	0,33333333	0,50278698	215	215	0	46225	0,356725519	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,59753	0,5	1,8	0,001405569	1	0,53703704	0,00261727	200	200	20	57600	0,303314733	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,59753	0,5	1,8	0,001405569	1	0,53703704	0,00261727	200	200	20	57600	0,209659658	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,59753	0,5	1,8	0,001405569	1	0,53703704	0,00261727	200	200	20	57600	0,42680716	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,597072	0,5	1,8	0,001151113	1	0,43981481	0,00261727	220	220	10	57600	0,226163637	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,597072	0,5	1,8	0,001151113	1	0,43981481	0,00261727	220	220	10	57600	0,193854546	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,597072	0,5	1,8	0,001151113	1	0,43981481	0,00261727	220	220	10	57600	0,132682667	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,597072	0,5	1,8	0,001151113	1	0,43981481	0,00261727	220	220	10	57600	0,149642106	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,597072	0,5	1,8	0,001151113	1	0,43981481	0,00261727	220	220	10	57600	0,11438161	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,597072	0,5	1,8	0,001151113	1	0,43981481	0,00261727	220	220	10	57600	0,115711628	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,597072	0,5	1,8	0,001151113	1	0,43981481	0,00261727	220	220	10	57600	0,073350369	/
0,0166	0,00073	0,3153333	/	0,597072	0,5	1,8	0,001151113	1	0,43981481	0,00261727	220	220	10	57600	0,124390001	/

Tabella 26_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante articolo di Di Ludovico et al. (2010)

Come ben visibile in **Tabella 26**, sono stati riportati i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione ultima a provino già confinato. Questo, tende a rendere possibile una comparazione con i vari risultati ottenuti per via teorica attraverso il modello analitico relativo all' articolo di *Di Ludovico et al. (2010)*. Infatti, seguendo questo filo logico, si va ad estrarre il primo grafico dove si va ad evidenziare la relazione tra resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

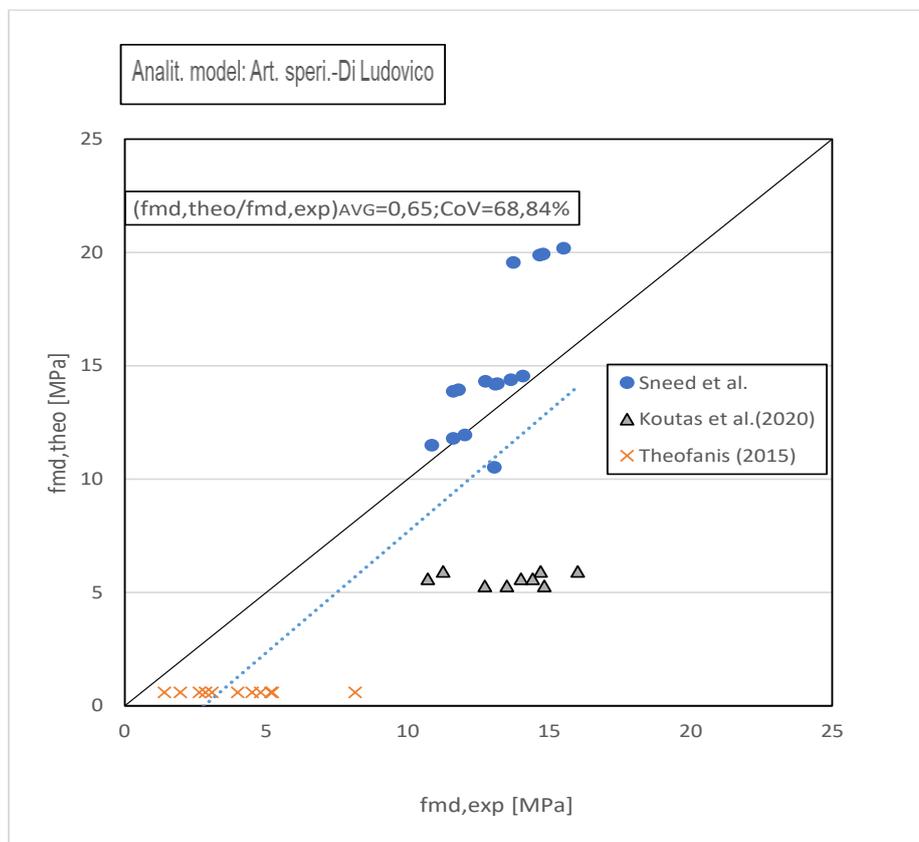


Figura 72_Relazione resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Dal grafico riportato in **Figura 72**, risulta possibile eseguire alcune osservazioni: i punti relativi a *Sneed et al. (2017)* risultano essere al di sopra della retta, mentre il set di dati dell'articolo di *Koutas et al. (2020)* e di *Theofanis et al. (2015)*, risultano essere al di sotto di essa. Questo epilogo è motivato dal fatto che la resistenza confinata risulta essere direttamente proporzionale allo spessore della componente fibrosa del rinforzo: infatti, nel primo articolo citato, si presenta uno spessore di 8 mm, corrispondente al valore di picco registrato nei tre articoli considerati. Da notare, l'unica casistica di sottostima si ha nel primo provino quale mostra un valore di 6700 Mpa, di modulo elastico della fibra, rispetto ai 9 Gpa dei restanti provini dell'articolo citato. Per i due restanti articoli, a conferma della tesi, si presentano provini confinati con fibra con spessore di un ordine inferiore rispetto all'articolo di *Sneed et al. (2017)*.

La distribuzione dei dati risulta essere lineare. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range ristretto tra 0,80 e 1,42. Il valore medio, infatti, risulta essere pari a 0,65 mentre il valore CoV pari a 68,84%. In termini matematici, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che i valori dei vari rapporti tra le due resistenze risultano essere molto variabili rispetto al valore medio.

Infine, come fase ultima dello studio del modello analitico dell'articolo di *Di Ludovico et al. (2010)*, si estraggono degli istogrammi dove si evidenzia la variazione del comportamento del rapporto dei parametri teorici e sperimentali in funzione del singolo provino esaminato. Questo step, viene eseguito in modo singolo per ognuno dei tre articoli.

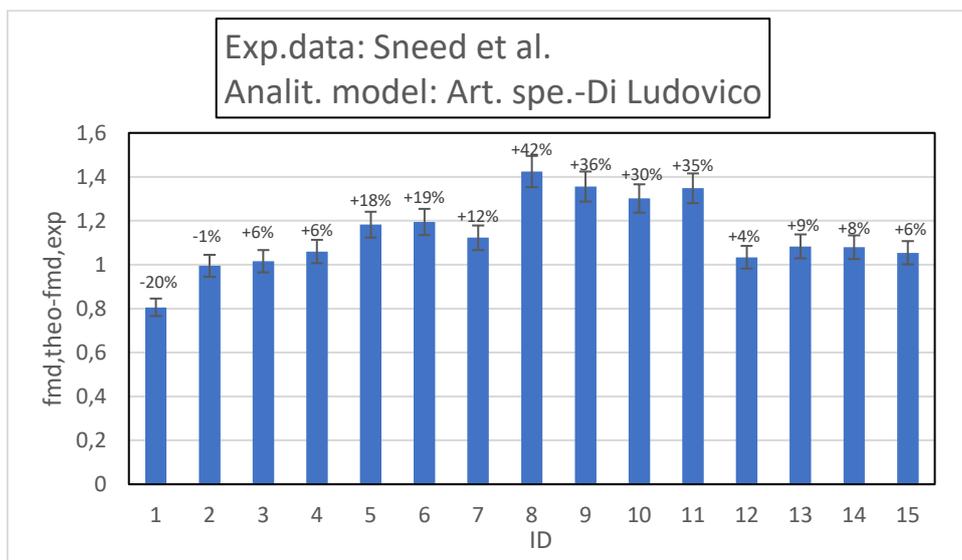


Figura 73_Articolo sperimentale di *Sneed et al. (2017)*: Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

La **Figura 73**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate (sperimentale e teorica) e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -20% e +42%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione della pressione di confinamento e della rigidità della fibra. Infatti, l'eterogeneità del discostamento tra resistenze è direttamente proporzionale alla pressione efficace di confinamento. Da notare, che l'unico caso di sottostima della resistenza da parte del modello, risulta avvenire nel primo provino dove vi è un valore di E_f più basso rispetto agli altri, ossia 6700 Mpa. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 73**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 72** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Sneed et al. (2017)* risultano essere al di sopra della retta di equazione $y=x$, tranne il punto relativo al primo provino testato.

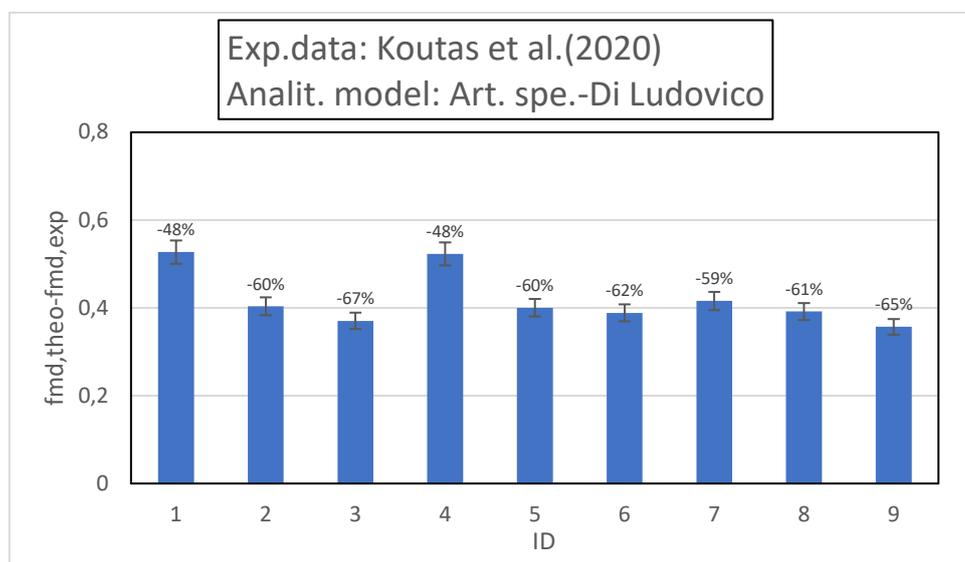


Figura 74_Articolo sperimentale di *Koutas et al. (2020)*: Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

Per la trattazione dell'articolo di *Koutas et al. (2020)*, la **Figura 74**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte dello scarto tra valore sperimentale e teorico relativo alla resistenza a compressione confinata.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -65% e -48%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione della pressione di confinamento e dello spessore della fibra. Difatti, l'entità della resistenza risulta essere direttamente proporzionale ai due parametri citati. Da notare, che tutti i provini testati rientrano nella casistica di sottostima della resistenza da parte del modello. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 76**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 72** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Koutas et al. (2020)* risultano essere al di sotto della retta di equazione $y=x$.

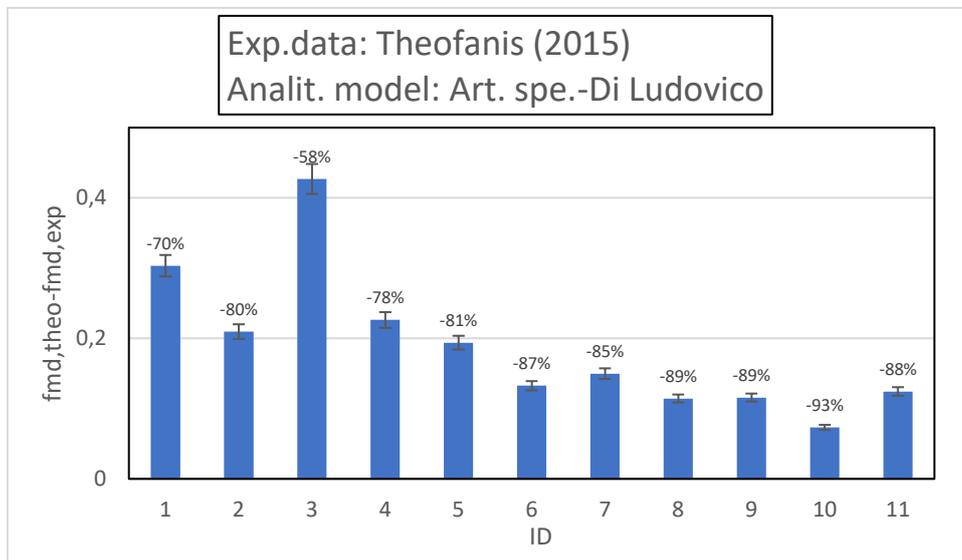


Figura 75_Articolo sperimentale di *Theofanis et al. (2015)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Per l'articolo di *Theofanis et al. (2015)*, la **Figura 75**, presenta un grafico indicante la variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate (sperimentale e teorica) e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -88% e -58%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione della pressione di confinamento, dello spessore della fibra e soprattutto dal valore sperimentale della resistenza confinata. Infatti, i valori teorici risultano essere costanti in quanto vi è stesso valore per pressione di confinamento e di spessore fibra, mentre variano i valori sperimentali. Il modello, in questo caso, tende a sottostimare i valori della resistenza rispetto ai suoi corrispondenti parametri sperimentali. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 75**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 72** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Theofanis et al. (2015)* risultano essere al di sotto della retta di equazione $y=x$.

CIRCOLARE CNR DT200 R1 (2013)

In tale paragrafo, si va a trattare il modello analitico relativo alla *Circolare CNR DT 200 R1*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in muratura mediante *FRP*, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

	#ID	Base [mm]	Altezza [mm]	rc [mm]	fm0,exp	em0,exp	tf [mm]	pf	Ef [Mpa]	ffk[Mpa]	fck[Mpa]	fm0,exp	em0,exp	fmd,exp	emd,exp	fmd,exp/fm0,exp	emc,exp/em0,exp
SNEED ET AL.	1	250	250	0	10,28	/	8	0,128	9000	2700	16	10,28	/	13,0556	/	1,27	/
	2	250	250	0	9,46	/	8	0,128	9000	2700	16	9,46	/	12,0142	/	1,27	/
	3	250	250	0	9,14	/	8	0,128	9000	2700	16	9,14	/	11,6078	/	1,27	/
	4	250	250	0	8,54	/	8	0,128	9000	2700	16	8,54	/	10,8458	/	1,27	/
	5	250	250	9,5	9,21	/	8	0,128	9000	2700	16	9,21	/	11,7888	/	1,28	/
	6	250	250	9,5	9,07	/	8	0,128	9000	2700	16	9,07	/	11,6096	/	1,28	/
	7	250	250	9,5	9,96	/	8	0,128	9000	2700	16	9,96	/	12,7488	/	1,28	/
	8	250	250	38,1	9,74	/	8	0,128	9000	2700	16	9,74	/	13,7334	/	1,41	/
	9	250	250	38,1	10,4	/	8	0,128	9000	2700	16	10,4	/	14,664	/	1,41	/
	10	250	250	38,1	11	/	8	0,128	9000	2700	16	11	/	15,51	/	1,41	/
	11	250	250	38,1	10,48	/	8	0,128	9000	2700	16	10,48	/	14,7768	/	1,41	/
	12	250	250	9,5	10,42	/	8	0,128	9000	2700	16	10,42	/	14,067	/	1,35	/
	13	250	250	9,5	9,7	/	8	0,128	9000	2700	16	9,7	/	13,095	/	1,35	/
	14	250	250	9,5	9,75	/	8	0,128	9000	2700	16	9,75	/	13,1625	/	1,35	/
	15	250	250	9,5	10,11	/	8	0,128	9000	2700	16	10,11	/	13,6485	/	1,35	/
KOUTAS ET AL. (2020)	16	215	215	0	9,97	0,0037	0,095	0,001767	225000	4800	16	9,97	0,0037	11,25	0,0076	1,128385155	2,054054054
	17	215	215	0	9,97	0,0037	0,095	0,001767	225000	4800	16	9,97	0,0037	14,69	0,0105	1,473420261	2,837837838
	18	215	215	0	9,97	0,0037	0,095	0,001767	225000	4800	16	9,97	0,0037	16,01	0,0151	1,605817452	4,081081081
	19	215	215	0	9,97	0,0037	0,062	0,001153	225000	3800	16	9,97	0,0037	10,71	0,007	1,074222668	1,891891892
	20	215	215	0	9,97	0,0037	0,062	0,001153	225000	3800	16	9,97	0,0037	14	0,0112	1,404212638	3,027027027
	21	215	215	0	9,97	0,0037	0,062	0,001153	225000	3800	16	9,97	0,0037	14,41	0,0127	1,445336008	3,432432432
	22	215	215	0	9,97	0,0037	0,044	0,000819	74000	1400	16	9,97	0,0037	12,72	0,0053	1,275827482	1,432432432
	23	215	215	0	9,97	0,0037	0,044	0,000819	74000	1400	16	9,97	0,0037	13,5	0,0075	1,354062187	2,027027027
	24	215	215	0	9,97	0,0037	0,044	0,000819	74000	1400	16	9,97	0,0037	14,82	0,0079	1,486459378	2,135135135
THEOFANIS (2015)	25	240	240	20	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	1,97	0,019	1,655462185	4,871794872
	26	240	240	20	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	2,85	0,018	2,394957983	4,615384615
	27	240	240	20	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	1,4	0,011	1,176470588	2,820512821
	28	240	240	10	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	2,64	0,009	2,218487395	2,307692308
	29	240	240	10	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	3,08	0,012	2,588235294	3,076923077
	30	240	240	10	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	4,5	0,02	3,781512605	5,128205128
	31	240	240	10	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	3,99	0,013	3,352941176	3,333333333
	32	240	240	10	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	5,22	0,024	4,386554622	6,153846154
	33	240	240	10	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	5,16	0,015	4,336134454	3,846153846
	34	240	240	10	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	8,14	/	6,840336134	/
	35	240	240	10	1,19	0,0039	0,044	0,000733	430	7,14	16	1,19	0,0039	4,8	0,013	4,033613445	3,333333333

CARATTERISTICHE DEL RINFORZO-FRP																						
YRd	Ac[mm^2]	fmd,theo	As [mm^2]	fyd[Mpa]	B'[mm]	L' [mm]	efd,rid	KH	Kα	Kv	Keff	fi,eff,[Mp	Yf	Yfd	ηa	nf	Ag [mm^2]	fmd,theo	fmd,theo/fmc,exp	fmd,theo/emc,exp		
1	62500	15,33636573	8000	391,3	250	250	0,004	0,33333	1	1	0,33316269	0,767607	1	1	0,85	1	62500	/	1,174696354	/		
1	62500	14,31051095	8000	391,3	250	250	0,004	0,33333	1	1	0,33316269	0,767607	1	1	0,85	1	62500	/	1,191133072	/		
1	62500	13,90776696	8000	391,3	250	250	0,004	0,33333	1	1	0,33316269	0,767607	1	1	0,85	1	62500	/	1,198139782	/		
1	62500	13,14861954	8000	391,3	250	250	0,004	0,33333	1	1	0,33316269	0,767607	1	1	0,85	1	62500	/	1,212323622	/		
1	62500	14,65099436	8000	391,3	231	231	0,004	0,43082	1	1	0,43059545	0,992092	1	1	0,85	1	53361	/	1,242789288	/		
1	62500	14,46948208	8000	391,3	231	231	0,004	0,43082	1	1	0,43059545	0,992092	1	1	0,85	1	53361	/	1,246337693	/		
1	62500	15,61819786	8000	391,3	231	231	0,004	0,43082	1	1	0,43059545	0,992092	1	1	0,85	1	53361	/	1,225071996	/		
1	62500	16,75830375	8000	391,3	173,8	173,8	0,004	0,6778	1	1	0,67745099	1,560847	1	1	0,85	1	30206,44	/	1,220258912	/		
1	62500	17,65219297	8000	391,3	173,8	173,8	0,004	0,6778	1	1	0,67745099	1,560847	1	1	0,85	1	30206,44	/	1,20377748	/		
1	62500	18,45845759	8000	391,3	173,8	173,8	0,004	0,6778	1	1	0,67745099	1,560847	1	1	0,85	1	30206,44	/	1,190100425	/		
1	62500	17,76003258	8000	391,3	173,8	173,8	0,004	0,6778	1	1	0,67745099	1,560847	1	1	0,85	1	30206,44	/	1,20188624	/		
1	62500	16,20738428	8000	391,3	231	231	0,004	0,43082	1	1	0,43059545	0,992092	1	1	0,85	1	53361	/	1,152156414	/		
1	62500	15,28385752	8000	391,3	231	231	0,004	0,43082	1	1	0,43059545	0,992092	1	1	0,85	1	53361	/	1,167152159	/		
1	62500	15,34823041	8000	391,3	231	231	0,004	0,43082	1	1	0,43059545	0,992092	1	1	0,85	1	53361	/	1,166057391	/		
1	62500	15,81064555	8000	391,3	231	231	0,004	0,43082	1	1	0,43059545	0,992092	1	1	0,85	1	53361	/	1,15841635	/		
1	46225	14,08263386	81,7	391,3	215	215	0,0079	0,33333	1	1	0,33333059	0,5236	1	1	0,85	1	46225	/	1,251789677	/		
1	46225	14,08263386	81,7	391,3	215	215	0,0079	0,33333	1	1	0,33333059	0,5236	1	1	0,85	1	46225	/	0,958654449	/		
1	46225	14,08263386	81,7	391,3	215	215	0,0079	0,33333	1	1	0,33333059	0,5236	1	1	0,85	1	46225	/	0,879614857	/		
1	46225	13,29242135	53,32	391,3	215	215	0,0079	0,33333	1	1	0,33333154	0,341719	1	1	0,85	1	46225	/	1,241122442	/		
1	46225	13,29242135	53,32	391,3	215	215	0,0079	0,33333	1	1	0,33333154	0,341719	1	1	0,85	1	46225	/	0,949458668	/		
1	46225	13,29242135	53,32	391,3	215	215	0,0079	0,33333	1	1	0,33333154	0,341719	1	1	0,85	1	46225	/	0,92244423	/		
1	46225	12,29675492	37,84	391,3	215	215	0,0166	0,33333	1	1	0,33333206	0,167595	1	1	0,85	1	46225	/	0,966726015	/		
1	46225	12,29675492	37,84	391,3	215	215	0,0166	0,33333	1	1	0,33333206	0,167595	1	1	0,85	1	46225	/	0,910870734	/		
1	46225	12,29675492	37,84	391,3	215	215	0,0166	0,33333	1	1	0,33333206	0,167595	1	1	0,85	1	46225	/	0,829740548	/		
1	57600	1,263615867	42,24	393,3	200	200	0,0166	0,53704	1	1	0,5370354	0,001406	1	1	0,85	1	40000	/	0,641429374	/		
1	57600	1,263615867	42,24	394,3	200	200	0,0166	0,53704	1	1	0,5370354	0,001406	1	1	0,85	1	40000	/	0,443373988	/		
1	57600	1,263615867	42,24	395,3	200	200	0,0166	0,53704	1	1	0,5370354	0,001406	1	1	0,85	1	40000	/	0,902582762	/		
1	57600	1,25661994	42,24	396,3	220	220	0,0166	0,43981	1	1	0,43981347	0,001151	1	1	0,85	1	48400	/	0,475992401	/		
1	57600	1,25661994	42,24	397,3	220	220	0,0166	0,43981	1	1	0,43981347	0,001151	1	1	0,85	1	48400	/	0,407993487	/		
1	57600	1,25661994	42,24	398,3	220	220	0,0166	0,43981	1	1	0,43981347	0,001151	1	1	0,85	1	48400	/	0,279248876	/		
1	57600	1,25661994	42,24	400,3	220	220	0,0166	0,43981	1	1	0,43981347	0,001151	1	1	0,85	1	48400	/	0,314942341	/		
1	57600	1,25661994	42,24	401,3	220	220	0,0166	0,43981	1	1	0,43981347	0,001151	1	1	0,85	1	48400	/	0,240731789	/		
1	57600	1,25661994	42,24	402,3	220	220	0,0166	0,43981	1	1	0,43981347	0,001151	1	1	0,85	1	48400	/	0,243530996	/		
1	57600	1,25661994	42,24	403,3	220	220	0,0166	0,43981	1	1	0,43981347	0,001151	1	1	0,85	1	48400	/	0,154375914	/		
1	57600	1,25661994	42,24	404,3	220	220	0,0166	0,43981	1	1	0,43981347	0,001151	1	1	0,85	1	48400	/	0,261795821	/		

Tabella 27_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante Circolare CNR DT200 R1-2013

Come ben visibile in **Tabella 27**, sono stati riportati i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione a provino già confinato. Questo aspetto risulta essere molto importante in quanto rende immediata una possibile comparazione con i vari ottenuti per via teorica attraverso il modello analitico relativo alla *Circolare CNR DT200 R1-2013*. Avendo questi dati a disposizione, si va ad estrarre il primo grafico dove si va ad evidenziare la relazione tra resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

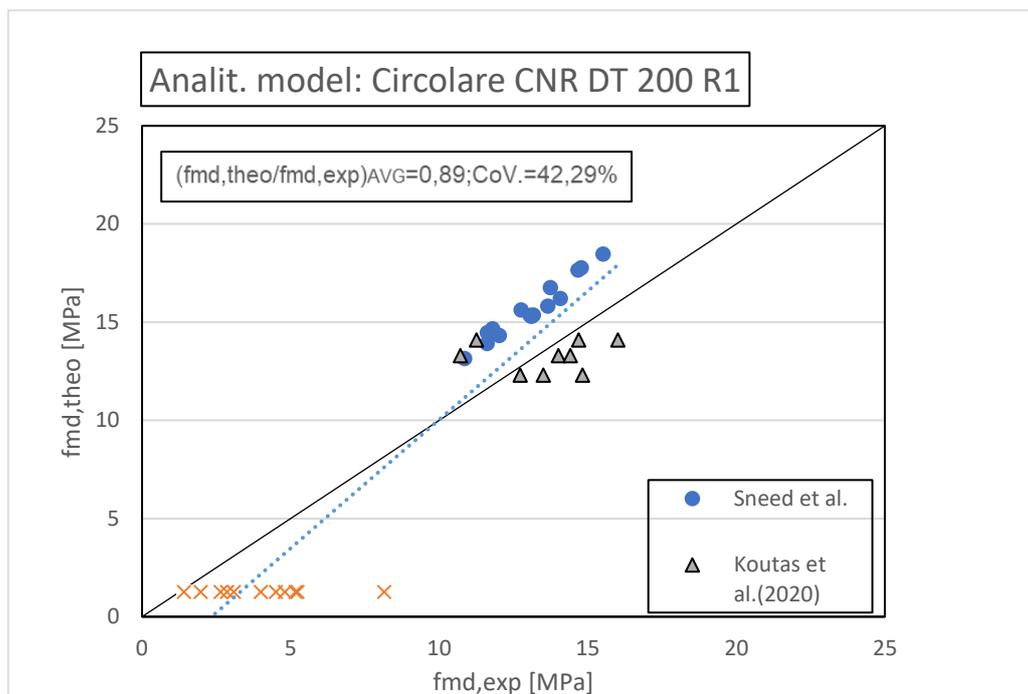


Figura 76_Relazione resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Il grafico riportato in **Figura 76**, è possibile eseguire delle importanti osservazioni: il modello, per *Sneed et al. (2017)*, tende ad effettuare una sovrastima e questo è dovuto alla diretta proporzionalità della resistenza cilindrica confinata con lo spessore della fibra rinforzante. Infatti, in questo articolo, si ha l'applicazione del valore massimo dello spessore della fibra, ossia 8 mm.

Invece, per *Theofanis et al. (2015)*, si registra una sottostima e ciò è dovuto al fatto che sono presenti valori minimi di modulo elastico e dello spessore della fibra rinforzante.

Infine, il set di dati associati a *Koutas et al. (2020)*, si ha una sottostima da parte del modello e ciò risulta essere conseguenza di valori minimi di spessore della fibra.

La distribuzione dei dati risulta essere lineare. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range ristretto tra 0,15 e 1,25. Il valore medio, infatti, risulta essere pari a 0,89 mentre il valore CoV pari a 42,29%. In termini matematici, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che i valori dei vari rapporti tra le due resistenze risultano essere molto variabili rispetto al valore medio.

Infine, come fase ultima dello studio degli articoli sperimentali in esame attraverso il modello della *Circolare CNR DT200 R1-2013*, andiamo a stilare degli istogrammi dove si evidenzia la variazione del comportamento del rapporto dei parametri teorici e sperimentali in funzione del singolo provino esaminato. Questo step, viene eseguito in modo singolo per ognuno dei tre articoli.

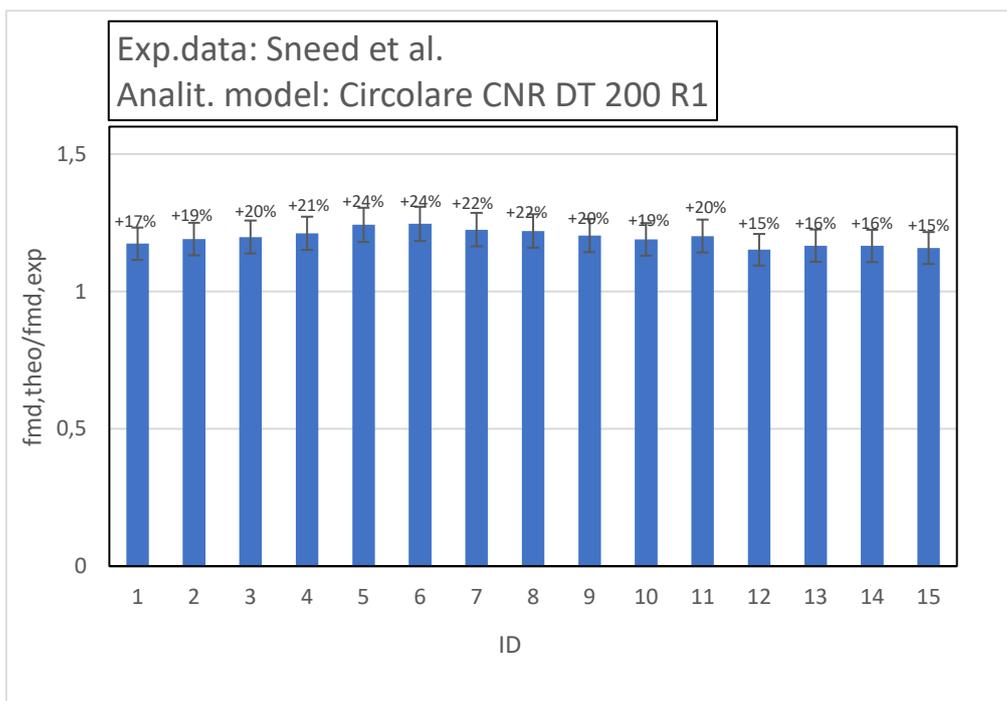


Figura 77_Articolo sperimentale di *Sneed et al. (2017)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 77**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate (sperimentale e teorica) e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati. L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso +15% e +24%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione della pressione di confinamento e dal valore del modulo elastico della fibra. Infatti, il discostamento delle resistenze ottenute risulta essere direttamente proporzionale alla pressione efficace di confinamento. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 77**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 76** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Sneed et al. (2017)* risultano essere al di sopra della retta di equazione $y=x$.

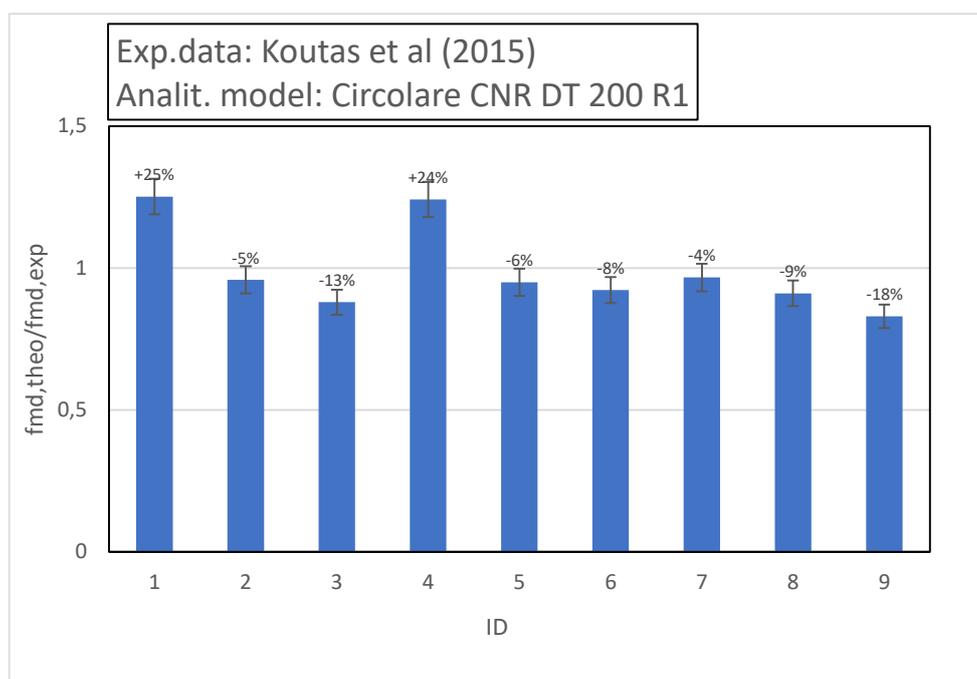


Figura 78_Articolo sperimentale di *Koutas et al. (2020)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Per la trattazione dell'articolo di *Koutas et al. (2020)*, la **Figura 78** presenta un grafico quale indica lo sviluppo dello scarto tra valore teorico e sperimentale relativo alla resistenza a compressione confinata. L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -18% e +25%. La variabilità dei valori risulta essere in funzione della pressione di confinamento e dello spessore della fibra. Infatti, la variazione dei valori incrementali della resistenza risulta essere direttamente proporzionale ai due parametri citati. Da notare, che tutti i provini testati rientrano nella casistica di sottostima della resistenza da parte del modello, tranne i provini n.1 e n.4 dove si presentano valori di spessore della fibra rispettivamente pari a 0,092 mm e 0,065mm. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 78**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 76** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Koutas et al. (2020)* risultano essere al di sotto della retta di equazione $y=x$, tranne i punti relativi ai provini n.1 e n.4.

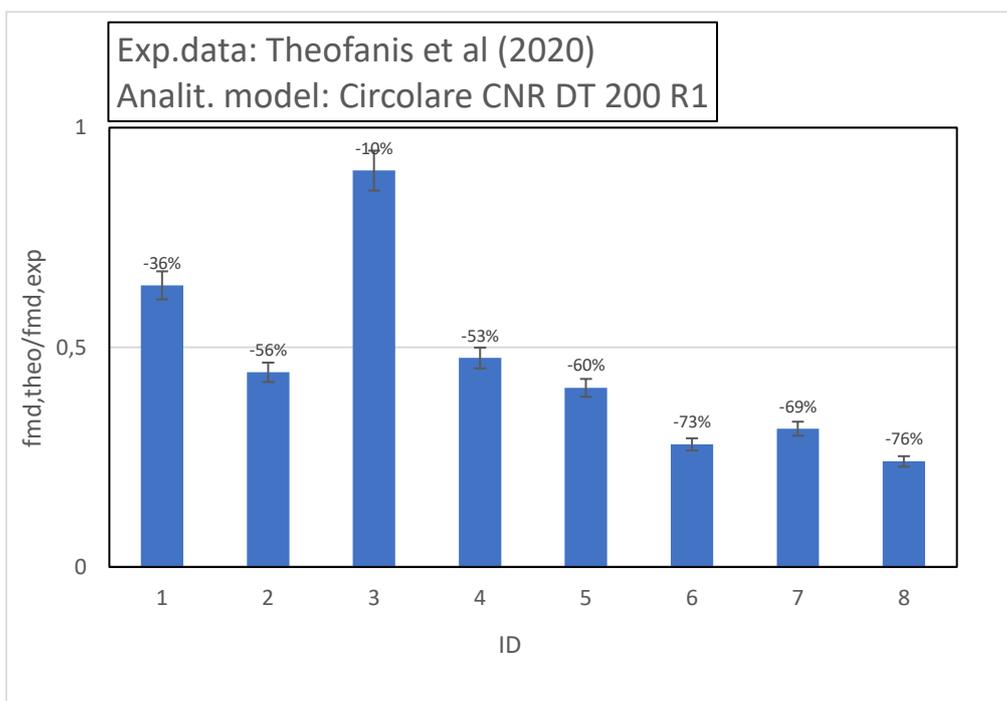


Figura 79_Articolo sperimentale di *Theofanis et al. (2015)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 79**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate (sperimentale e teorica) e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati.

L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -76% e -10%. Lo sviluppo dei risultati ottenuti è in funzione della pressione di confinamento, dello spessore della fibra e soprattutto dal valore sperimentale della resistenza confinata. Infatti, i valori teorici risultano essere costanti in quanto vi è stesso valore per pressione di confinamento e di spessore fibra, mentre variano i valori sperimentali. Il modello, in questo caso, tende a sottostimare i valori della resistenza rispetto ai suoi corrispondenti parametri sperimentali. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 79**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 76** nel quale i punti individuati per l'articolo di *Theofanis et al. (2015)* risultano essere al di sotto della retta di equazione $y=x$.

4.2 CONFRONTO TEORICO-SPERIMENTALE PER CAMPIONI CONFINATI CON FRCM

Nel seguente paragrafo, viene discussa la metodologia di confinamento mediante l'uso di *FRCM*, eseguendo una comparazione dei modelli scelti e determinandone il più consono per la tale casistica di rinforzo.

Per rendere possibile ciò, sono stati adottati parametri iniziali delle prove sperimentali trattate negli articoli di riferimento ed inseriti all'interno dei singoli modelli analitici, ottenendo i valori di resistenza cilindrica e di deformazione ultima.

Di seguito, verranno trattati le casistiche di confinamento delle colonne in calcestruzzo e in muratura, mediante uso di *FRCM*.

4.2.a VALIDAZIONE SU COLONNE IN CALCESTRUZZO

Il seguente paragrafo, va a concentrarsi sulla metodologia di confinamento delle colonne il calcestruzzo, quale vede l'uso di *FRCM*.

Presa visione dei seguenti dati, vengono considerati diversi modelli analitici che vanno a trattare il confinamento delle colonne in calcestruzzo mediante *FRCM*:

- *NORMATIVA ACI 549-4R (2013)*;
- *ARTICOLO SPERIMENTALE DI COLAJANNI ET AL. (2014)*;
- *CIRCOLARE CNR DT 215-2018*.

Attraverso la determinazione e comparazione delle risposte da parte dei modelli analitici, si procederà all'individuazione di quello più attendibile per la previsione dei valori relativi alla resistenza a compressione e della deformazione ultima a provino confinato.

NORMATIVA ACI-4R (2013)

In tale paragrafo, si va a trattare il modello analitico relativo alla *Normativa ACI 549-4R (2013)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in calcestruzzo mediante *FRCM*, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

	# ID	rc [mm]	Base [mm]	Altezza [mm]	H colonna[mm]	Diametro [mm]	Ac [mm^2]	fck [Mpa]	εc0,exp	Ym	fc0_exp [Mpa]	fcc_exp[Mpa]	εcc,exp	fcc_exp/fc0_exp	εcc,exp/εc0,exp
TRAPKO	1	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002461	1	22,6	32,48	0,006184	1,437168142	2,512799675
	2	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002461	1	22,6	32,66	0,006983	1,445132743	2,837464445
	3	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002461	1	22,6	42,48	0,012118	1,879646018	4,924014628
	4	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002461	1	22,6	42,96	0,011362	1,900884956	4,61682243
	5	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002461	1	22,6	58,07	0,018107	2,569469027	7,35757822
	6	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002461	1	22,6	55,8	0,017048	2,469026549	6,927265339
	7	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002302	1	22,6	37,32	0,003573	1,651327434	1,552128584
	8	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002302	1	22,6	36,45	0,003593	1,612831858	1,560816681
	9	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002211	1	22,6	33,36	0,003537	1,476106195	1,59972863
	10	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002211	1	22,6	33,13	0,003473	1,465929204	1,570782451
	11	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002566	1	22,6	34,71	0,003575	1,535840708	1,393219018
	12	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	22,6	0,002566	1	22,6	34,34	0,003518	1,519469027	1,371005456
	13	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	18,26	0,002134	1	18,26	40,85	0,005123	2,23713034	2,400656045
	14	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	18,26	0,002134	1	18,26	36,64	0,005377	2,006571742	2,51968135
	15	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	18,26	0,002134	1	18,26	39,43	0,005117	2,159364732	2,397844424
	16	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	18,26	0,002134	1	18,26	39,78	0,00469	2,178532311	2,197750703
	17	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	18,26	0,002134	1	18,26	37,34	0,004671	2,0449069	2,188847235
	18	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	18,26	0,002134	1	18,26	32,39	0,004601	1,773822563	2,156044986
	19	56,5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,67	18,26	0,002134	1	18,26	32,57	0,004673	1,783680175	2,189784442
COLAJANNI ET AL.	20	77	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	25,2	0,00133	1	24,2	30,6	0,0116	1,26446281	8,721804511
	21	77	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	26,2	0,00133	1	24,2	31,3	0,00682	1,29338843	5,127819549
	22	77	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	27,2	0,00133	1	24,2	31,8	0,0031	1,314049587	2,330827068
	23	77	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	28,2	0,00133	1	24,2	33,8	0,00963	1,396694215	7,240601504
	24	77	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	29,2	0,00133	1	24,2	36,2	0,0114	1,495867769	8,571428571
	25	77	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	30,2	0,00133	1	24,2	39,7	0,0148	1,640495868	11,12781955
DONNINI ET AL.	26	70	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	11,4	0,000359	1	11,4	21,45	0,001271	1,881578947	3,540389972
	27	70	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	11,4	0,000359	1	11,4	20,87	0,001259	1,830701754	3,506963788
	28	70	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	11,4	0,000359	1	11,4	13,32	0,000566	1,168421053	1,576601671
	29	70	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	11,4	0,000359	1	11,4	13,98	0,00055	1,226315789	1,532033426
	30	70	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	11,4	0,000359	1	11,4	18,14	0,001117	1,59122807	3,111420613
	31	70	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	11,4	0,000359	1	11,4	17,27	0,001062	1,514912281	2,95821727
	32	70	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	11,4	0,000359	1	11,4	13,85	0,000488	1,214912281	1,359331476
	33	70	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	11,4	0,000359	1	11,4	13,46	0,000481	1,180701754	1,339832869

CARATTERISTICHE DEL RINFORZO-FRCM													
ffd	efd	Ef [MPa]	tf [mm]	Af [mm ²]	sfe	ffe [Mpa]	n	ka	fl [Mpa]	fcc,the [Mpa]	ecc,the	fcc,the/fcc,exp	ecc,the/ecc,exp
5270	0,019518519	270000	0,0455	0,006916	0,012	3240	1	1	0,396598938	23,82945671	0,004748725	0,733665539	0,76790503
5270	0,019518519	270000	0,0455	0,006916	0,012	3240	1	1	0,396598938	23,82945671	0,004748725	0,729622067	0,680040771
5270	0,019518519	270000	0,091	0,013832	0,012	3240	2	1	1,586395752	27,51782683	0,007920399	0,647783118	0,653606108
5270	0,019518519	270000	0,091	0,013832	0,012	3240	2	1	1,586395752	27,51782683	0,007920399	0,640545317	0,697095477
5270	0,019518519	270000	0,1365	0,020748	0,012	3240	3	1	3,569390442	33,66511037	0,013206522	0,579733259	0,729360044
5270	0,019518519	270000	0,1365	0,020748	0,012	3240	3	1	3,569390442	33,66511037	0,013206522	0,60331739	0,774666959
5270	0,019518519	270000	0,0455	0,006916	0,012	3240	1	1	0,396598938	23,82945671	0,004472093	0,638517061	1,251635335
5270	0,019518519	270000	0,0455	0,006916	0,012	3240	1	1	0,396598938	23,82945671	0,004472093	0,653757386	1,244668258
5270	0,019518519	270000	0,0455	0,006916	0,012	3240	1	1	0,396598938	23,82945671	0,004313235	0,714312251	1,219461417
5270	0,019518519	270000	0,0455	0,006916	0,012	3240	1	1	0,396598938	23,82945671	0,004313235	0,719271256	1,241933496
5270	0,019518519	270000	0,0455	0,006916	0,012	3240	1	1	0,396598938	23,82945671	0,0049308	0,686530012	1,379244822
5270	0,019518519	270000	0,0455	0,006916	0,012	3240	1	1	0,396598938	23,82945671	0,0049308	0,693927103	1,401591882
5270	0,019518519	270000	0,091	0,013832	0,012	3240	2	1	1,586395752	23,17782683	0,008040277	0,567388662	1,569447044
5270	0,019518519	270000	0,091	0,013832	0,012	3240	2	1	1,586395752	23,17782683	0,008040277	0,63258261	1,495309132
5270	0,019518519	270000	0,091	0,013832	0,012	3240	2	1	1,586395752	23,17782683	0,008040277	0,587822136	1,571287318
5270	0,019518519	270000	0,091	0,013832	0,012	3240	2	1	1,586395752	23,17782683	0,008040277	0,582650247	1,71434482
5270	0,019518519	270000	0,091	0,013832	0,012	3240	2	1	1,586395752	23,17782683	0,008040277	0,620723804	1,721318177
5270	0,019518519	270000	0,091	0,013832	0,012	3240	2	1	1,586395752	23,17782683	0,008040277	0,715585886	1,747506456
5270	0,019518519	270000	0,091	0,013832	0,012	3240	2	1	1,586395752	23,17782683	0,008040277	0,711631158	1,720581469
5800	0,021481481	270000	0,045	0,00684	0,012	3240	2	1	0,575625974	25,98444052	0,003016542	0,849164723	0,260046724
5800	0,021481481	270000	0,045	0,00684	0,012	3240	2	1	0,575625974	25,98444052	0,003016542	0,830173819	0,442308211
5800	0,021481481	270000	0,045	0,00684	0,012	3240	2	1	0,575625974	25,98444052	0,003016542	0,817120771	0,973078064
5800	0,021481481	270000	0,045	0,00684	0,012	3240	3	1	0,863438961	26,87666078	0,003527313	0,795167479	0,3662838
5800	0,021481481	270000	0,045	0,00684	0,012	3240	3	1	0,863438961	26,87666078	0,003527313	0,742449193	0,309413421
5800	0,021481481	270000	0,045	0,00684	0,012	3240	3	1	0,863438961	26,87666078	0,003527313	0,676993974	0,238331959
264	0,000977778	270000	0,046	0,006992	0,00098	264	1	1	0,026369829	11,48174647	0,000554142	0,535279556	0,435989026
264	0,000977778	270000	0,046	0,006992	0,00098	264	1	1	0,026369829	11,48174647	0,000554142	0,550155557	0,4401446
846	0,010708861	79000	0,048	0,007296	0,01071	846	1	1	0,088177371	11,67334985	0,000692075	0,876377616	1,222746999
846	0,010708861	79000	0,048	0,007296	0,01071	846	1	1	0,088177371	11,67334985	0,000692075	0,835003566	1,258317821
1542	0,019275	80000	0,046	0,006992	0,012	960	1	1	0,095890286	11,69725989	0,000714286	0,644832408	0,639468302
1542	0,019275	80000	0,046	0,006992	0,012	960	1	1	0,095890286	11,69725989	0,000714286	0,677316728	0,672585775
975	0,007386364	132000	0,048	0,007296	0,00739	975	1	1	0,101622857	11,71503086	0,000688249	0,845850603	1,410346043
975	0,007386364	132000	0,048	0,007296	0,00739	975	1	1	0,101622857	11,71503086	0,000688249	0,870358905	1,430870829

Tabella 28_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante ACI 549-4R 2013

Come ben visibile in **Tabella 28**, sono stati riportati anche i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione ultima a provino già confinato. Questo risulta essere un fattore fondamentale, in quanto rende immediata una possibile comparazione tra valori sperimentali e teorici relativi ai parametri meccanici di nostro interesse. Infatti, seguendo questo filo logico, si va ad estrarre il primo grafico dove si va ad evidenziare la relazione tra resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

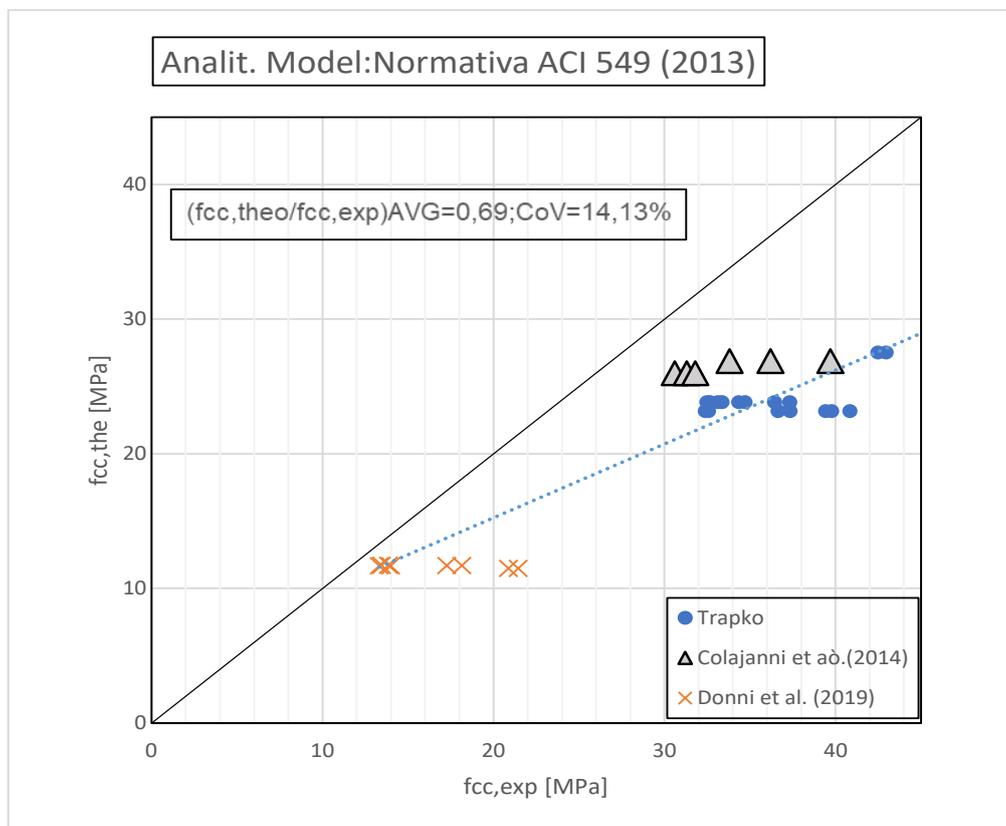


Figura 80 _Relazione resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Il grafico riportato in **Figura 80**, è stato eseguito andando a considerare i valori teorici e sperimentali di tutti e tre gli articoli di riferimento. Prendendo in riferimento la retta di equazione $y=x$, che sancisce rapporto unitario tra valore teorico e sperimentale della resistenza cilindrica di uno stesso provino, risulta essere ben evidente che tutti i punti ottenuti sono al di sotto di tale retta. Quindi, nella trattazione della *Normativa ACI 549-4R*, il modello tende a sottostimare la resistenza cilindrica e quindi risulta essere cautelativo. Tali risultati sono conseguenza dell'uso di un piccolo spessore della fibra, quale risulta essere direttamente proporzionale alla resistenza a compressione confinata.

La distribuzione dei dati risulta essere lineare. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range ristretto tra 0,65 e 0,75. Il valore medio, infatti, risulta essere pari a 0,69, mentre il valore CoV pari a 14,13%. In termini matematici, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che i valori dei vari rapporti tra le due resistenze risultano essere poco devianti rispetto al valore medio.

Analoga analisi, viene eseguita in termini di deformazione, dove si evidenzia la relazione tra la deformazione ottenuta per via teorica e quella ottenuta per via sperimentale.

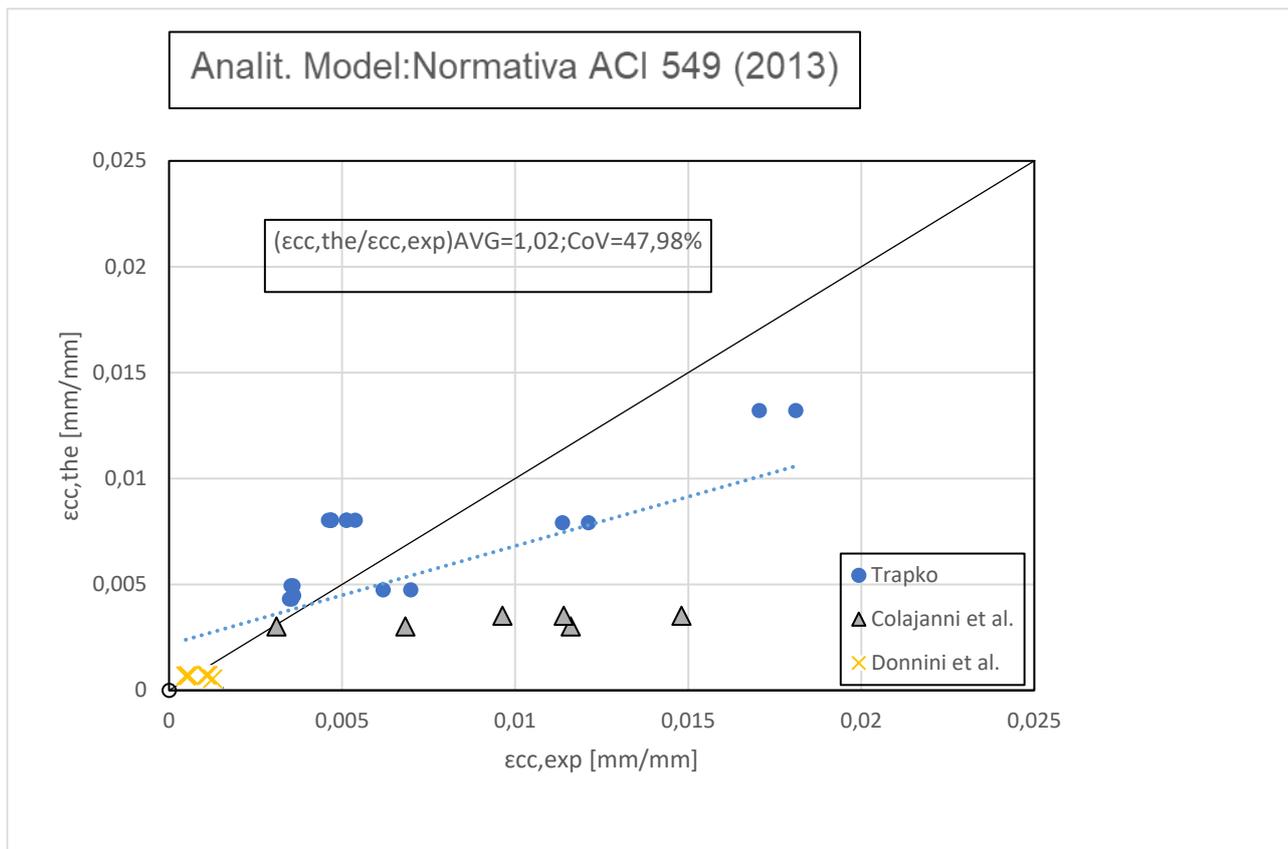


Figura 81_Relazione Deformazione confinata teorica- Deformazione confinata sperimentale

Il grafico riportato in **Figura 81**, è stato eseguito andando a considerare i valori teorici e sperimentali di tutti e tre gli articoli di riferimento. Prendendo in riferimento la retta di equazione $y=x$, che sancisce rapporto unitario tra valore teorico e sperimentale della deformazione di uno stesso provino, risulta essere ben evidente che tutti i punti, ottenuti dagli articoli sperimentali di *Colajanni et al.* e *Donnini et al.*, risultano essere in corrispondenza o al di sotto della retta stessa. Invece, per i punti ottenuti dall' articolo di *T.Trapko et al. (2014)*, vi è una distribuzione equa. Ciò, è motivato dal fatto che si ha presenta una diretta proporzionalità, della deformazione ultima, nei confronti del modulo elastico, dello spessore e del numero di strati della fibra rinforzante: infatti, i primi due articoli citati, presentano dei valori minimi di spessore fibroso, ossia 0,0455mm, di modulo elastico pari a 79 GPa e un solo strato di rinforzo. Conferma di tale conclusione, risulta essere la sottostima dei provini confinati in *T.Trapko et al. (2014)*, quali presentano questi requisiti minimi.

Come risulta essere ben visibile dalla linea di tendenza in **Figura 81**, la distribuzione dei dati risulta essere lineare. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range molto ampio, ossia tra 0,39 e 1,20. Per quanto riguarda il valore medio, invece, si può asserire che tale risulta essere pari a 1,02 e un valore CoV pari a 47,98 %. Nonostante il valore sia aumentato rispetto al CoV relativo alle resistenze cilindriche, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che la variabilità dei valori dei rapporti tra le due deformazioni, risulta essere molto contenuta rispetto al valore medio.

Infine, come fase ultima dello studio del modello analitico della Normativa ACI 549, andiamo a stilare degli istogrammi dove si evidenzia la variazione del comportamento del rapporto dei parametri teorici e sperimentali in funzione del singolo provino esaminato.

Questo step, viene eseguito in modo singolo per ognuno dei tre articoli.

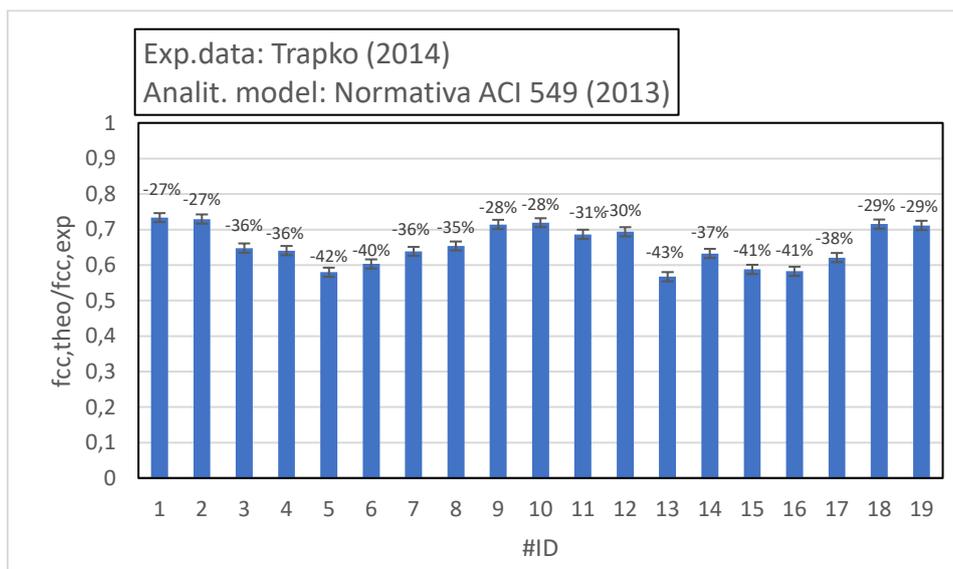


Figura 82_Articolo sperimentale di *T.Trapko et al. (2014)*: Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

Per la trattazione dell'articolo di *Trapko et al. (2014)*, la **Figura 82** presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate (sperimentale e teorica) e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati.

Il seguente istogramma, tende ad evidenziare la presenza di rapporti tra le due resistenze che risultano essere al di sotto dell'unità. L'intervallo di oscillazione dei valori di scarto rispetto all'unità, risulta essere compreso -42% e -27%. Da osservare, che per valori negativi di discostamento si ha una situazione di sottostima della resistenza e quindi comportamento più cautelativo del modello. Le resistenze ottenute, sono legate allo spessore e numero di strati del rinforzo. Infatti, bassi valori di incremento si hanno con un solo strato di rinforzo applicato e valore minimo di spessore, mentre si hanno elevati incrementi per un numero strati e spessore maggiori. Inoltre, come verifica di attendibilità dell'istogramma in **Figura 82**, è possibile eseguire un confronto con il grafico riportato in **Figura 80** nel quale i punti individuati per l'articolo di *T.Trapko et al. (2014)* risultano essere al di sotto della retta di equazione $y=x$.

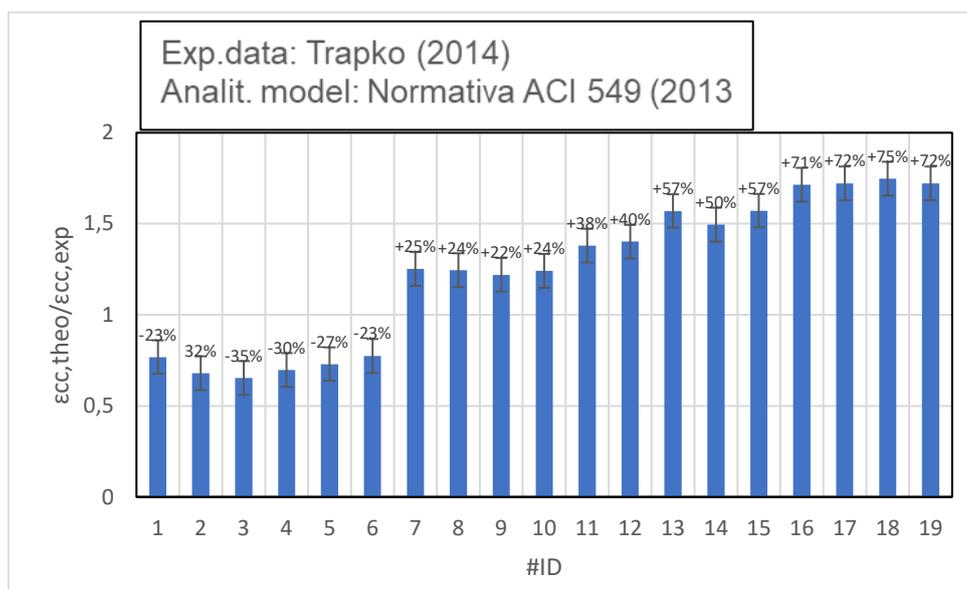


Figura 83_ *T.Trapko et al. (2014)*: Rapporto Deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale

Il grafico in **Figura 83**, invece, va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due deformazioni di provini già confinati e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati.

È possibile notare, invece, che adesso il range di variazione dello scarto risulta essere compreso tra il -35% e +75%. Questo va a confermare la distribuzione equa raffigurata nel grafico in **Figura 81**. La variabilità dei valori risulta essere molto in funzione dello spessore e numero di strati del materiale di confinamento. Al contrario della situazione presente con il rapporto tra resistenze, a bassi valori di scarto corrispondono più strati di materiale di confinamento e valore di spessore diverso da quello minimo, mentre a grandi valori di scarto corrispondono valori minimi in termini di numero strati e spessore.

Passando, invece, agli istogrammi relativi all'articolo di *Colajanni et al. (2014)*:

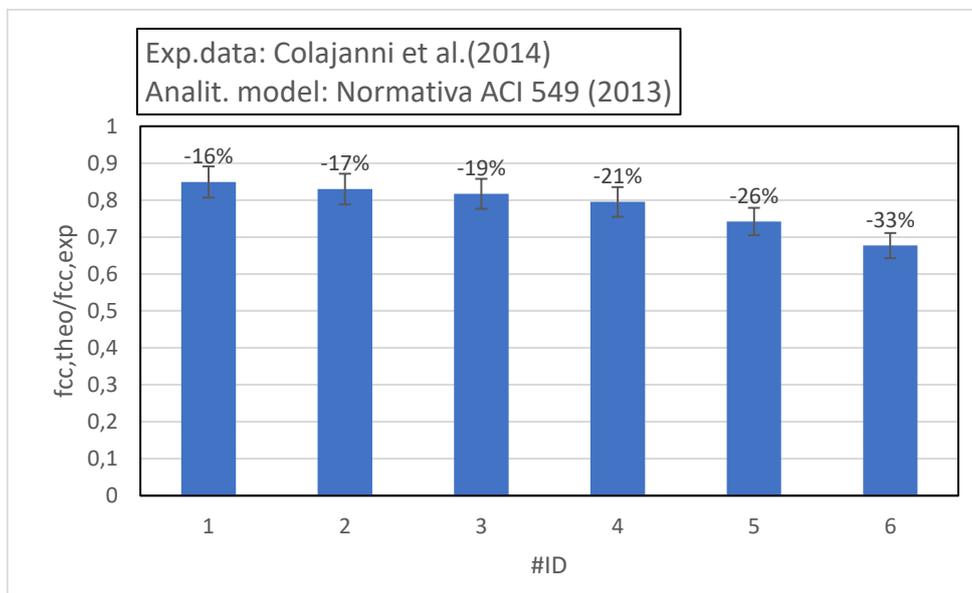


Figura 84_Articolo sperimentale di *P.Colajanni et al.* : *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 84**, presenta dei valori di scarto dei rapporti tra le resistenze cilindriche confinate, rispetto al valore unitario, che risultano essere tutti negativi e quindi il modello analitico in questione va a sottovalutare la resistenza cilindrica del provino confinato rispetto al valore di riferimento sperimentale. Questo risulta essere ben visibile, per via grafica, anche attraverso il grafico mostrato in **Figura 80**, dove i punti individuati sono tutti al di sotto della retta di equazione $y=x$ di riferimento. I valori di oscillazione vanno ad essere racchiusi in un intervallo limitato, ossia tra -33% e -16%.

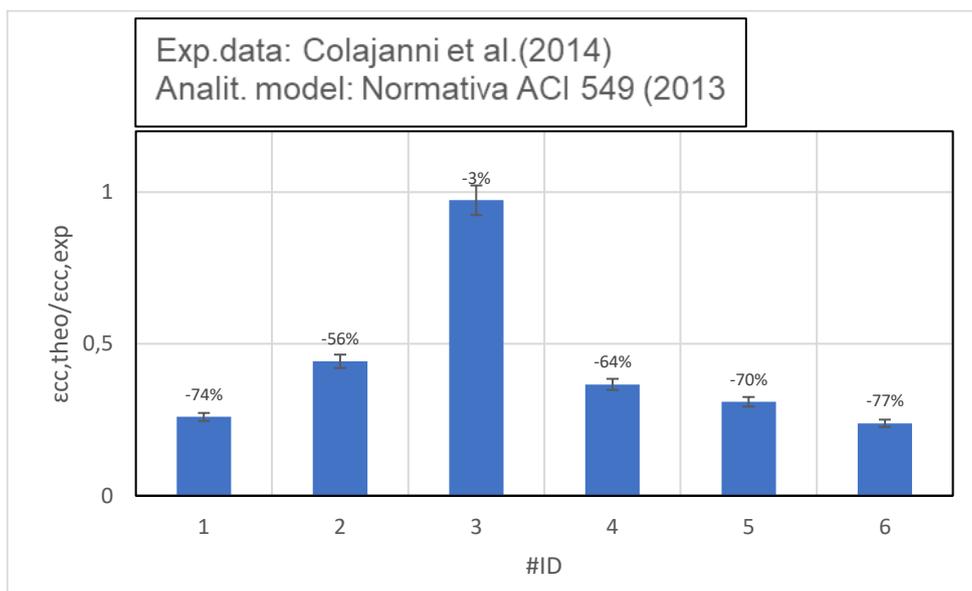


Figura 85_Articolo sperimentale di *P.Colajanni et al.* : *Rapporto deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale*

Analoga analisi viene eseguita in termini deformativi, come riportato nell'istogramma riportato in **Figura 85**, dove il modello tende a fornire dei valori più piccoli rispetto ai valori sperimentali e ciò è testimoniato da valori negativi degli scarti rispetto al valore fornito dall'articolo di riferimento. Questo risulta essere ben visibile, per via grafica, anche attraverso il grafico mostrato in **Figura 81**, dove i punti individuati sono tutti al di sotto della retta di equazione $y=x$ di riferimento. I valori di oscillazione vanno ad essere racchiusi in un intervallo limitato, ossia tra -77% e -3%.

Passando, infine, agli istogrammi relativi all'articolo di Donnini et al.:

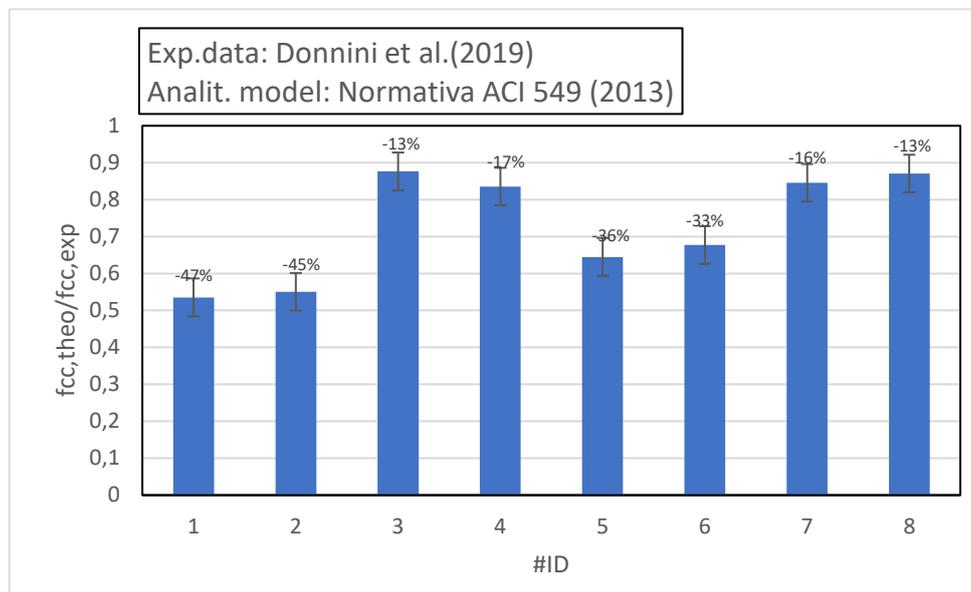


Figura 86_Articolo sperimentale di *Donnini et al.*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 86**, presenta dei valori di scarto negativi e quindi il modello analitico va a sottovalutare la resistenza cilindrica del provino confinato rispetto al valore di riferimento sperimentale. Questo risulta essere ben visibile, per via grafica, anche attraverso il grafico mostrato in **Figura 80**, dove i punti individuati sono tutti al di sotto della retta di equazione $y=x$ di riferimento. I valori di oscillazione vanno ad essere racchiusi in un intervallo limitato, ossia tra -47% e -13%.

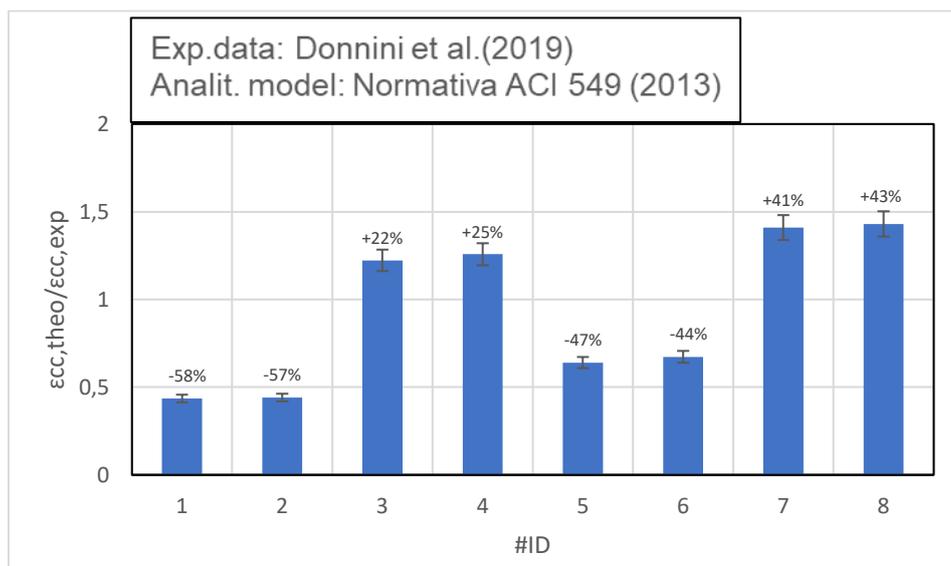


Figura 87_Articolo sperimentale di *Donnini et al.*: *Rapporto deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 87**, presenta dei valori di scarto dei rapporti tra le deformazioni confinate, rispetto al valore unitario, che risulta essere equamente distribuiti al di sopra e al di sotto del valore unitario. Da

evidenziare è l'aspetto che il picco minimo di scarto si registra in corrispondenza di un valore di modulo elastico della fibra pari a 270000 Mpa e quindi il modello risulta essere più cautelativo per valori elevati di modulo elastico della fibra. Questo risulta essere ben visibile, per via grafica, anche attraverso il grafico mostrato in **Figura 81**, dove i punti individuati sono sia al di sotto che al di sopra della retta di equazione $y=x$ di riferimento. I valori di oscillazione vanno ad essere racchiusi in un intervallo limitato, ossia tra -58% e +43%.

COLAJANNI ET AL. (2014)

In tale paragrafo, si va a trattare il modello analitico relativo all'articolo di *Colajanni et al. (2014)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in calcestruzzo mediante *FRCM*, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

	#ID	Diametro [mm]	Altezza [mm]	Ac [mm^2]	fc0,exp [Mpa]	ec0,exp	fcu,exp [Mpa]	ecu,exp	Ec [Mpa]	fcc,exp[Mpa]	ecc,exp	fcc,exp/fc0,exp	ecc,exp/ec0,exp
TRAPKO (2014)	1	113	300	10023,665	22,6	0,002461	22,6	0,002461	9183,25884	32,48	0,006184	1,437168142	2,512799675
	2	113	300	10023,665	22,6	0,002461	22,6	0,002461	9183,25884	32,66	0,006983	1,445132743	2,837464445
	3	113	300	10023,665	22,6	0,002461	22,6	0,002461	9183,25884	42,48	0,012118	1,879646018	4,924014628
	4	113	300	10023,665	22,6	0,002461	22,6	0,002461	9183,25884	42,96	0,011362	1,900884956	4,61682243
	5	113	300	10023,665	22,6	0,002461	22,6	0,002461	9183,25884	58,07	0,018107	2,569469027	7,35757822
	6	113	300	10023,665	22,6	0,002461	22,6	0,002461	9183,25884	55,8	0,017048	2,469026549	6,927265339
	7	113	300	10023,665	22,6	0,002302	22,6	0,002302	9817,54996	37,32	0,003573	1,651327434	1,552128584
	8	113	300	10023,665	22,6	0,002302	22,6	0,002302	9817,54996	36,45	0,003593	1,612831858	1,560816681
	9	113	300	10023,665	22,6	0,002211	22,6	0,002211	10221,6192	33,36	0,003537	1,476106195	1,59972863
	10	113	300	10023,665	22,6	0,002211	22,6	0,002211	10221,6192	33,13	0,003473	1,465929204	1,570782451
	11	113	300	10023,665	22,6	0,002566	22,6	0,002566	8807,48246	34,71	0,003575	1,535840708	1,393219018
	12	113	300	10023,665	22,6	0,002566	22,6	0,002566	8807,48246	34,34	0,003518	1,519469027	1,371005456
	13	113	300	10023,665	18,26	0,002134	18,26	0,002134	8556,70103	40,85	0,005123	2,23713034	2,400656045
	14	113	300	10023,665	18,26	0,002134	18,26	0,002134	8556,70103	36,64	0,005377	2,006571742	2,51968135
	15	113	300	10023,665	18,26	0,002134	18,26	0,002134	8556,70103	39,43	0,005117	2,159364732	2,397844424
	16	113	300	10023,665	18,26	0,002134	18,26	0,002134	8556,70103	39,78	0,00469	2,178532311	2,197750703
	17	113	300	10023,665	18,26	0,002134	18,26	0,002134	8556,70103	37,34	0,004671	2,0449069	2,188847235
	18	113	300	10023,665	18,26	0,002134	18,26	0,002134	8556,70103	32,39	0,004601	1,773822563	2,156044986
	19	113	300	10023,665	18,26	0,002134	19,26	0,002134	9025,30459	32,57	0,004673	1,783680175	2,189784442
COLAJANNI ET AL.	20	154	335	18617,06	24,2	0,00133	24,2	0,00133	18195,4887	30,6	0,0116	1,26446281	8,721804511
	21	154	335	18617,06	24,2	0,00133	24,2	0,00133	18195,4887	31,3	0,00682	1,29338843	5,127819549
	22	154	335	18617,06	24,2	0,00133	24,2	0,00133	18195,4887	31,8	0,0031	1,314049587	2,330827068
	23	154	335	18617,06	24,2	0,00133	24,2	0,00133	18195,4887	33,8	0,00963	1,396694215	7,240601504
	24	154	335	18617,06	24,2	0,00133	24,2	0,00133	18195,4887	36,2	0,0114	1,495867769	8,571428571
	25	154	335	18617,06	24,2	0,00133	24,2	0,00133	18195,4887	39,7	0,0148	1,640495868	11,12781955
DONNINI ET AL.	26	140	460	15386	11,4	0,000359	11,4	0,000359	31754,8747	21,45	0,001271	1,881578947	3,540389972
	27	140	460	15386	11,4	0,000359	11,4	0,000359	31754,8747	20,87	0,001259	1,830701754	3,506963788
	28	140	460	15386	11,4	0,000359	11,4	0,000359	31754,8747	13,32	0,000566	1,168421053	1,576601671
	29	140	460	15386	11,4	0,000359	11,4	0,000359	31754,8747	13,98	0,00055	1,226315789	1,532033426
	30	140	460	15386	11,4	0,000359	11,4	0,000359	31754,8747	18,14	0,001117	1,59122807	3,111420613
	31	140	460	15386	11,4	0,000359	11,4	0,000359	31754,8747	17,27	0,001062	1,514912281	2,95821727
	32	140	460	15386	11,4	0,000359	11,4	0,000359	31754,8747	13,85	0,000488	1,214912281	1,359331476
	33	140	460	15386	11,4	0,000359	11,4	0,000359	31754,8747	13,46	0,000481	1,180701754	1,339832869

nf	pf	fc,eq [Mpa]	fc,SM [Mpa]	Am	fm	sm	tmat [mm]	x	r	fcc,theo[Mpa]	ecc,theo	fccu,theo[Mpa]	eccu,theo	fcc,theo/fc0,ex	ecc,theo/eco,exp	Ef [Mpa]	ef	fl [Mpa]	fl_eff [Mpa]	ke	rc	Ag	kf,frcm	E_sec	fcc,theo/fcc,exp	ecc,theo/ecc,exp
1	0,001610619	2,16672049	2,122004	2241,96	0,200155	6	3	2,00	5,71	34,72	0,01	47,52	0,01	1,54	3,68	270000	0,019519	2,122004002	2,122004	1	56,5	10023,67	0,500003	3832,597076	1,068875032	1,464806668
1	0,001610619	2,16672049	2,122004	2241,96	0,200155	6	3	2,00	5,71	34,72	0,01	47,52	0,01	1,54	3,68	270000	0,019519	2,122004002	2,122004	1	56,5	10023,67	0,500003	3832,597076	1,062984111	1,297202411
2	0,006442478	8,556860988	8,488016	3447,72	0,200155	9	3	2,00	5,71	56,34	0,02	53,75	0,02	2,49	8,46	270000	0,019519	8,48801601	8,488016	1	56,5	10023,67	0,500003	2704,668044	1,326172504	1,718856455
2	0,006442478	8,556860988	8,488016	3447,72	0,200155	9	3	2,00	5,71	56,34	0,02	53,75	0,02	2,49	8,46	270000	0,019519	8,48801601	8,488016	1	56,5	10023,67	0,500003	2704,668044	1,311354934	1,833225006
3	0,014495575	19,19208654	19,09804	4710	0,200155	12	3	2,00	5,71	74,91	0,03	66,22	0,03	3,31	12,57	270000	0,019519	19,09803602	19,09804	1	56,5	10023,67	0,500003	2421,007849	1,289927286	1,708733589
3	0,014495575	19,19208654	19,09804	4710	0,200155	12	3	2,00	5,71	74,91	0,03	66,22	0,03	3,31	12,57	270000	0,019519	19,09803602	19,09804	1	56,5	10023,67	0,500003	2421,007849	1,342402822	1,814877938
1	0,001610619	2,166770442	2,122002	2241,96	0,200155	6	3	2,00	5,71	34,72	0,01	49,50	0,01	1,54	3,68	270000	0,019519	2,122002395	2,122002	1	56,5	10023,67	0,500003	4097,316972	0,930253306	2,371429829
1	0,001610619	2,166770442	2,122002	2241,96	0,200155	6	3	2,00	5,71	34,72	0,01	49,50	0,01	1,54	3,68	270000	0,019519	2,122002395	2,122002	1	56,5	10023,67	0,500003	4097,316972	0,952456883	2,358229552
1	0,001610619	2,16676957	2,122002	2241,96	0,200155	6	3	2,00	5,71	34,72	0,01	50,76	0,01	1,54	3,68	270000	0,019519	2,122001524	2,122002	1	56,5	10023,67	0,500002	4265,954273	1,040678933	2,300867181
1	0,001610619	2,16676957	2,122002	2241,96	0,200155	6	3	2,00	5,71	34,72	0,01	50,76	0,01	1,54	3,68	270000	0,019519	2,122001524	2,122002	1	56,5	10023,67	0,500002	4265,954273	1,047903689	2,343267267
1	0,001610619	2,166773169	2,122005	2241,96	0,200155	6	3	2,00	5,71	34,72	0,01	46,34	0,01	1,54	3,68	270000	0,019519	2,122005122	2,122005	1	56,5	10023,67	0,500003	3675,767664	1,000203584	2,641915488
1	0,001610619	2,166773169	2,122005	2241,96	0,200155	6	3	2,00	5,71	34,72	0,01	46,34	0,01	1,54	3,68	270000	0,019519	2,122005122	2,122005	1	56,5	10023,67	0,500003	3675,767664	1,010980384	2,684720827
2	0,006442478	8,556848234	8,488003	3447,72	0,200155	9	3	2,00	5,71	49,27	0,02	50,85	0,02	2,70	9,49	270000	0,019519	8,488003256	8,488003	1	56,5	10023,67	0,500002	2432,622395	1,206057995	3,95331296
2	0,006442478	8,556848234	8,488003	3447,72	0,200155	9	3	2,00	5,71	49,27	0,02	50,85	0,02	2,70	9,49	270000	0,019519	8,488003256	8,488003	1	56,5	10023,67	0,500002	2432,622395	1,344636165	3,766565425
2	0,006442478	8,556848234	8,488003	3447,72	0,200155	9	3	2,00	5,71	49,27	0,02	50,85	0,02	2,70	9,49	270000	0,019519	8,488003256	8,488003	1	56,5	10023,67	0,500002	2432,622395	1,249491988	3,957948464
2	0,006442478	8,556848234	8,488003	3447,72	0,200155	9	3	2,00	5,71	49,27	0,02	50,85	0,02	2,70	9,49	270000	0,019519	8,488003256	8,488003	1	56,5	10023,67	0,500002	2432,622395	1,238498469	4,318298996
2	0,006442478	8,556848234	8,488003	3447,72	0,200155	9	3	2,00	5,71	49,27	0,02	50,85	0,02	2,70	9,49	270000	0,019519	8,488003256	8,488003	1	56,5	10023,67	0,500002	2432,622395	1,319428738	4,335864332
2	0,006442478	8,556848234	8,488003	3447,72	0,200155	9	3	2,00	5,71	49,27	0,02	50,85	0,02	2,70	9,49	270000	0,019519	8,488003256	8,488003	1	56,5	10023,67	0,500002	2432,622395	1,521070364	4,401830535
2	0,006442478	8,556848234	8,488003	3447,72	0,200155	9	3	2,00	5,71	49,27	0,02	53,06	0,02	2,70	9,49	270000	0,019519	8,488003256	8,488003	1	56,5	10023,67	0,500002	2432,622395	1,51266408	4,334008622
2	0,004727273	6,295440113	6,228193	6254,88	0,200155	12	4	2,00	5,71	52,36	0,01	86,83	0,02	2,16	6,82	270000	0,019519	6,228192835	6,228193	1	77	18617,06	0,500001	5774,25546	1,710999805	0,781659128
2	0,004727273	6,295440113	6,228193	6254,88	0,200155	12	4	2,00	5,71	52,36	0,01	86,83	0,02	2,16	6,82	270000	0,019519	6,228192835	6,228193	1	77	18617,06	0,500001	5774,25546	1,672734634	1,329508194
2	0,004727273	6,295440113	6,228193	6254,88	0,200155	12	4	2,00	5,71	52,36	0,01	86,83	0,02	2,16	6,82	270000	0,019519	6,228192835	6,228193	1	77	18617,06	0,500001	5774,25546	1,646433775	2,924918026
3	0,007090909	9,434112845	9,342289	8540,8	0,200155	16	4	2,00	5,71	60,95	0,01	95,03	0,02	2,52	8,59	270000	0,019519	9,342289253	9,342289	1	77	18617,06	0,500001	5333,178538	1,803186539	1,186710943
3	0,007090909	9,434112845	9,342289	8540,8	0,200155	16	4	2,00	5,71	60,95	0,01	95,03	0,02	2,52	8,59	270000	0,019519	9,342289253	9,342289	1	77	18617,06	0,500001	5333,178538	1,683638261	1,002458455
3	0,007090909	9,434112845	9,342289	8540,8	0,200155	16	4	2,00	5,71	60,95	0,01	95,03	0,02	2,52	8,59	270000	0,019519	9,342289253	9,342289	1	77	18617,06	0,500001	5333,178538	1,535206676	0,772163945
1	0,0026	3,473864468	3,4255	3717,76	0,200155	8	4	2,00	5,71	26,13	0,00	137,47	0,01	2,29	7,46	270000	0,019519	3,425500441	3,4255	1	70	15386	0,5	9755,099346	1,218411008	2,107870196
1	0,0026	3,473864468	3,4255	3717,76	0,200155	8	4	2,00	5,71	26,13	0,00	137,47	0,01	2,29	7,46	270000	0,019519	3,425500441	3,4255	1	70	15386	0,5	9755,099346	1,252271975	2,127961096
1	0,0026	3,473864468	3,4255	3717,76	0,200155	8	4	2,00	5,71	26,13	0,00	452,90	0,05	2,29	7,46	79000	0,066709	3,425500441	3,4255	1	70	15386	0,5	9755,099346	1,962080789	4,733397561
1	0,0026	3,473864468	3,4255	3717,76	0,200155	8	4	2,00	5,71	26,13	0,00	452,90	0,05	2,29	7,46	79000	0,066709	3,425500441	3,4255	1	70	15386	0,5	9755,099346	1,869450366	4,871096399
1	0,0026	3,473864468	3,4255	3717,76	0,200155	8	4	2,00	5,71	26,13	0,00	447,33	0,05	2,29	7,46	80000	0,065875	3,425500441	3,4255	1	70	15386	0,5	9755,099346	1,440734075	2,398480769
1	0,0026	3,473864468	3,4255	3717,76	0,200155	8	4	2,00	5,71	26,13	0,00	447,33	0,05	2,29	7,46	80000	0,065875	3,425500441	3,4255	1	70	15386	0,5	9755,099346	1,513313035	2,522695875
1	0,0026	3,473864468	3,4255	3717,76	0,200155	8	4	2,00	5,71	26,13	0,00	273,87	0,03	2,29	7,46	132000	0,039924	3,425500441	3,4255	1	70	15386	0,5	9755,099346	1,886997553	5,489965204
1	0,0026	3,473864468	3,4255	3717,76	0,200155	8	4	2,00	5,71	26,13	0,00	273,87	0,03	2,29	7,46	132000	0,039924	3,425500441	3,4255	1	70	15386	0,5	9755,099346	1,941672817	5,569860747

Tabella 29_Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante Articolo di P. Colajanni et al. (2014)

Come ben visibile in **Tabella 29**, sono stati riportati anche i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione a provino già confinato. Questo aspetto risulta essere molto importante in quanto rende immediata una possibile comparazione tra i vari ottenuti per via teorica, ricavati dal modello analitico in questione, con i corrispondenti dati sperimentali di riferimento. Disponendo di tali dati, si va ad estrarre il primo grafico evidenziante la relazione tra la resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

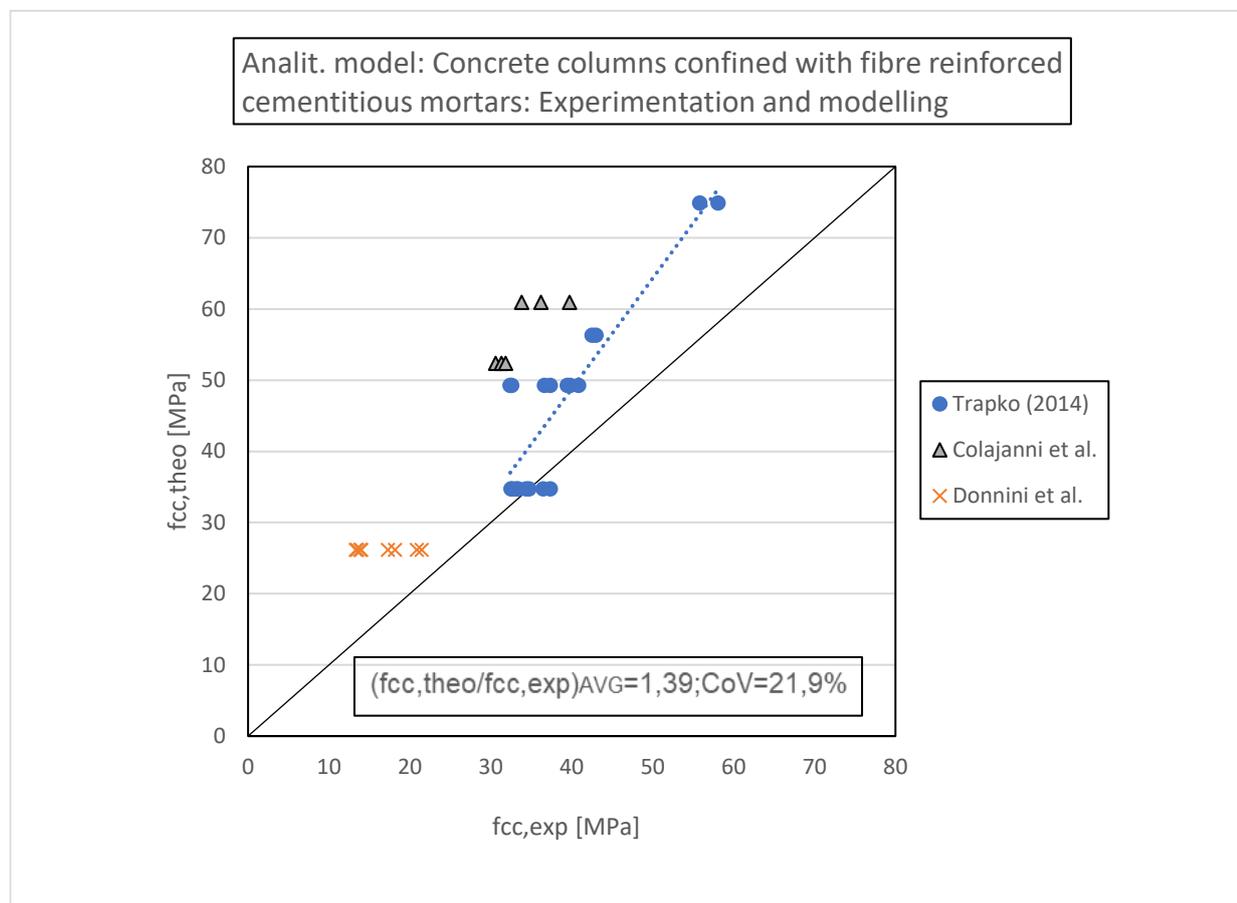


Figura 88_ Relazione Resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Il grafico a dispersione, riportato nella **Figura 88**, tende a fornire delle informazioni molto importanti: infatti, si può asserire che il modello tende ad eseguire una sovrastima per tutti i punti appartenenti ai tre articoli sperimentali trattati. La spiegazione a ciò, consiste nel fatto che la resistenza confinata risulta essere direttamente proporzionale al numero di strati di rinforzo applicati, oltre che alla rigidità della fibra. Tutti i modelli, presentano dei valori elevati per i parametri citati, e si osserva che maggiore discostamento tra le due classi di valori si ha con l'applicazione di tre strati di materiale rinforzante. Il minimo, invece, risulta essere vicino all'unità e con applicazione di un solo strato di rinforzo.

Infatti, risulta essere ben visibile dalla linea di tendenza in **Figura 88**, tale si va a posizionare al di sopra della retta di equazione $y=x$, quale va a sancire la coincidenza tra valori sperimentali e analitici. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range ristretto tra 0,93 e 1,52. Per quanto riguarda il valore medio, infatti, si può asserire che tale risulta essere pari a 1,39 e un valore CoV pari a 21,9%. In termini matematici, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che i valori dei vari rapporti tra le due resistenze risultano essere poco devianti rispetto al valore medio.

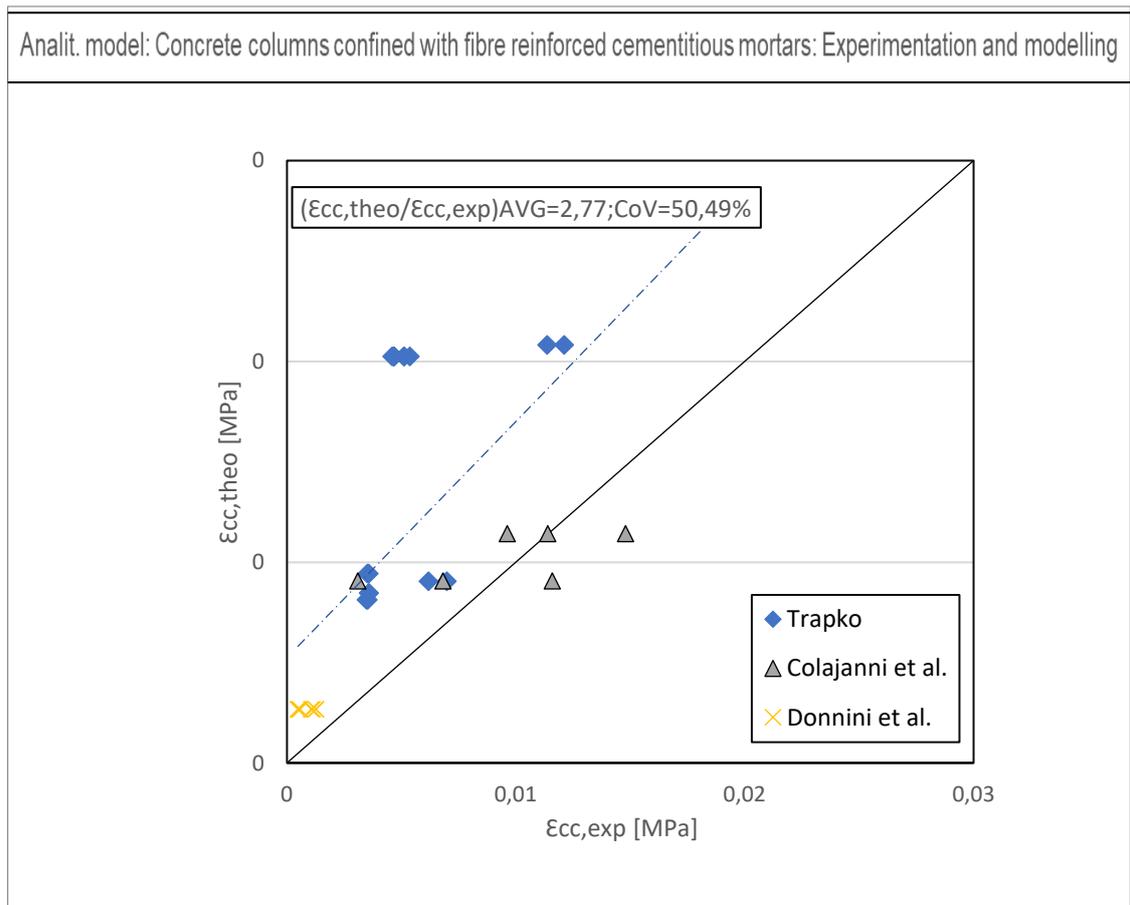


Figura 89_ Relazione deformazione confinata teorica- deformazione confinata sperimentale

Analoga analisi, fatta in termini deformativi, viene riportata nella **Figura 89**: il modello, nella trattazione di *T. Trapko et al. (2014)*, tende a sovrastimare il valore della resistenza cilindrica ed infatti ciò viene confermato dai punti ubicati al di sopra della retta di riferimento. Invece, per i dati relativi all'articolo di *P. Colajanni et al. (2014)*, la distribuzione dei punti risulta essere presente attorno la retta di riferimento, andando a sottostimare punti dove il valore della percentuale meccanica risulta essere bassa; infine, per valori dell'articolo di *Donnini*, il modello tende a sovrastimare il valore della resistenza.

Come risulta essere ben visibile dalla linea di tendenza, in **Figura 89**, è localizzata al di sopra della retta di riferimento e facendo trarre la conclusione del fatto che tale modello sovrastima i punti a nostra disposizione. Infatti, il valore medio risulta essere pari a 2,77 e un valore CoV pari a 50,49%. Nonostante il valore sia aumentato rispetto al CoV relativo alle resistenze cilindriche, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che la variabilità dei valori dei rapporti tra le due deformazioni, risulta essere molto contenuta rispetto al valore medio.

Infine, come fase ultima della valutazione dell'attendibilità del modello, si vanno a stilare gli istogrammi dei singoli articoli dove si andrà ad evidenziare l'oscillazione del rapporto tra resistenze cilindriche e deformazioni, in funzione del provino in esame.

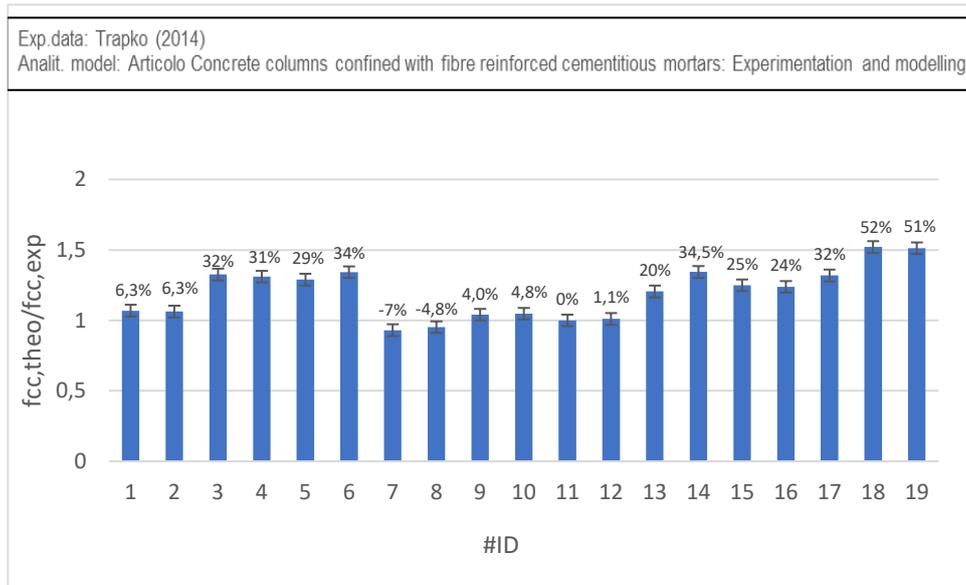


Figura 90_ Articolo sperimentali di T.Trapko et al. (2014): Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

Nella trattazione dell'articolo di Trapko et al. (2014), la **Figura 90** presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati. Come è possibile attestare, i valori restituiti tendono ad essere molto variabile e ciò risulta essere dovuto al valore assunto dalla pressione di confinamento. Difatti, i valori più alti di scarto rispetto al valore unitario tendono ad essere presenti a valore alti di pressione di confinamento. Oltre a questo aspetto, alti valori del parametro citato comportano una sovrastima del valore teorico della resistenza cilindrica.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra l' -7% e +52%. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con grafico riportato in **Figura 88**, dove appunto va a mostrare il posizionamento, della maggioranza dei punti, al di sopra della retta di riferimento di equazione $y=x$.

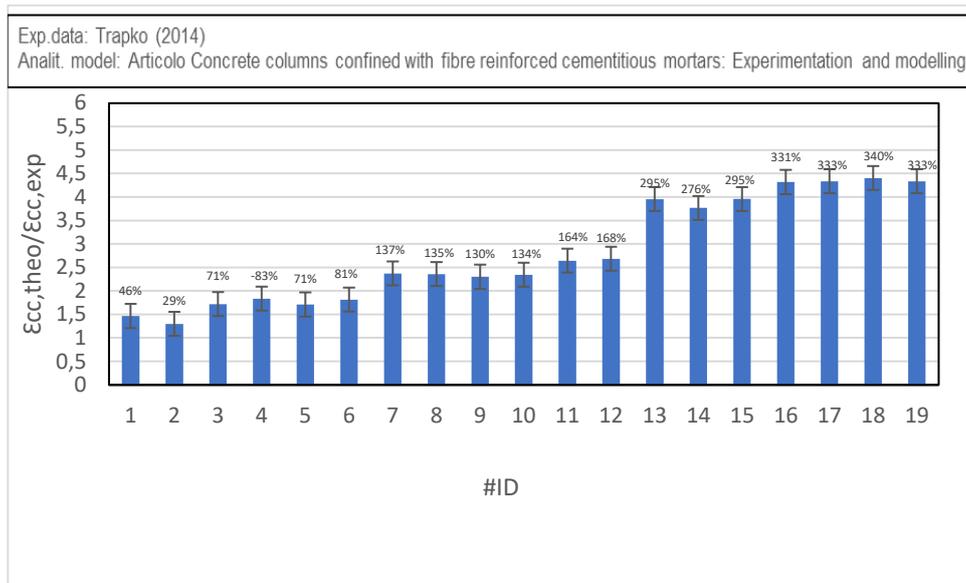


Figura 91_ Articolo sperimentale di T.Trapko et al.(2014): Rapporto Deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale

Il grafico in **Figura 91**, invece, va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due deformazioni di provini già confinati e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la

coincidenza tra i due parametri interessati. Da istogramma, è possibile notare che il modello in questione tende a sovrastimare il valore deformativo, rendendosi meno cautelativo rispetto ai valori sperimentali.

Inoltre, il comportamento tende ad essere molto variabile con valori crescenti man mano che la pressione di confinamento tende a crescere. Conferma di tali risultati sono riportati nel posizionamento dei punti, al di sopra della retta di riferimento, nel grafico a dispersione in **Figura 89**.

Il range di variazione risulta essere compreso tra il +29% e +333%.

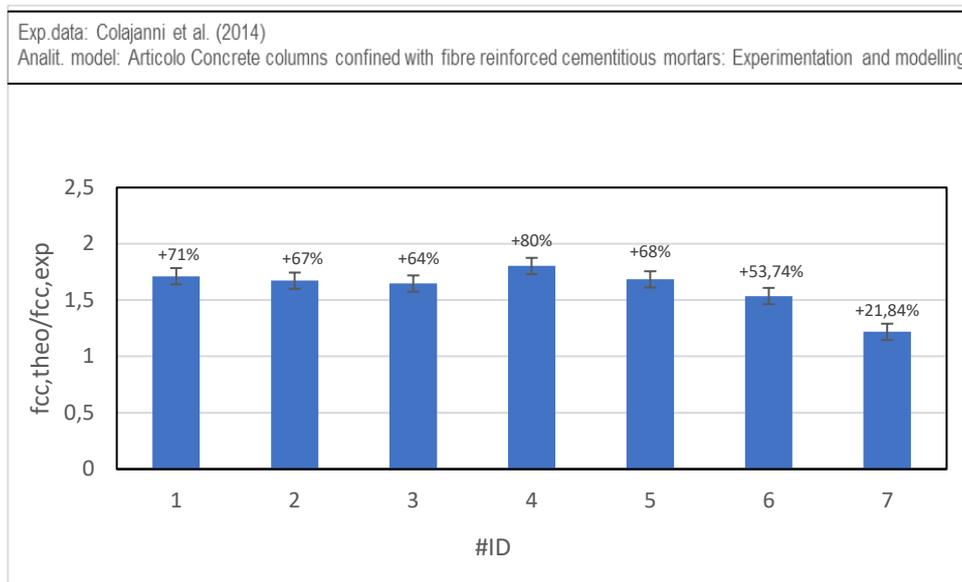


Figura 92_ *Articolo sperimentali di P.Colajanni et al.(2014): Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Per l'analisi dell'articolo di *Colajanni et al. (2014)*, la **Figura 92** presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati. Come è possibile attestare, il comportamento tende ad essere irregolare e ciò risulta essere dovuto al valore assunto dalla pressione di confinamento. Difatti, i valori più alti di scarto rispetto al valore unitario tendono ad essere presenti a valore alti di pressione di confinamento. Si può asserire che il modello tende a sovrastimare i valori di resistenza cilindrica e tende ad essere cautelativo.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra l'+22% e +80%. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con grafico riportato in **Figura 88**, dove appunto va a mostrare il posizionamento, della maggioranza dei punti, al di sopra della retta di riferimento di equazione $y=x$.

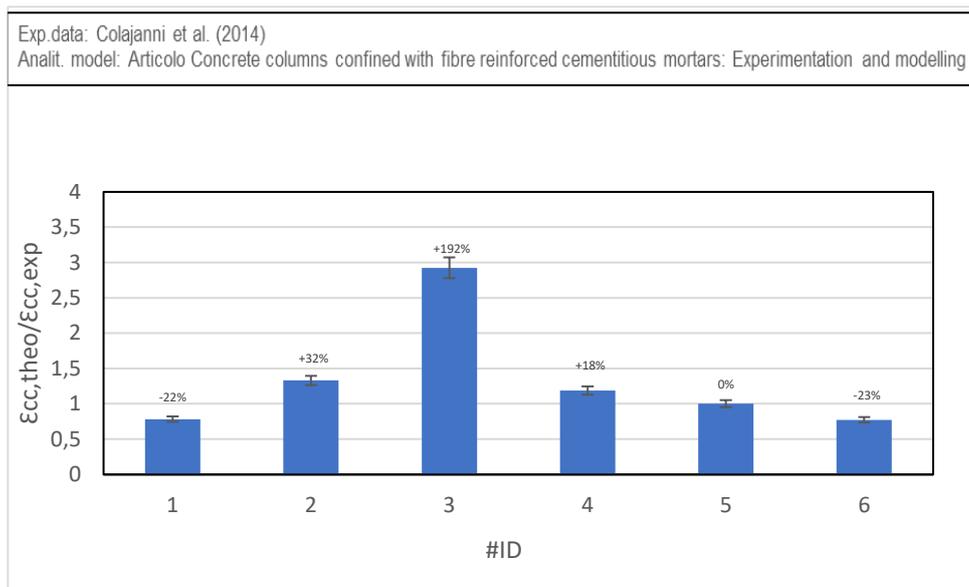


Figura 93_ Articolo sperimentali di P.Colajanni et al. (2014): Rapporto Deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale

Il grafico in **Figura 93**, invece, va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due deformazioni di provini già confinati e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati. Da istogramma, è possibile notare che il modello in questione tende a sovrastimare pur provini centrali dove si presenta un numero di strati pari a 2 ed un valore più basso, registratosi nell'articolo di riferimento, della pressione di confinamento, rendendosi meno cautelativo rispetto ai valori sperimentali. Invece, nella situazione dove vede la presenza di 3 strati di materiale di confinamento, spessore complessivo maggiore e valore più alto della pressione di confinamento, si registra una sottostima della deformazione teorica.

Conferma di tali risultati, sono riportati nel posizionamento dei punti, che risultano essere sia disposti al di sopra che al di sotto della retta, di riferimento nel grafico a dispersione in **Figura 89**.

Il range di variazione risulta essere compreso tra il -23% e +132%.

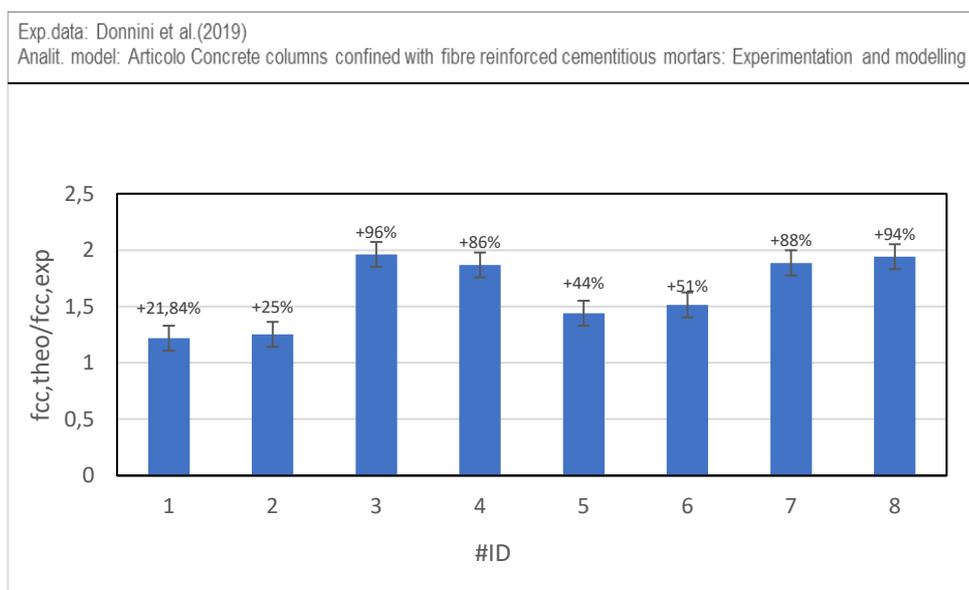


Figura 94_ Articolo sperimentali di Donnini et al. (2019): Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

Come detto in precedenza, la **Figura 94**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate e del relativo scarto rispetto al valore unitario che

andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati. Come è possibile attestare, il comportamento tende ad essere irregolare e ciò risulta essere dovuto al valore assunto dalla pressione di confinamento. Difatti, il modello tende ad essere meno cautelativo per alti valori della pressione di confinamento.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra +22% e +192%. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con grafico riportato in **Figura 88**, dove appunto va a mostrare il posizionamento di tutti i punti, al di sopra della retta di riferimento di equazione $y=x$.

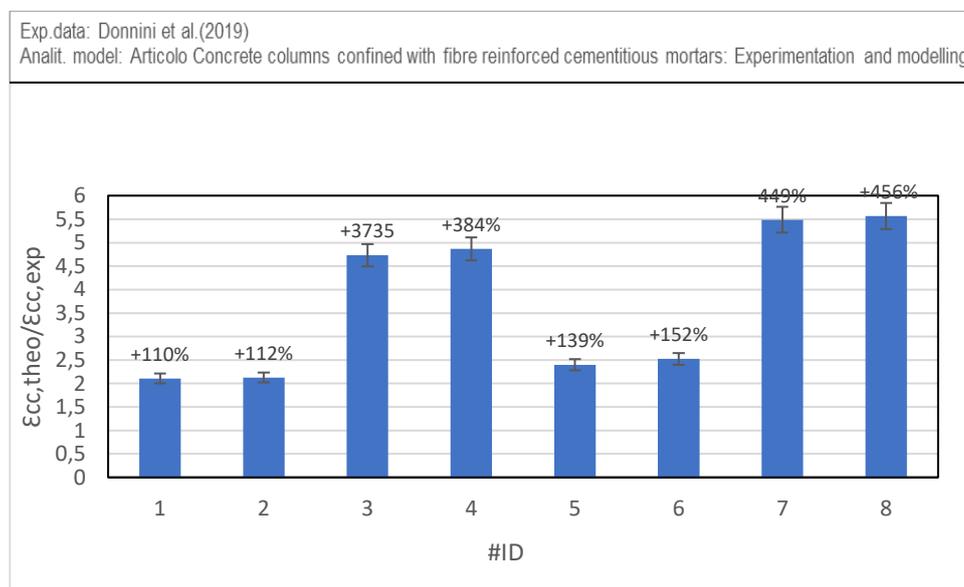


Figura 95_ Articolo sperimentali di Donnini et al. (2019): Rapporto Deformazione confinata teorica con deformazione confinata sperimentale

Il grafico in **Figura 95**, invece, va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due deformazioni di provini già confinati e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire la coincidenza tra i due parametri interessati. Dal seguente istogramma, è possibile notare che il modello in questione tende a sovrastimare tutti i provini di riferimento. Questo fenomeno è dettato dal fatto che la deformazione ultima risulta essere direttamente proporzionale alla capacità deformativa del rinforzo, che a sua risulta essere in funzione del valore del modulo elastico della fibra.

Conferma di tali risultati, sono riportati nel posizionamento dei punti, che risultano essere disposti al di sopra della retta, di riferimento nel grafico a dispersione in **Figura 89**.

Il range di variazione risulta essere compreso tra il +110% e +456%.

CIRCOLARE CNR DT 215-(2018)

In tale paragrafo, si va a trattare il modello analitico relativo alla *Circolare CNR DT 215 (2018)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in calcestruzzo mediante *FRCM*, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

	#ID	Base [mm]	Altezza [mm]	H colonna[mm]	Diametro [mm]	Ac [mm^2]	FC	fc0,AVG [Mpa]	fc0,exp [Mpa]	εc0,exp	rc	Ef [MPa]	tf [mm]	εuf	fc,mat [Mpa]	nf	Ym
TRAPKO (2014)	1	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002461	56,5	270000	0,0455	0,019518519	5270	1	1
	2	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002461	56,5	270000	0,0455	0,019518519	5270	1	1
	3	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002461	56,5	270000	0,091	0,019518519	5270	2	1
	4	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002461	56,5	270000	0,091	0,019518519	5270	2	1
	5	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002461	56,5	270000	0,1365	0,019518519	5270	3	1
	6	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002461	56,5	270000	0,1365	0,019518519	5270	3	1
	7	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002302	56,5	270000	0,0455	0,019518519	5270	1	1
	8	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002302	56,5	270000	0,0455	0,019518519	5270	1	1
	9	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002211	56,5	270000	0,0455	0,019518519	5270	1	1
	10	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002211	56,5	270000	0,0455	0,019518519	5270	1	1
	11	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002566	56,5	270000	0,0455	0,019518519	5270	1	1
	12	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	22,6	22,6	0,002566	56,5	270000	0,0455	0,019518519	5270	1	1
	13	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	18,26	18,26	0,002134	56,5	270000	0,091	0,019518519	5270	2	1
	14	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	18,26	18,26	0,002134	56,5	270000	0,091	0,019518519	5270	2	1
	15	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	18,26	18,26	0,002134	56,5	270000	0,091	0,019518519	5270	2	1
	16	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	18,26	18,26	0,002134	56,5	270000	0,091	0,019518519	5270	2	1
	17	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	18,26	18,26	0,002134	56,5	270000	0,091	0,019518519	5270	2	1
	18	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	18,26	18,26	0,002134	56,5	270000	0,091	0,019518519	5270	2	1
	19	79,90306627	79,90306627	300	113	10023,665	1	18,26	18,26	0,002134	56,5	270000	0,091	0,019518519	5270	2	1
COLAJANNI ET AL.	20	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	1	24,2	24,2	0,00133	77	270000	0,045	0,021481481	5800	2	1
	21	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	1	24,2	24,2	0,00133	77	270000	0,045	0,021481481	5800	2	1
	22	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	1	24,2	24,2	0,00133	77	270000	0,045	0,021481481	5800	2	1
	23	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	1	24,2	24,2	0,00133	77	270000	0,045	0,021481481	5800	3	1
	24	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	1	24,2	24,2	0,00133	77	270000	0,045	0,021481481	5800	3	1
25	108,8944443	108,8944443	335	154	18617,06	1	24,2	24,2	0,00133	77	270000	0,045	0,021481481	5800	3	1	
DONNINI ET AL.	26	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	1	11,4	11,4	0,000359	70	270000	0,046	0,000977778	264	1	1
	27	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	1	11,4	11,4	0,000359	70	270000	0,046	0,000977778	264	1	1
	28	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	1	11,4	11,4	0,000359	70	79000	0,048	0,010708861	846	1	1
	29	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	1	11,4	11,4	0,000359	70	79000	0,048	0,010708861	846	1	1
	30	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	1	11,4	11,4	0,000359	70	80000	0,046	0,019275	1542	1	1
	31	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	1	11,4	11,4	0,000359	70	80000	0,046	0,019275	1542	1	1
	32	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	1	11,4	11,4	0,000359	70	132000	0,048	0,007386364	975	1	1
	33	98,99494937	98,99494937	460	140	15386	1	11,4	11,4	0,000359	70	132000	0,048	0,007386364	975	1	1

ηa	Kmat	ρmat	t,mat[mm]	KH	εud,rid	fcc,exp[Mpa]	ecc,exp	fcc,exp/fc0,exp	ecc,exp/εc0,exp	f1[Mpa]	f1,eff[MPA]	fcc,theo [Mpa]	ecc,theo	fcc,theo/fcc,exp	ecc,theo/ecc,exp
0,9	26,74035705	0,1061947	3	1	0,004	32,48	0,006184	1,437168142	2,512799675	0,869734513	0,869734513	29,29782759	/	0,902026711	/
0,9	26,74035705	0,1061947	3	1	0,004	32,66	0,006983	1,445132743	2,837464445	0,869734513	0,869734513	29,29782759	/	0,897055346	/
0,9	75,63315119	0,2123894	3	1	0,004	42,48	0,012118	1,879646018	4,924014628	3,478938053	3,478938053	39,47746793	/	0,929318925	/
0,9	75,63315119	0,2123894	3	1	0,004	42,96	0,011362	1,900884956	4,61682243	3,478938053	3,478938053	39,47746793	/	0,918935473	/
0,9	138,946971	0,3185841	3	1	0,004	58,07	0,018107	2,569469027	7,35757822	7,827610619	7,827610619	51,57981688	/	0,88823518	/
0,9	138,946971	0,3185841	3	1	0,004	55,8	0,017048	2,469026549	6,927265339	7,827610619	7,827610619	51,57981688	/	0,924369478	/
0,9	26,74035705	0,1061947	3	1	0,004	37,32	0,003573	1,651327434	1,552128584	0,869734513	0,869734513	29,29782759	/	0,785043612	/
0,9	26,74035705	0,1061947	3	1	0,004	36,45	0,003593	1,612831858	1,560816681	0,869734513	0,869734513	29,29782759	/	0,803781278	/
0,9	26,74035705	0,1061947	3	1	0,004	33,36	0,003537	1,476106195	1,59972863	0,869734513	0,869734513	29,29782759	/	0,878232242	/
0,9	26,74035705	0,1061947	3	1	0,004	33,13	0,003473	1,465929204	1,570782451	0,869734513	0,869734513	29,29782759	/	0,884329236	/
0,9	26,74035705	0,1061947	3	1	0,004	34,71	0,003575	1,535840708	1,393219018	0,869734513	0,869734513	29,29782759	/	0,844074549	/
0,9	26,74035705	0,1061947	3	1	0,004	34,34	0,003518	1,519469027	1,371005456	0,869734513	0,869734513	29,29782759	/	0,85316912	/
0,9	104,1414677	0,2123894	3	1	0,004	40,85	0,005123	2,23713034	2,400656045	3,478938053	3,478938053	33,97947616	/	0,831810922	/
0,9	104,1414677	0,2123894	3	1	0,004	36,64	0,005377	2,006571742	2,51968135	3,478938053	3,478938053	33,97947616	/	0,92738745	/
0,9	104,1414677	0,2123894	3	1	0,004	39,43	0,005117	2,159364732	2,397844424	3,478938053	3,478938053	33,97947616	/	0,861767085	/
0,9	104,1414677	0,2123894	3	1	0,004	39,78	0,00469	2,178532311	2,197750703	3,478938053	3,478938053	33,97947616	/	0,854184921	/
0,9	104,1414677	0,2123894	3	1	0,004	37,34	0,004671	2,0449069	2,188847235	3,478938053	3,478938053	33,97947616	/	0,91000204	/
0,9	104,1414677	0,2123894	3	1	0,004	32,39	0,004601	1,773822563	2,156044986	3,478938053	3,478938053	33,97947616	/	1,049073052	/
0,9	104,1414677	0,2123894	3	1	0,004	32,57	0,004673	1,783680175	2,189784442	3,478938053	3,478938053	33,97947616	/	1,043275289	/
0,9	49,5352611	0,1558442	3	1	0,004	30,6	0,0116	1,26446281	8,721804511	1,262337662	1,262337662	32,9840641	/	1,077910592	/
0,9	49,5352611	0,1558442	3	1	0,004	31,3	0,00682	1,29338843	5,127819549	1,262337662	1,262337662	32,9840641	/	1,053803965	/
0,9	49,5352611	0,1558442	3	1	0,004	31,8	0,0031	1,314049587	2,330827068	1,262337662	1,262337662	32,9840641	/	1,03723472	/
0,9	91,00208549	0,2337662	3	1	0,004	33,8	0,00963	1,396694215	7,240601504	1,893506494	1,893506494	35,7103802	/	1,056520124	/
0,9	91,00208549	0,2337662	3	1	0,004	36,2	0,0114	1,495867769	8,571428571	1,893506494	1,893506494	35,7103802	/	0,986474591	/
0,9	91,00208549	0,2337662	3	1	0,004	39,7	0,0148	1,640495868	11,12781955	1,893506494	1,893506494	35,7103802	/	0,899505799	/
0,9	0,934321339	0,1142857	4	1	0,000822203	21,45	0,001271	1,881578947	3,540389972	0,145882264	0,145882264	13,02159836	/	0,607067522	/
0,9	0,934321339	0,1142857	4	1	0,000822203	20,87	0,001259	1,830701754	3,506963788	0,145882264	0,145882264	13,02159836	/	0,623938589	/
0,9	5,359767141	0,1142857	4	1	0,004	13,32	0,000566	1,168421053	1,576601671	0,216685714	0,216685714	13,51103363	/	1,014341864	/
0,9	5,359767141	0,1142857	4	1	0,004	13,98	0,00055	1,226315789	1,532033426	0,216685714	0,216685714	13,51103363	/	0,96645448	/
0,9	13,18915396	0,1142857	4	1	0,004	18,14	0,001117	1,59122807	3,111420613	0,210285714	0,210285714	13,4692588	/	0,742517023	/
0,9	13,18915396	0,1142857	4	1	0,004	17,27	0,001062	1,514912281	2,95821727	0,210285714	0,210285714	13,4692588	/	0,77992234	/
0,9	6,631279005	0,1142857	4	1	0,004	13,85	0,000488	1,214912281	1,359331476	0,362057143	0,362057143	14,3725309	/	1,037727863	/
0,9	6,631279005	0,1142857	4	1	0,004	13,46	0,000481	1,180701754	1,339832869	0,362057143	0,362057143	14,3725309	/	1,067795758	/

Tabella 30_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante Circolare CNR DT 215

Come ben visibile in **Tabella 30**, sono stati riportati anche i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione a provino già confinato. Questo aspetto risulta essere molto importante in quanto rende immediata una possibile comparazione con i vari ottenuti per via teorica attraverso il modello analitico relativo alla *Circolare CNR DT 215-2018* con i dati sperimentali degli articoli di riferimento. Un ulteriore aspetto della quale bisogna tener presente, è il fatto che il modello analitico non riserva delle formulazioni utili per la determinazione della deformazione ultima, rendendo non fattibile le varie comparazioni che comportano la richiesta di tale parametro.

Grazie ai dati a disposizione, è possibile riuscire a stilare il grafico che segue dove si va ad evidenziare i valori sperimentali e teorici assunti, dai diversi provini testati, relativi alle resistenze cilindriche a provino confinato:

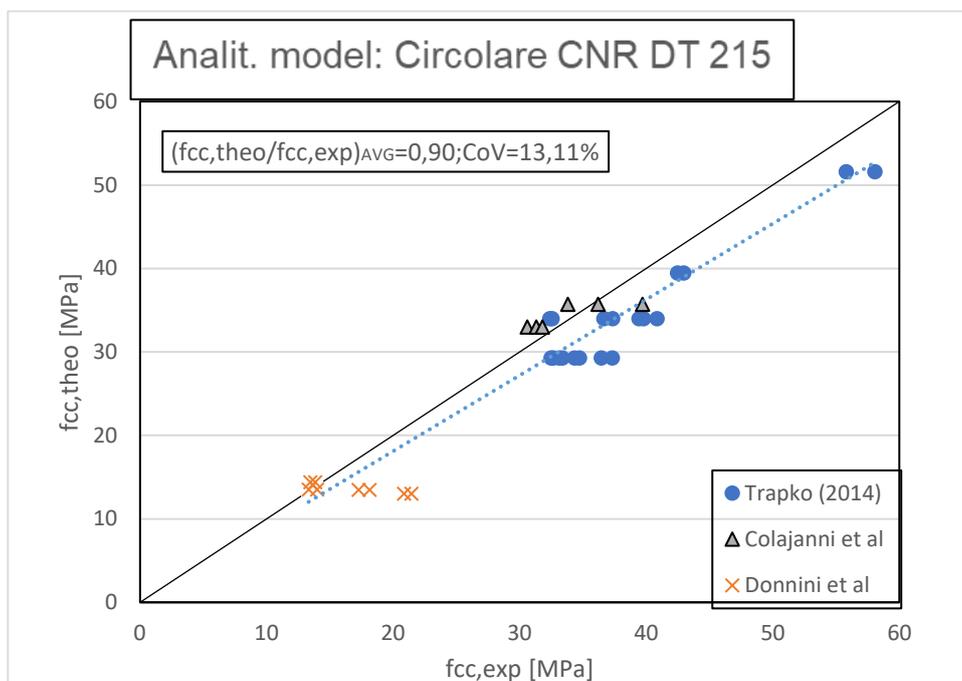


Figura 96_ Relazione Resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Dal confronto tra le due classi di resistenza, eseguito e riportato in **Figura 96**, il modello tende ad eseguire una sottostima della resistenza cilindrica. Conferma di tale tendenza, risulta essere il valore medio del rapporto incrementale al di sotto dell'unità. Infatti, i valori del rapporto tra le due entità interessate, è compresa in un range ristretto tra 0,78 e 1,05. Il valore medio, infatti, risulta essere pari a 0,90 e un valore CoV pari a 13,11%. In termini matematici, quest'ultimo parametro, va ad evidenziare che i valori dei vari rapporti tra le due resistenze risultano essere poco devianti rispetto al valore medio. Andando ad analizzare il grafico, inoltre, si nota che per l'articolo di *T. Trapko et al. (2014)* e di *Donnini et al. (2019)*, quasi tutti i punti risultano essere al di sotto della retta di equazione $y=x$ e quindi i valori teorici risultano essere sottostimati. Per quanto riguarda i punti relativi all'articolo di *Colajanni et al. (2014)*, si presenta una distribuzione equa dei punti nell'intorno della retta di riferimento. Da notare, che tale sottostima risulta essere ridotta al minimo nella casistica di più strati di rinforzo applicati.

Come fase successiva di tale indagine, si va ad eseguire l'extrapolazione di un istogramma che va ad evidenziare la variazione il discostamento tra valori teorici e quelli sperimentali in termini di resistenza a provino confinato. Da sottolineare che la seguente tipologia di grafico viene stilato singolarmente per ogni singolo articolo sperimentale di riferimento in modo da poter favorire un confronto con il grafico a dispersione riportato nella **Figura 96**.

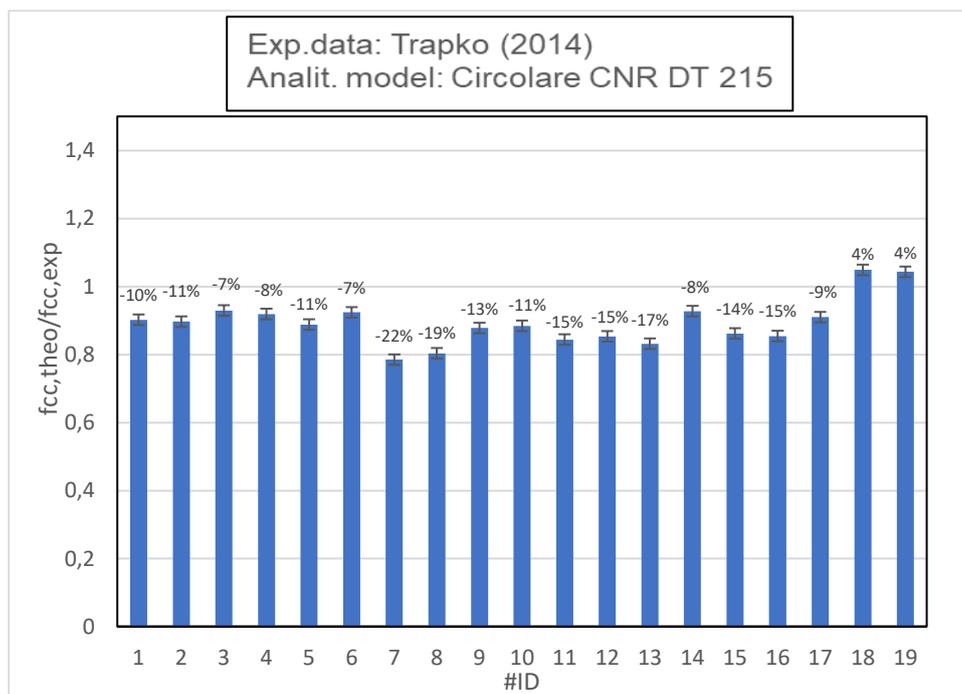


Figura 97_ Articolo sperimentale di *T.Trapko et al. (2014)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Il grafico, in **Figura 97**, va ad evidenziare la variazione di valori dello scarto, rispetto il valore unitario, del rapporto tra valore teorico e sperimentale della resistenza cilindrica del provino già confinato. Si nota che i valori del discostamento risultano essere negativi, indicando che tale modello comporta una sottostima nella valutazione della resistenza cilindrica. A questi punti, però, vanno ad aggiungersi dei valori di scarto poco superiori all'unità, precisamente negli ultimi due provini, dove si presenta l'applicazione di due strati di materiale di confinamento con spessore complessivo pari a 0,091 mm. Come verifica dell'andamento dei valori di scarto, risulta facile un confronto col grafico a dispersione, riportato in **Figura 96**, dove infatti quasi la totalità dei punti si trovano al di sotto della retta di riferimento di equazione $y=x$. In termini quantitativi, il range di oscillazione dello scarto risulta essere -22% a +4%.

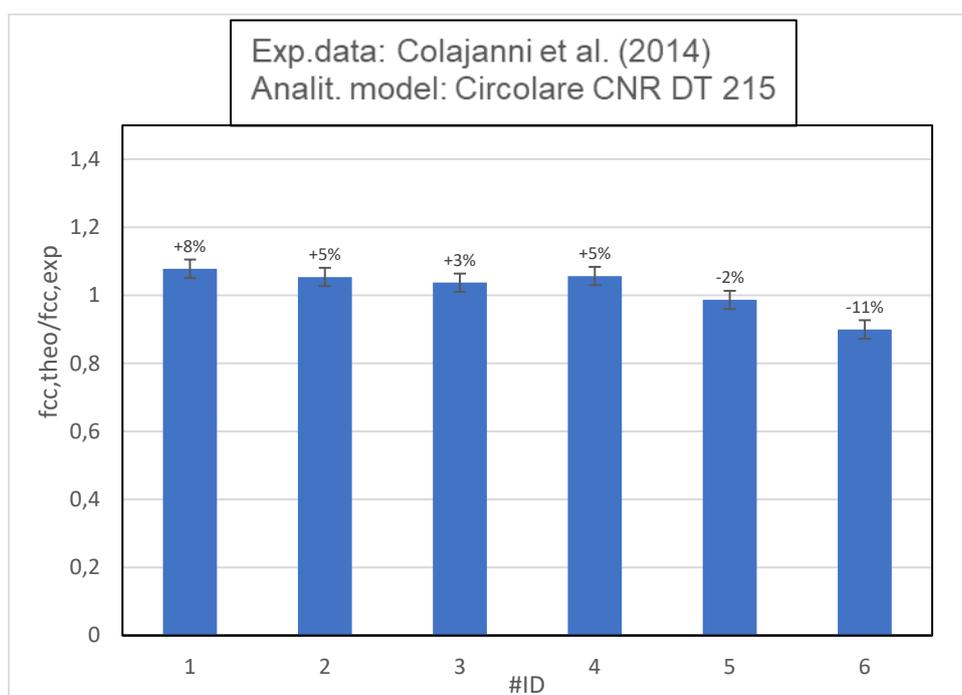


Figura 98_ Articolo sperimentale di *P.Colajanni et al.(2014)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Il grafico illustrato in **Figura 98**, va a riassumere i valori dello scarto relativo al rapporto tra il valore teorico e sperimentale della resistenza cilindrica dei provini già confinati presenti nell'articolo sperimentale di *P.Colajanni et al. (2014)*. L'istogramma in questione mostra la presenza di un'eterogeneità di valori e, quindi, anche presenza di una distribuzione uniforme. È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra -11% e +8%. La variabilità dei valori risulta essere molto in funzione dello spessore e numero di strati del materiale di confinamento. Infatti, a bassi valori di discostamento corrispondono un solo strato applicato e valore minimo di spessore del materiale di confinamento, mentre a grandi valori corrispondono valori maggiori in termini di numero strati e spessore.

Come verifica di tali valori riportati, è possibile visionarlo nel grafico in **Figura 96**, dove i punti dell'articolo in questione risultano essere equamente posizionati sia al di sopra che al di sotto della retta di confinamento.

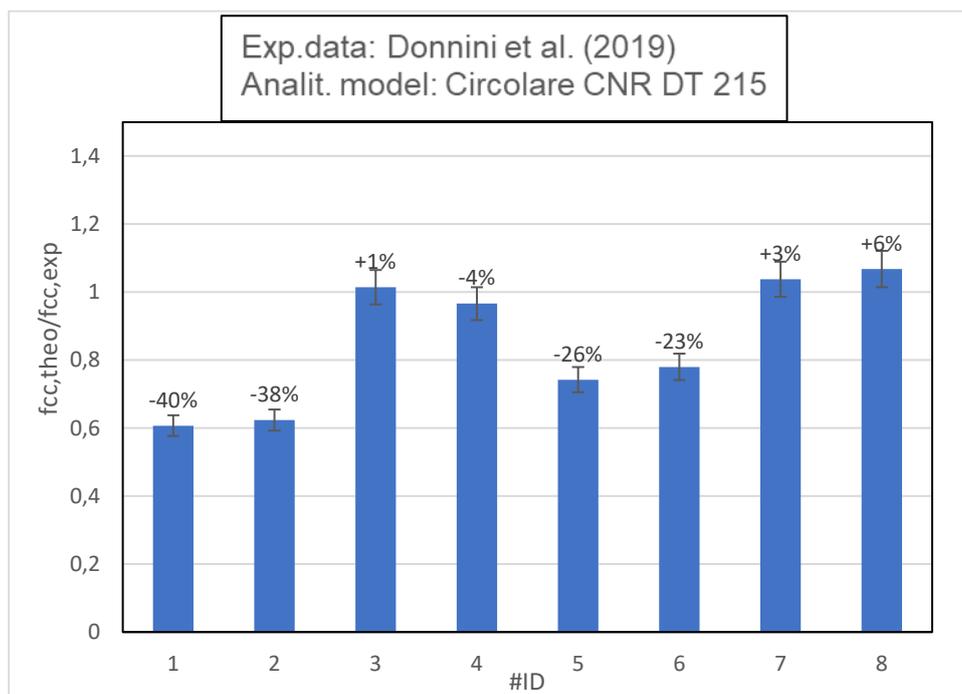


Figura 99_ Articolo sperimentale di *Donnini et al. (2019)*: Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

Il grafico illustrato in **Figura 99**, va a riassumere i valori dello scarto relativo al rapporto tra il valore teorico e sperimentale della resistenza cilindrica dei provini già confinati presenti nell'articolo sperimentale di *Donnini et al (2019)*. L'istogramma in questione mostra la presenza di un'eterogeneità di valori e, quindi, anche presenza di una distribuzione uniforme. È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra -40% e +6%. La variabilità dei valori risulta essere molto in funzione dello spessore e numero di strati del materiale di confinamento. Infatti, a bassi valori di discostamento corrispondono uno solo strato di materiale di confinamento e valore minimo di spessore, mentre una netta differenza tra valori si ha con l'applicazione di entità maggiori di strati e di spessore del rinforzo.

Come verifica di tali valori riportati, è possibile visionarlo nel grafico in **Figura 96**, dove i punti dell'articolo in questione risultano essere equamente posizionati sia al di sopra che al di sotto della retta di confinamento.

4.2.b VALIDAZIONE SU COLONNE IN MURATURA

Il seguente paragrafo, va a concentrarsi sulla metodologia di confinamento delle colonne in muratura, quale vede l'uso di *FRCM*.

Preso visione dei seguenti dati, vengono considerati diversi modelli analitici che vanno a trattare il confinamento delle colonne in calcestruzzo mediante *FRCM*:

- *ARTICOLO SPERIMENTALE DI BALSAMO ET AL. (2018)*;

- CIRCOLARE CNR DT 215-(2018);
- NORMATIVA ACI 549-6R (2020).

Attraverso la trattazione dei dati dei diversi articoli sperimentali, mediante i modelli indicati, si riuscirà a capire quali tra questi sarà quello più attendibile per la relativa tipologia di confinamento e materiale della colonna da confinare.

BALSAMO ET AL. (2018)

In tale paragrafo, si va a trattare il modello analitico relativo alla *Balsamo et al. (2018)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in muratura mediante *FRCM*, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

	#ID	Base [mm]	Altezza [mm]	Diametro [mm]	fm0,exp [Mpa]	εc0,exp	Ec [Mpa]	fmd,exp	emd,exp	fmd,exp/fm0,exp	emd,exp/εm0,exp	nf	tf [mm]	Ef [MPa]
CASCARDI ET AL. (2018)	1	106,0660172	106,0660172	150	23,4	0,000849	27570	29,016	/	1,24	/	1	0,062	110000
	2	106,0660172	106,0660172	150	23,4	0,000849	27570	30,186	/	1,29	/	1	0,062	110000
	3	106,0660172	106,0660172	150	23,4	0,000849	27570	33,462	/	1,43	/	1	0,062	110000
	4	106,0660172	106,0660172	150	23,4	0,000849	27570	32,76	/	1,4	/	1	0,062	120000
	5	106,0660172	106,0660172	150	23,4	0,000849	27570	30,42	/	1,3	/	1	0,062	120000
	6	106,0660172	106,0660172	150	23,4	0,000849	27570	32,526	/	1,39	/	1	0,062	120000
	7	106,0660172	106,0660172	150	23,4	0,000849	27570	39,078	/	1,67	/	1	0,124	120000
	8	106,0660172	106,0660172	150	23,4	0,000849	27570	34,398	/	1,47	/	1	0,124	120000
	9	106,0660172	106,0660172	150	23,4	0,000849	27570	38,376	/	1,64	/	1	0,124	120000
	10	106,0660172	106,0660172	150	16,8	0,000719	23360	30,744	/	1,83	/	1	0,062	110000
	11	106,0660172	106,0660172	150	16,8	0,000719	23360	26,88	/	1,6	/	1	0,062	110000
	12	106,0660172	106,0660172	150	16,8	0,000719	23360	28,56	/	1,7	/	1	0,062	110000
	13	250,3158005	250,3158005	354	5,98	0,02392	250	6,3388	/	1,06	/	1	0,25	31750
	14	250,3158005	250,3158005	354	5,98	0,02392	250	7,8338	/	1,31	/	1	0,25	31750
	15	250,3158005	250,3158005	354	5,98	0,02392	250	11,1826	/	1,87	/	1	0,25	31750
CARLONI ET AL. (2015)	16	102	100	142,8425707	28,7	0,0052	25000	36,1	0,0138	1,257839721	2,653846154	1	0,092	11000
	17	102	100	142,8425707	32,3	0,0059	25000	41,8	0,0077	1,294117647	1,305084746	1	0,092	11000
	18	102	100	142,8425707	26,2	0,0047	25000	34,6	0,0152	1,320610687	3,234042553	1	0,092	11000
	19	102	152	183,0519052	25,4	0,0078	25000	38,4	0,0165	1,511811024	2,115384615	1	0,092	11000
	20	102	152	183,0519052	20,3	0,0056	25000	37,4	0,0159	1,842364532	2,839285714	1	0,092	11000
	21	102	152	183,0519052	20,3	0,0047	25000	38	0,0096	1,871921182	2,042553191	1	0,092	11000
	22	102	204	228,0789337	10,8	0,0035	25000	36,5	0,0042	3,37962963	1,2	1	0,092	11000
	23	102	204	228,0789337	5,9	0,0045	25000	34,1	0,0083	5,779661017	1,844444444	1	0,092	11000
FOSSETTI ET MINAFO' (2010)	24	230	230	325,2691193	4,31	0,0145	25000	7,8011	0,02291	1,81	1,58	1	0,045	89000
	25	230	230	325,2691193	5,05	0,0139	25000	8,4335	0,01946	1,67	1,4	1	0,045	89000
	26	230	230	325,2691193	9,14	0,012	25000	11,882	0,02952	1,3	2,46	1	0,045	89000
	27	230	230	325,2691193	9,7	0,0128	25000	13,095	0,030848	1,35	2,41	1	0,045	89000
	28	230	230	325,2691193	4,31	0,0145	25000	5,1289	0,01533375	1,19	1,0575	1	0,045	89000
	29	230	230	325,2691193	5,05	0,0139	25000	5,5045	0,017375	1,09	1,25	1	0,045	89000
	30	230	230	325,2691193	9,14	0,012	25000	9,4142	0,0156	1,03	1,3	1	0,045	89000
	31	230	230	325,2691193	9,7	0,0128	25000	12,901	0,02070784	1,33	1,6178	1	0,045	89000

t,mat[mm]	fc,mat[Mpa]	fmd,theo [Mpa]	k'	fl,eff	$\alpha 1$	γ_s [Kg/m^3]	$\alpha 2$	$\alpha 3$	KH	Kmat	fl	pmat	efu	$\alpha 4$	emd,theo	fmd,theo/fmd,exp	emd,the/emd,exp
7	22,1	24,16272871	1,8	0,007673	0,5	1800	1	1	1	0,056255	0,1364	0,18666667	0,0015	1,81	/	0,8327381	/
7	4,06	23,5401212	1,8	0,000259	0,5	1800	1	1	1	0,001899	0,1364	0,18666667	0,0015	1,81	/	0,779835725	/
7	20,1	24,09370349	1,8	0,006347	0,5	1800	1	1	1	0,046534	0,1364	0,18666667	0,0015	1,81	/	0,720031782	/
7	22,1	24,19664416	1,8	0,008371	0,5	1800	1	1	1	0,056255	0,1488	0,18666667	0,0015	1,81	/	0,738603302	/
7	4,06	23,54635182	1,8	0,000283	0,5	1800	1	1	1	0,001899	0,1488	0,18666667	0,0015	1,81	/	0,774041809	/
7	20,1	24,12454966	1,8	0,006924	0,5	1800	1	1	1	0,046534	0,1488	0,18666667	0,0015	1,81	/	0,741700475	/
10	22,1	25,00946425	1,8	0,034167	0,5	1800	1	1	1	0,114807	0,2976	0,26666667	0,0015	1,81	/	0,639988337	/
10	4,06	23,69567533	1,8	0,001153	0,5	1800	1	1	1	0,003875	0,2976	0,26666667	0,0015	1,81	/	0,688867822	/
10	20,1	24,86381137	1,8	0,028262	0,5	1800	1	1	1	0,094968	0,2976	0,26666667	0,0015	1,81	/	0,647900025	/
7	22,1	17,70016761	1,8	0,014886	0,5	1800	1	1	1	0,109139	0,1364	0,18666667	0,0015	1,81	/	0,575727544	/
7	4,06	16,96537016	1,8	0,000502	0,5	1800	1	1	1	0,003683	0,1364	0,18666667	0,0015	1,81	/	0,631152164	/
7	20,1	17,61870448	1,8	0,012314	0,5	1800	1	1	1	0,090279	0,1364	0,18666667	0,0015	1,81	/	0,616901417	/
10	4,15	6,100438931	1,8	0,000749	0,5	1800	1	1	1	0,01113	0,067266949	0,11299435	0,0015	1,81	/	0,962396499	/
10	7,26	6,190695576	1,8	0,002291	0,5	1800	1	1	1	0,034061	0,067266949	0,11299435	0,0015	1,81	/	0,790254484	/
10	22,93	6,64546137	1,8	0,022856	0,5	1800	1	1	1	0,33978	0,067266949	0,11299435	0,0015	1,81	/	0,594268003	/
4	16,9	28,8554375	1,8	0,00026	0,5	1800	1	1	1	0,012225	0,021254168	0,11201143	0,0015	2,81	/	0,799319598	/
4	16,9	32,47061013	1,8	0,000278	0,5	1800	1	1	1	0,013086	0,021254168	0,11201143	0,0015	3,81	/	0,776808855	/
4	16,9	26,41284599	1,8	0,000534	0,5	1800	1	1	1	0,02511	0,021254168	0,11201143	0,0015	4,81	/	0,763377052	/
4	16,9	25,56377209	1,8	0,000326	0,5	1800	1	1	1	0,01965	0,01658546	0,0874069	0,0015	5,81	/	0,665723232	/
4	16,9	20,49833266	1,8	0,000598	0,5	1800	1	1	1	0,03606	0,01658546	0,0874069	0,0015	6,81	/	0,548083761	/
4	16,9	20,51239593	1,8	0,000686	0,5	1800	1	1	1	0,041355	0,01658546	0,0874069	0,0015	7,81	/	0,539799893	/
4	16,9	11,02237112	1,8	0,001413	0,5	1800	1	1	1	0,106163	0,013311181	0,07015115	0,0015	8,81	/	0,301982771	/
4	16,9	6,217475936	1,8	0,005273	0,5	1800	1	1	1	0,396103	0,013311181	0,07015115	0,0015	9,81	/	0,182330673	/
10	60	9,198872188	1,8	1,711572	0,5	1800	1	1	1	46,33553	0,036938643	0,12297509	0,0015	15,81	/	1,179176294	/
10	60	9,707142763	1,8	1,32557	0,5	1800	1	1	1	35,88573	0,036938643	0,12297509	0,0015	16,81	/	1,151021849	/
10	60	12,70320038	1,8	0,428735	0,5	1800	1	1	1	11,60669	0,036938643	0,12297509	0,0015	17,81	/	1,069112976	/
10	60	13,25459327	1,8	0,402034	0,5	1800	1	1	1	10,88384	0,036938643	0,12297509	0,0015	18,81	/	1,012187344	/
10	60	9,782490122	1,8	2,144607	0,5	1800	1	1	1	58,05863	0,036938643	0,12297509	0,0015	19,81	/	1,907327131	/
10	60	10,23169367	1,8	1,640994	0,5	1800	1	1	1	44,42487	0,036938643	0,12297509	0,0015	20,81	/	1,858787114	/
10	60	13,08308481	1,8	0,525026	0,5	1800	1	1	1	14,21347	0,036938643	0,12297509	0,0015	21,81	/	1,389718172	/
10	60	13,61433651	1,8	0,487528	0,5	1800	1	1	1	13,19832	0,036938643	0,12297509	0,0015	22,81	/	1,055293118	/

Tabella 31_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante Balsamo et al. (2018)

Come ben visibile in **Tabella 31**, sono stati riportati anche i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione a provino già confinato. Questo aspetto risulta essere molto importante, in quanto rende immediata una possibile comparazione con i vari ottenuti per via teorica attraverso il modello analitico relativo a *Balsamo et al. (2018)*.

Infatti, seguendo questo filo logico, si va ad estrarre un primo grafico dove si va ad evidenziare la relazione tra resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

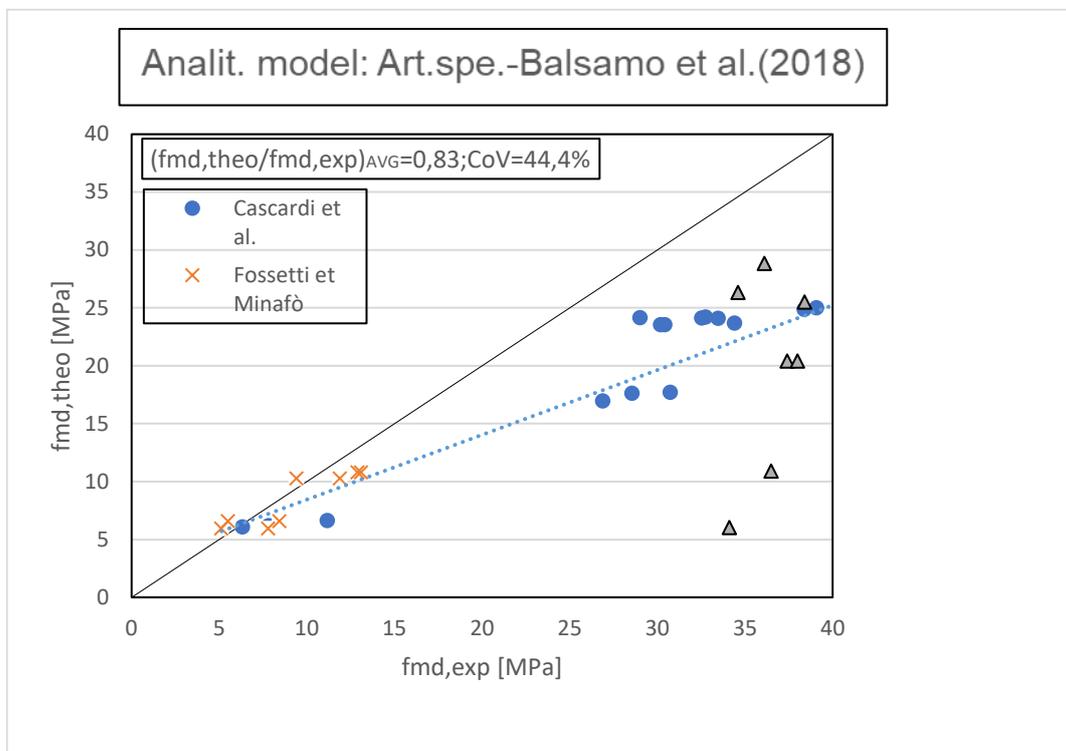


Figura 100_ Relazione Resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Il grafico a dispersione, riportato nella **Figura 100**, tende a fornire delle informazioni molto importanti circa il confronto tra valore teorico e sperimentale della resistenza cilindrica a provino confinato estratto mediante il modello analitico di *Balsamo et al. (2018)*: il modello tende a sottostimare i dati relativi a tutti e tre gli articoli trattati. Si nota, che gli unici casi di sovrastima si registrano in corrispondenza di provini meno performanti allo stato di fatto. Quindi si può asserire che il modello tende ad essere conservativo man mano che aumenta la resistenza del provino non confinato.

Infatti, risulta essere ben visibile dalla linea di tendenza in **Figura 100**, tali conclusioni possono essere ben attestate dal posizionamento dei diversi punti nel grafico. Infine, come fase ultima dello studio del modello analitico di *Balsamo et al. (2018)*, andiamo a stilare degli istogrammi dove si evidenzia la variazione del comportamento del rapporto dei parametri teorici e sperimentali in funzione del singolo provino esaminato. Questo step, viene eseguito in modo singolo per ognuno dei tre articoli.

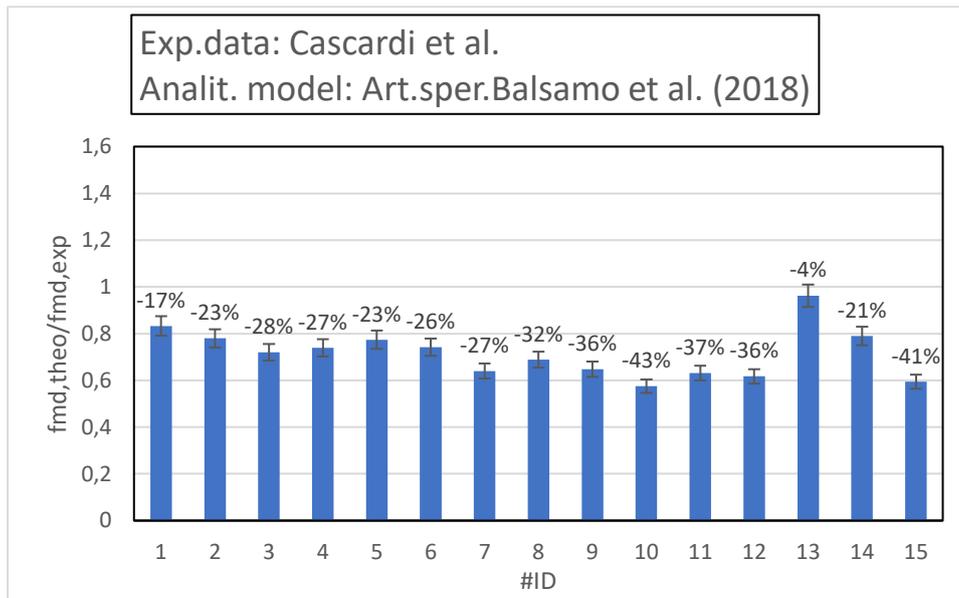


Figura 101_Articolo sperimentale di *Cascardi et al. (2014)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Nello studio della resistenza a compressione per provino confinato, la **Figura 101** presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione del discostamento da parte dei valori teorici nei confronti dei valori sperimentali. Come è possibile attestare, la variazione del rapporto tende ad essere irregolare e ciò risulta essere dovuto al valore assunto dalla rigidità e dallo spessore del rinforzo applicato. Tra i due, il parametro più incisivo risulta la rigidità della fibra. Difatti, i valori più alti di scarto rispetto al valore unitario tendono ad essere presenti a valori alti del modulo elastico della fibra, mentre a valori bassi dello scarto vi è presenza di basso scarto.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra -43% e -4%. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con grafico riportato in **Figura 100**, dove appunto va a mostrare il posizionamento dei punti, che risultano essere al di sotto della retta di riferimento di equazione $y=x$.

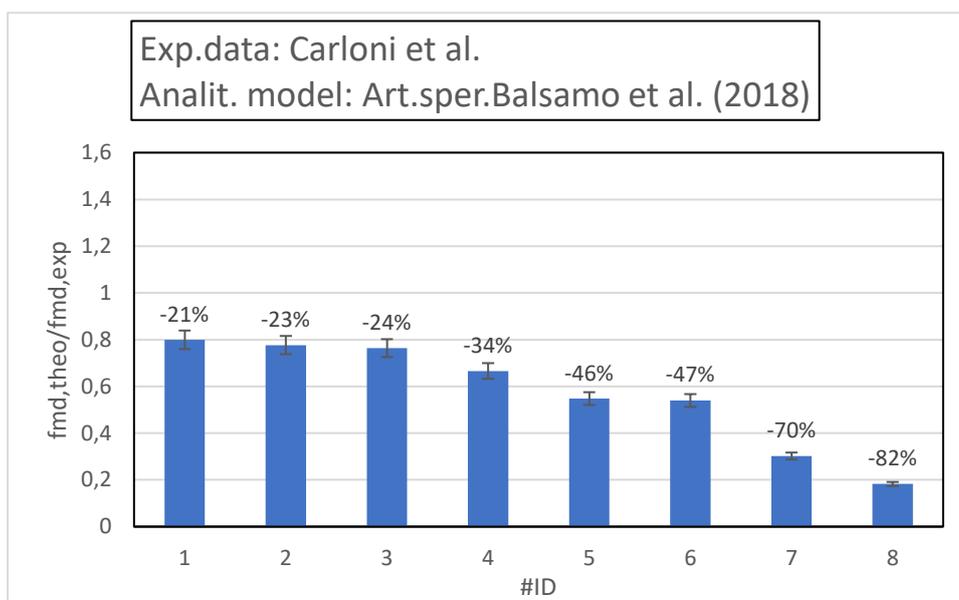


Figura 102_Articolo sperimentale di *Carlioni et al. (2014)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Per la trattazione di *Carlioni et al. (2014)*, la **Figura 102** presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate e del relativo scarto rispetto al valore

unitario che andrebbe a sancire, così, la coincidenza tra i due parametri interessati. Come è possibile attestare, la variazione del rapporto tende ad essere irregolare e ciò risulta essere conseguenza della dimensione geometrica della sezione trasversale del provino. Difatti, i valori più bassi di scarto, rispetto al valore unitario, tendono ad essere presenti con i provini di dimensioni 102x100mm, mentre a valori alti dello scarto vi è presenza di una sezione 102x204 mm. Si può asserire, quindi, che il modello tende a fornire dei valori di resistenza cilindrica che sono tutti cautelativi rispetto ai dati sperimentali e risulta esserlo ancora di più nell' ipotesi di provini con dimensioni geometriche elevate.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra -82%% e -21 %. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con il grafico riportato in **Figura 100**, quale mostra il posizionamento dei valori in questione, quali risultano essere tutti al di sotto rispetto alla retta di riferimento di equazione $y=x$

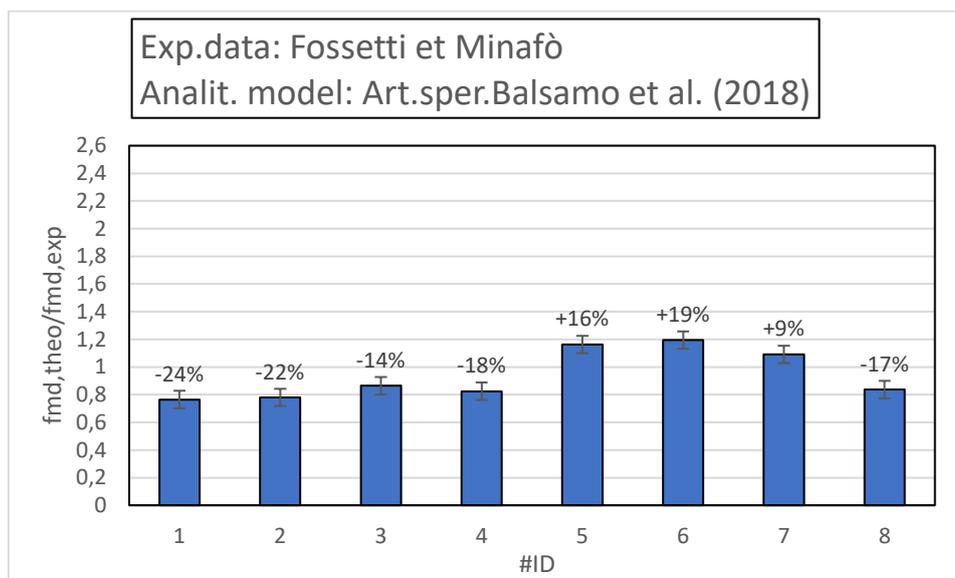


Figura 103 _Articolo sperimentale di *Fossetti et al. (2016)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 103**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire, così, la coincidenza tra i due parametri interessati. Come è possibile attestare, la variazione del rapporto tende ad essere irregolare e ciò risulta essere conseguenza della stratigrafia del rinforzo. Difatti, i valori di discostamento più elevati sono stati registrati con il rinforzo costituito dalla malta *M3+fibra di carbonio*, mentre quelli più bassi sono ottenuti con i provini rinforzati con malta *M1+fibra di acciaio*.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra +1%% e 90 %. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con il grafico riportato in **Figura 100**, quale mostra che tutti i punti risultano essere al di sopra della retta di riferimento di equazione $y=x$.

CIRCOLARE CNR DT 215-2018

In tale paragrafo, si va a trattare il modello analitico relativo alla *Circolare CNR DT 215 (2018)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in muratura mediante *FRCM*, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

CARATTERISTICHE PROVINI IN CLS															CARATTERISTICHE DEL RINFORZO-FRCM				
#ID	Ys [kg/m³]	Base [mm]	Altezza [mm]	H colonna[mm]	Diametro [mm]	Ac [mm²]	FC	fm0,AVG [Mpa]	fm0,exp[Mpa]	εm0,exp	Ec0	fmd,exp	εmd,exp	fmd,exp/fm0,exp	εmd,exp/εm0,exp	Ef [MPa]	tf [mm]	euf	
CASCARDI ET AL. (2018)	1	1800	/	/	300	150	17662,5	1	23,4	23,4	0,0008487	27570	29,016	/	1,24	/	110000	0,062	0,005
	2	1800	/	/	300	150	17662,5	1	23,4	23,4	0,0008487	27570	30,186	/	1,29	/	110000	0,062	0,005
	3	1800	/	/	300	150	17662,5	1	23,4	23,4	0,0008487	27570	33,462	/	1,43	/	110000	0,062	0,005
	4	1800	/	/	300	150	17662,5	1	23,4	23,4	0,0008487	27570	32,76	/	1,4	/	120000	0,062	0,005
	5	1800	/	/	300	150	17662,5	1	23,4	23,4	0,0008487	27570	30,42	/	1,3	/	120000	0,062	0,005
	6	1800	/	/	300	150	17662,5	1	23,4	23,4	0,0008487	27570	32,526	/	1,39	/	120000	0,062	0,005
	7	1800	/	/	300	150	17662,5	1	23,4	23,4	0,0008487	27570	39,078	/	1,67	/	120000	0,124	0,005
	8	1800	/	/	300	150	17662,5	1	23,4	23,4	0,0008487	27570	34,398	/	1,47	/	120000	0,124	0,005
	9	1800	/	/	300	150	17662,5	1	23,4	23,4	0,0008487	27570	38,376	/	1,64	/	120000	0,124	0,005
	10	1800	/	/	300	150	17662,5	1	16,8	16,8	0,0007192	23360	30,744	/	1,83	/	110000	0,062	0,005
	11	1800	/	/	300	150	17662,5	1	16,8	16,8	0,0007192	23360	26,88	/	1,6	/	110000	0,062	0,005
	12	1800	/	/	300	150	17662,5	1	16,8	16,8	0,0007192	23360	28,56	/	1,7	/	110000	0,062	0,005
	13	1800	/	/	300	150	17662,5	1	5,98	5,98	0,02392	250	6,3388	/	1,06	/	31750	0,25	0,005
	14	1800	/	/	300	150	17662,5	1	5,98	5,98	0,02392	250	7,8338	/	1,31	/	31750	0,25	0,005
	15	1800	/	/	300	150	17662,5	1	5,98	5,98	0,02392	250	11,1826	/	1,87	/	31750	0,25	0,005
CARLONI ET AL. (2015)	16	1800	102	100	960	142,8425707	16017,14	1	28,7	28,7	0,0052	25000	36,1	0,0138	1,257839721	2,653846154	11000	0,092	0,005
	17	1800	102	100	960	142,8425707	16017,14	1	32,3	32,3	0,0059	25000	41,8	0,0077	1,294117647	1,305084746	11000	0,092	0,005
	18	1800	102	100	960	142,8425707	16017,14	1	26,2	26,2	0,0047	25000	34,6	0,0152	1,320610687	3,234042553	11000	0,092	0,005
	19	1800	102	152	960	183,0519052	26303,78	1	25,4	25,4	0,0078	25000	38,4	0,0165	1,511811024	2,115384615	11000	0,092	0,005
	20	1800	102	152	960	183,0519052	26303,78	1	20,3	20,3	0,0056	25000	37,4	0,0159	1,842364532	2,839285714	11000	0,092	0,005
	21	1800	102	152	960	183,0519052	26303,78	1	20,3	20,3	0,0047	25000	38	0,0096	1,871921182	2,042553191	11000	0,092	0,005
	22	1800	102	204	960	228,0789337	40835,7	1	10,8	10,8	0,0035	25000	36,5	0,0042	3,37962963	1,2	11000	0,092	0,005
	23	1800	102	204	960	228,0789337	40835,7	1	5,9	5,9	0,0045	25000	34,1	0,0083	5,779661017	1,844444444	11000	0,092	0,005
	FOSSETTI ET MINAFO' (24)	24	1800	230	230	/	325,2691193	83053	1	4,31	4,31	0,0145	25000	7,8011	0,02291	1,81	1,58	89000	0,045
25		1800	230	230	/	325,2691193	83053	1	5,05	5,05	0,0139	25000	8,4335	0,01946	1,67	1,4	89000	0,045	0,005
26		1800	230	230	/	325,2691193	83053	1	9,14	9,14	0,012	25000	11,882	0,02952	1,3	2,46	89000	0,045	0,005
27		1800	230	230	/	325,2691193	83053	1	9,7	9,7	0,0128	25000	13,095	0,030848	1,35	2,41	89000	0,045	0,005
28		1800	230	230	/	325,2691193	83053	1	4,31	4,31	0,0145	25000	5,1289	0,01533375	1,19	1,0575	89000	0,045	0,005
29		1800	230	230	/	325,2691193	83053	1	5,05	5,05	0,0139	25000	5,5045	0,017375	1,09	1,25	89000	0,045	0,005
30		1800	230	230	/	325,2691193	83053	1	9,14	9,14	0,012	25000	9,4142	0,0156	1,03	1,3	89000	0,045	0,005
31		1800	230	230	/	325,2691193	83053	1	9,7	9,7	0,0128	25000	12,901	0,02070784	1,33	1,6178	89000	0,045	0,005

fc,mat[Mpa]	nf	Ym	PROGETTO DELLO SPESSORE					CALCOLO DELLA PRESSIONE EFFICACE DI CONFINAMENTO							COLO DELLA RESISTENZA A COMPRESIONE DELLA MURATURA CONFINA			
			ηa	Kmat	ρmat,min	tmat,min[mm]	tmat,[mm]	ρmat	KH	Kmat	eud,rid	f1[Mpa]	f1,eff[Mpa]	k'	fmd,theo	emd,theo	fmd,theo/fmd,exp	emd,theo/emd,exp
22,1	1	1,5	0,8	1,5	0,96389544	36,14607901	7	0,186666667	1	0,056255495	0,000150015	0,013641333	0,013641333	1,8	24,41697162	0,000221972	0,841500262	/
4,06	1	1,5	0,8	1,5	5,246820007	196,7557503	7	0,186666667	1	0,001898596	5,06292E-06	0,000460388	0,000460388	1,8	23,58682827	0,021442571	0,781383034	/
20,1	1	1,5	0,8	1,5	1,059805434	39,74270379	7	0,186666667	1	0,046534229	0,000124091	0,011284033	0,011284033	1,8	24,32493799	0,02211358	0,726942143	/
22,1	1	1,5	0,8	1,5	0,96389544	36,14607901	7	0,186666667	1	0,056255495	0,000150015	0,014881454	0,014881454	1,8	24,46219221	0,02038516	0,746709164	/
4,06	1	1,5	0,8	1,5	5,246820007	196,7557503	7	0,186666667	1	0,001898596	5,06292E-06	0,000502242	0,000502242	1,8	23,59513576	0,019662613	0,775645489	/
20,1	1	1,5	0,8	1,5	1,059805434	39,74270379	7	0,186666667	1	0,046534229	0,000124091	0,012309855	0,012309855	1,8	24,36606622	0,020305055	0,749125814	/
22,1	1	1,5	0,8	1,5	0,96389544	36,14607901	10	0,266666667	1	0,114807133	0,000306152	0,060740627	0,060740627	1,8	25,54595233	0,021288294	0,653716985	/
4,06	1	1,5	0,8	1,5	5,246820007	196,7557503	10	0,266666667	1	0,003874685	1,03325E-05	0,002049967	0,002049967	1,8	23,79423378	0,019828528	0,691733059	/
20,1	1	1,5	0,8	1,5	1,059805434	39,74270379	10	0,266666667	1	0,094967814	0,000253248	0,050244305	0,050244305	1,8	25,3517485	0,021126457	0,660614668	/
22,1	1	1,5	0,8	1,5	0,692027496	25,95103108	7	0,186666667	1	0,109138531	0,000291036	0,026464881	0,026464881	1,8	18,00022348	0,01636384	0,585487363	/
4,06	1	1,5	0,8	1,5	3,766947697	141,2605387	7	0,186666667	1	0,003683372	9,82233E-06	0,000893177	0,000893177	1,8	17,02049354	0,015473176	0,633202885	/
20,1	1	1,5	0,8	1,5	0,760885953	28,53322323	7	0,186666667	1	0,090278778	0,000240743	0,021891601	0,021891601	1,8	17,89160597	0,016265096	0,626456792	/
4,15	1	1,5	0,8	1,5	1,31177524	49,19157151	10	0,266666667	1	0,06198832	0,000165302	0,017494481	0,017494481	1,8	6,56220192	0,020668353	1,035243567	/
7,26	1	1,5	0,8	1,5	0,749843973	28,11914901	10	0,266666667	1	0,189708554	0,000505889	0,05353997	0,05353997	1,8	6,998502635	0,022042528	0,893372646	/
22,93	1	1,5	0,8	1,5	0,23741244	8,902966497	10	0,266666667	1	1,892438527	0,004	0,423333333	0,423333333	1,8	8,843942737	0,027854938	0,790866412	/
16,9	1	1,5	0,8	1,5	1,545971681	55,20764227	4	0,112011426	1	0,007874316	2,09982E-05	0,000297533	0,000297533	1,8	28,86633386	0,262421217	0,799621437	/
16,9	1	1,5	0,8	1,5	1,739891473	62,1326427	4	0,112011426	1	0,006216867	1,65783E-05	0,000234905	0,000234905	1,8	32,45679072	0,295061734	0,776478247	/
16,9	1	1,5	0,8	1,5	1,411305158	50,3986142	4	0,112011426	1	0,009448743	2,51966E-05	0,000357023	0,000357023	1,8	26,37408885	0,239764444	0,762256903	/
16,9	1	1,5	0,8	1,5	1,368211871	62,61344742	4	0,087406902	1	0,006121756	1,63247E-05	0,000180502	0,000180502	1,8	25,52187927	0,232017084	0,664632273	/
16,9	1	1,5	0,8	1,5	1,093492164	50,04145601	4	0,087406902	1	0,009584101	2,55576E-05	0,00028259	0,00028259	1,8	20,43633228	0,185784839	0,546425997	/
16,9	1	1,5	0,8	1,5	1,093492164	50,04145601	4	0,087406902	1	0,009584101	2,55576E-05	0,00028259	0,00028259	1,8	20,43633228	0,185784839	0,537798218	/
16,9	1	1,5	0,8	1,5	0,581759378	33,17176466	4	0,070151152	1	0,021810925	5,81625E-05	0,000516141	0,000516141	1,8	10,93439047	0,09940355	0,299572342	/
16,9	1	1,5	0,8	1,5	0,317812994	18,12161217	4	0,070151152	1	0,073083204	0,000194889	0,001729464	0,001729464	1,8	6,081825309	0,055289321	0,178352648	/
60	1	1,5	0,8	1,5	0,065393166	5,317594351	10	0,122975092	1	5,304700272	0,004	0,098503049	0,098503049	1,8	5,482832459	0,006160486	0,702828122	/
60	1	1,5	0,8	1,5	0,076620763	6,230591989	10	0,122975092	1	3,863960111	0,004	0,098503049	0,098503049	1,8	6,319530184	0,007100596	0,749336596	/
60	1	1,5	0,8	1,5	0,138675994	11,27675461	10	0,122975092	1	1,179568046	0,003145515	0,077460699	0,077460699	1,8	10,6545594	0,011971415	0,896697475	/
60	1	1,5	0,8	1,5	0,147172554	11,96767174	10	0,122975092	1	1,047301974	0,002792805	0,068774958	0,068774958	1,8	11,17019026	0,012550776	0,853011856	/
60	1	1,5	0,8	1,5	0,065393166	5,317594351	10	0,122975092	1	5,304700272	0,004	0,098503049	0,098503049	1,8	5,482832459	0,006160486	1,069007479	/
60	1	1,5	0,8	1,5	0,076620763	6,230591989	10	0,122975092	1	3,863960111	0,004	0,098503049	0,098503049	1,8	6,319530184	0,007100596	1,148066161	/
60	1	1,5	0,8	1,5	0,138675994	11,27675461	10	0,122975092	1	1,179568046	0,003145515	0,077460699	0,077460699	1,8	10,6545594	0,011971415	1,131754095	/
60	1	1,5	0,8	1,5	0,147172554	11,96767174	10	0,122975092	1	1,047301974	0,002792805	0,068774958	0,068774958	1,8	11,17019026	0,012550776	0,865839102	/

Tabella 32_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante Circolare CNR DT215-2018

Come ben visibile in **Tabella 32**, sono stati riportati anche i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione a provino già confinato. Questo aspetto risulta essere molto importante in quanto rende immediata una possibile comparazione con i vari ottenuti per via teorica attraverso il modello analitico relativo alla *Circolare CNR DT215 (2018)*. Grazie ai risultati a disposizione, si va ad estrarre un primo grafico dove si va ad evidenziare la relazione tra resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

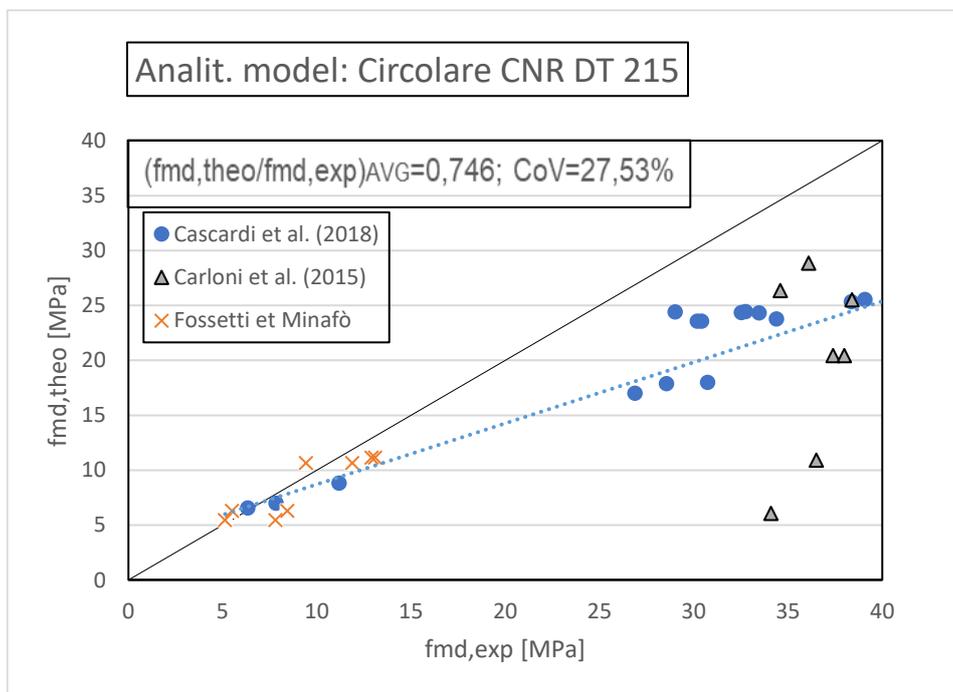


Figura 104_ Relazione Resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Il grafico a dispersione, riportato nella **Figura 104**, tende a fornire delle informazioni molto importanti circa il confronto tra valore teorico e sperimentale della resistenza cilindrica a provino confinato estratto mediante il modello analitico della *Circolare CNR DT215-2018*: infatti, il modello tende a sottostimare tutti i dati appartenenti ai tre articoli sperimentali di riferimento. Però, eccezione viene fatta ad alcuni punti, facenti parte degli articoli di *Fossetti et al. (2016)* e *Cascardi et al. (2018)*, dove si registra una sovrastima per entità fino a 10 Mpa.

Infatti, risulta essere ben visibile dalla linea di tendenza in **Figura 104**, tali conclusioni possono essere ben attestate dal posizionamento dei diversi punti nel grafico.

Infine, come fase ultima dello studio del modello analitico della *Circolare CNR DT215-2018*, si va a stilare degli istogrammi dove si evidenzia la variazione del comportamento del rapporto dei parametri teorici e sperimentali in funzione del singolo provino esaminato. Questo step, viene eseguito in modo singolo per ognuno dei tre articoli.

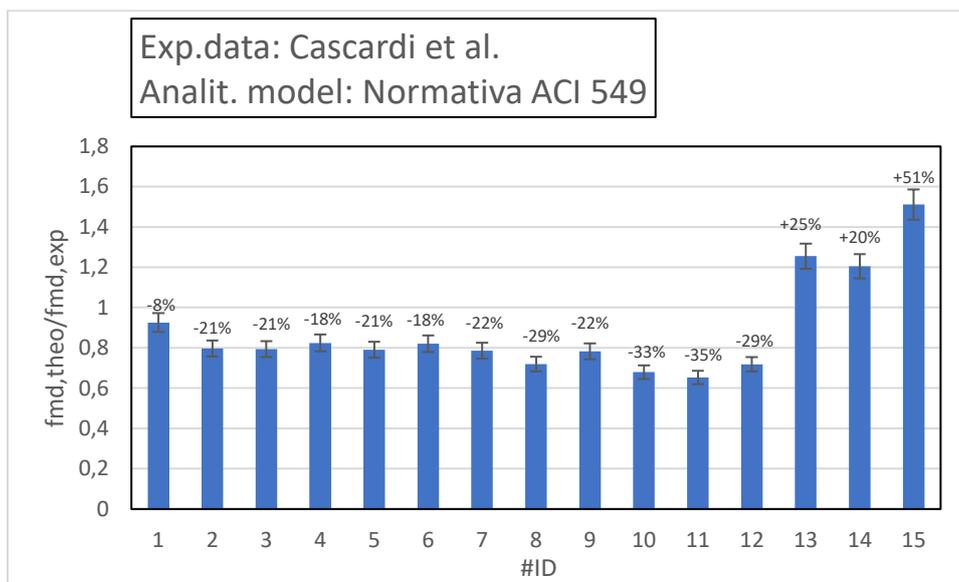


Figura 105_Articolo sperimentale di *Cascardi et al. (2014)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 105**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire, così, la coincidenza tra i due parametri interessati. Come è possibile attestare, la variazione del rapporto tende ad essere irregolare e ciò risulta essere dovuto al valore assunto dalla rigidità e dallo spessore complessivo del materiale di rinforzo. Da sottolineare che, tra i due parametri citati, il più incisivo risulta essere la rigidità della fibra. Infatti, il modello tende a restituire delle sovrastime più tangibili nelle casistiche di applicazione di rinforzi con elevata rigidità. Inoltre, quindi, il modello tende a sovrastimare i valori di resistenza cilindrica e tende ad essere meno cautelativo nella casistica di E_f basso, come mostrato negli ultimi tre provini testati.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra -42% e +3.5%. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con grafico riportato in **Figura 104**, dove appunto va a mostrare il posizionamento dei punti, che risultano essere al di sotto della retta di riferimento di equazione $y=x$.

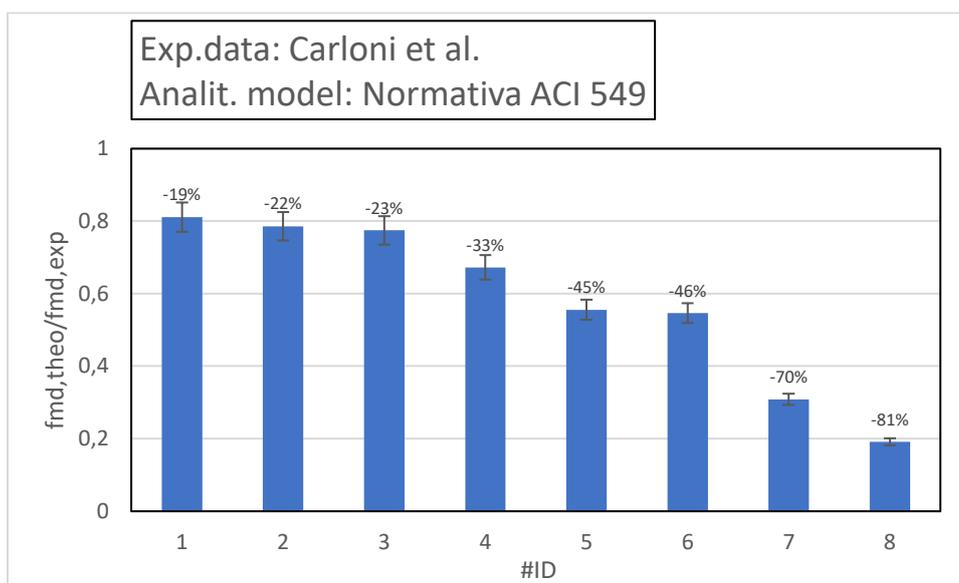


Figura 106_Articolo sperimentale di *Carloni et al. (2014)*: *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 106**, presenta un grafico che tratta la variazione dello scarto tra il valore teorico e quello sperimentale della resistenza a compressione del provino confinato nell'articolo di *Carloni et al. (2014)*. Come è possibile attestare, il discostamento tende ad essere irregolare e ciò risulta essere conseguenza del dimensionamento

geometrico dei provini. Difatti, i valori più bassi di scarto tendono ad essere presenti nei provini di dimensioni 102x100mm, mentre scarti più alti per provini con sezione 102x204 mm. Quindi, il modello tende a fornire dei valori di resistenza cilindrica più cautelativi e ciò è accentuato nei provini con minore dimensione geometrica.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra -83% e -21 %. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con il grafico riportato in **Figura 104**, quale mostra il posizionamento dei valori in questione, quali risultano essere tutti al di sotto rispetto alla retta di riferimento di equazione $y=x$

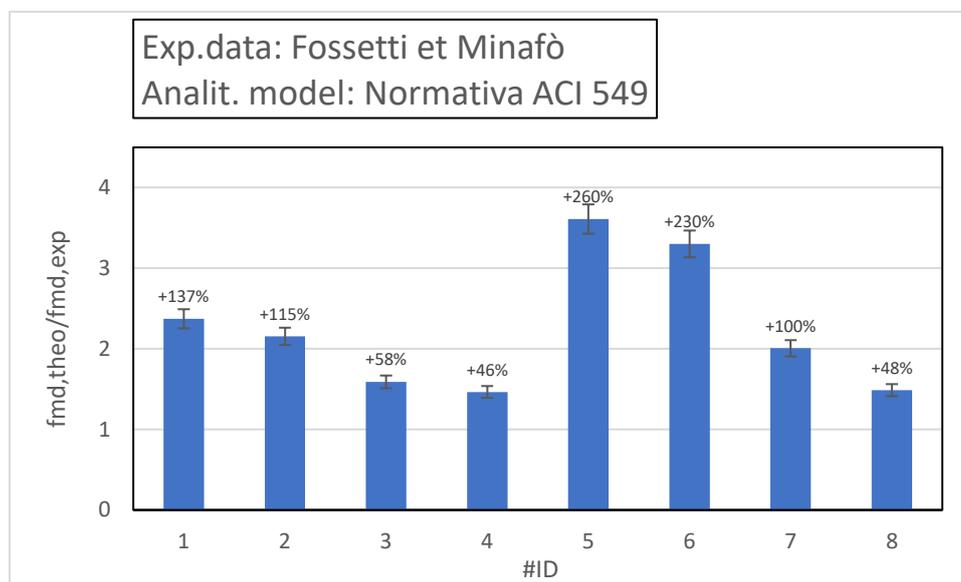


Figura 107_Articolo sperimentale di Fossetti et al. (2016): *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 107**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire, così, la coincidenza tra i due parametri interessati. Come è possibile attestare, la variazione del rapporto tende ad essere irregolare e ciò risulta essere conseguenza della stratigrafia del rinforzo. Difatti, i valori di discostamento più elevati sono stati registrati con il rinforzo costituito dalla malta *M1*+fibra di carbonio, mentre quelli più bassi sono ottenuti con i provini rinforzati con malta *M3*+fibra di carbonio.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra -30% e +14 %. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con il grafico riportato in **Figura 104**, quale mostra il posizionamento dei valori in questione: i punti, relativi ai provini rinforzati con malta *M1*, risultano essere al di sotto della retta di riferimento di equazione $y=x$, mentre sono posizionati al di sopra i provini confinati con malta *M3*.

NORMATIVA ACI-6R (2020)

In tale paragrafo, si va a trattare il modello analitico relativo alla *Normativa ACI 549-6R (2020)*, quale vedrà l'inserimento dei dati sperimentali degli articoli scelti, e descritti nel capitolo 3 nella sezione del confinamento di colonne in muratura mediante *FRCM*, riuscendo ad ottenere dei risultati analitici relativi all'incremento prestazionale di vari provini:

CARATTERISTICHE PROVINI IN MURATURA												
#ID	rc [mm]	Base [mm]	Altezza [mm]	H colonna[mm]	Diametro [mm]	Ac [mm^2]	εc0,exp	Em0	fm0,exp [Mpa]	fmd,exp	ecc,exp	
CASCARDI ET AL. (2018)	1	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000848749	27570	23,4	29,016	/
	2	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000848749	27570	23,4	30,186	/
	3	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000848749	27570	23,4	33,462	/
	4	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000848749	27570	23,4	32,76	/
	5	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000848749	27570	23,4	30,42	/
	6	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000848749	27570	23,4	32,526	/
	7	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000848749	27570	23,4	39,078	/
	8	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000848749	27570	23,4	34,398	/
	9	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000848749	27570	23,4	38,376	/
	10	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000719178	23360	16,8	30,744	/
	11	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000719178	23360	16,8	26,88	/
	12	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,000719178	23360	16,8	28,56	/
	13	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,02392	250	5,98	6,3388	/
	14	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,02392	250	5,98	7,8338	/
	15	0	106,0660172	106,0660172	300	150	17662,5	0,02392	250	5,98	11,1826	/
CARLONI ET AL. (2015)	16	10	102	100	/	142,8425707	10200	0,0052	25000	28,7	36,1	0,0138
	17	10	102	100	/	142,8425707	10200	0,0059	25000	32,3	41,8	0,0077
	18	10	102	100	/	142,8425707	10200	0,0047	25000	26,2	34,6	0,0152
	19	10	102	152	/	183,0519052	15504	0,0078	25000	25,4	38,4	0,0165
	20	10	102	152	/	183,0519052	15504	0,0056	25000	20,3	37,4	0,0159
	21	10	102	152	/	183,0519052	15504	0,0047	25000	20,3	38	0,0096
	22	10	102	204	/	228,0789337	20808	0,0035	25000	10,8	36,5	0,0042
	23	10	102	204	/	228,0789337	20808	0,0045	25000	5,9	34,1	0,0083
FOSSETTI ET MINAFO' (2012)	24	20	230	230	960	325,2691193	52900	0,0145	25000	4,31	7,8011	0,02291
	25	20	230	230	960	325,2691193	52900	0,0139	25000	5,05	8,4335	0,01946
	26	20	230	230	960	325,2691193	52900	0,012	25000	9,14	11,882	0,02952
	27	20	230	230	960	325,2691193	52900	0,0128	25000	9,7	13,095	0,030848
	28	20	230	230	960	325,2691193	52900	0,0145	25000	4,31	5,1289	0,01533375
	29	20	230	230	960	325,2691193	52900	0,0139	25000	5,05	5,5045	0,017375
	30	20	230	230	960	325,2691193	52900	0,012	25000	9,14	9,4142	0,0156
	31	20	230	230	960	325,2691193	52900	0,0128	25000	9,7	12,901	0,02070784

CARATTERISTICHE DEL RINFORZO-FRCM										PROVINO CONFINATO														
fmd_exp/fmd	emd_exp/em0,exp	efu	Ef [MPa]	tf [mm]	α1	α2	Ym	elim	efd	t,mat[mm]	fc,mat[Mpa]	nf	Yk	Ae/Am	Kα	pmat	K	Kv	f1[MPa]	f1,eff[MPa]	fmd,theo [Mpa]	emd,theo	fmd,theo/fmd,ex	emd,theo/emd,exp
1,24	/	0,005	110000	0,062	1,5	1	1	0,012	0,005	7	22,1	1	1	0,57537155	1	0,186667	1,057778	1	0,45466667	0,45466667	26,85023698	0,001712688	0,925359697	/
1,29	/	0,005	110000	0,062	1,5	1	1	0,012	0,005	7	4,06	1	1	0,57537155	1	0,186667	0,194325	1	0,45466667	0,45466667	24,03384444	0,001712688	0,796191759	/
1,43	/	0,005	110000	0,062	1,5	1	1	0,012	0,005	7	20,1	1	1	0,57537155	1	0,186667	0,962051	1	0,45466667	0,45466667	26,53799834	0,001712688	0,793078666	/
1,4	/	0,005	120000	0,062	1,5	1	1	0,012	0,005	7	22,1	1	1	0,57537155	1	0,186667	1,057778	1	0,496	0,496	27,00365499	0,001752649	0,824287393	/
1,3	/	0,005	120000	0,062	1,5	1	1	0,012	0,005	7	4,06	1	1	0,57537155	1	0,186667	0,194325	1	0,496	0,496	24,06202893	0,001752649	0,790993719	/
1,39	/	0,005	120000	0,062	1,5	1	1	0,012	0,005	7	20,1	1	1	0,57537155	1	0,186667	0,962051	1	0,496	0,496	26,67753237	0,001752649	0,820190997	/
1,67	/	0,005	120000	0,124	1,5	1	1	0,012	0,005	10	22,1	1	1	0,57537155	1	0,266667	1,511111	1	0,992	0,992	30,68048252	0,002232175	0,785108821	/
1,47	/	0,005	120000	0,124	1,5	1	1	0,012	0,005	10	4,06	1	1	0,57537155	1	0,266667	0,277607	1	0,992	0,992	24,73750041	0,002232175	0,719155195	/
1,64	/	0,005	120000	0,124	1,5	1	1	0,012	0,005	10	20,1	1	1	0,57537155	1	0,266667	1,374359	1	0,992	0,992	30,02161533	0,002232175	0,782301838	/
1,83	/	0,005	110000	0,062	1,5	1	1	0,012	0,005	7	22,1	1	1	0,57537155	1	0,186667	1,473333	1	0,45466667	0,45466667	20,87194791	0,001637703	0,678895001	/
1,6	/	0,005	110000	0,062	1,5	1	1	0,012	0,005	7	4,06	1	1	0,57537155	1	0,186667	0,270667	1	0,45466667	0,45466667	17,54805921	0,001637703	0,652829584	/
1,7	/	0,005	110000	0,062	1,5	1	1	0,012	0,005	7	20,1	1	1	0,57537155	1	0,186667	1,34	1	0,45466667	0,45466667	20,50344583	0,001637703	0,717907767	/
1,06	/	0,005	31750	0,25	1,5	1	1	0,012	0,005	10	4,15	1	1	0,57537155	1	0,266667	1,110368	1	0,52916667	0,52916667	7,955212053	0,048438209	1,255002848	/
1,31	/	0,005	31750	0,25	1,5	1	1	0,012	0,005	10	7,26	1	1	0,57537155	1	0,266667	1,942475	1	0,52916667	0,52916667	9,435431206	0,048438209	1,204451378	/
1,87	/	0,005	31750	0,25	1,5	1	1	0,012	0,005	10	22,93	1	1	0,57537155	1	0,266667	6,135117	1	0,52916667	0,52916667	16,89364153	0,048438209	1,510707844	/
1,257839721	2,653846154	0,005	11000	0,092	1,5	1	1	0,012	0,005	4	16,9	1	1	0,5712367	1	0,112011	0,395748	1	0,07084723	0,070847227	29,26431392	0,007951342	0,810645815	/
1,294117647	1,305084746	0,005	11000	0,092	1,5	1	1	0,012	0,005	4	16,9	1	1	0,5712367	1	0,112011	0,35164	1	0,07084723	0,070847227	32,8319373	0,008994147	0,785453046	/
1,320610687	3,234042553	0,005	11000	0,092	1,5	1	1	0,012	0,005	4	16,9	1	1	0,5712367	1	0,112011	0,43351	1	0,07084723	0,070847227	26,79062396	0,007206817	0,77429549	/
1,511811024	2,115384615	0,005	11000	0,092	1,5	1	1	0,012	0,005	4	16,9	1	1	0,533185	1	0,087407	0,348939	1	0,05528487	0,055284866	25,81349471	0,011866779	0,672226425	/
1,842364532	2,839285714	0,005	11000	0,092	1,5	1	1	0,012	0,005	4	16,9	1	1	0,533185	1	0,087407	0,436604	1	0,05528487	0,055284866	20,76252882	0,008573913	0,555147829	/
1,871921182	2,042553191	0,005	11000	0,092	1,5	1	1	0,012	0,005	4	16,9	1	1	0,533185	1	0,087407	0,436604	1	0,05528487	0,055284866	20,76252882	0,007207936	0,546382337	/
3,37962963	1,2	0,005	11000	0,092	1,5	1	1	0,012	0,005	4	16,9	1	1	0,51339229	1	0,070151	0,658641	1	0,0443706	0,044370604	11,2559409	0,005452594	0,308381943	/
5,779661017	1,844444444	0,005	11000	0,092	1,5	1	1	0,012	0,005	4	16,9	1	1	0,51339229	1	0,070151	1,205649	1	0,0443706	0,044370604	6,516871104	0,007175822	0,191111059	/
1,81	1,58	0,018	89000	0,045	1,5	1	1	0,012	0,018	10	60	1	1	0,54505356	1	0,122975	10,2717	1	0,44326372	0,44326372	18,50750783	0,041473827	2,372422841	/
1,67	1,4	0,018	89000	0,045	1,5	1	1	0,012	0,018	10	60	1	1	0,54505356	1	0,122975	8,766541	1	0,44326372	0,44326372	18,16611038	0,037296853	2,154041665	/
1,3	2,46	0,018	89000	0,045	1,5	1	1	0,012	0,018	10	60	1	1	0,54505356	1	0,122975	4,843658	1	0,44326372	0,44326372	18,88939472	0,026381458	1,589748756	/
1,35	2,41	0,018	89000	0,045	1,5	1	1	0,012	0,018	10	60	1	1	0,54505356	1	0,122975	4,564024	1	0,44326372	0,44326372	19,16378542	0,027382948	1,463442949	/
1,19	1,0575	0,018	89000	0,045	1,5	1	1	0,012	0,018	10	60	1	1	0,54505356	1	0,122975	10,2717	1	0,44326372	0,44326372	18,50750783	0,041473827	3,608475078	/
1,09	1,25	0,018	89000	0,045	1,5	1	1	0,012	0,018	10	60	1	1	0,54505356	1	0,122975	8,766541	1	0,44326372	0,44326372	18,16611038	0,037296853	3,300228973	/
1,03	1,3	0,018	89000	0,045	1,5	1	1	0,012	0,018	10	60	1	1	0,54505356	1	0,122975	4,843658	1	0,44326372	0,44326372	18,88939472	0,026381458	2,006479013	/
1,33	1,6178	0,018	89000	0,045	1,5	1	1	0,012	0,018	10	60	1	1	0,54505356	1	0,122975	4,564024	1	0,44326372	0,44326372	19,16378542	0,027382948	1,48544961	/

Tabella 33_ Caratteristiche dei provini e risultati sperimentali finali mediante ACI 549-6R 2020

Come ben visibile in **Tabella 33**, sono stati riportati anche i valori sperimentali di resistenza cilindrica e deformazione a provino già confinato. Questo aspetto risulta essere molto importante in quanto rende immediata una possibile comparazione con i vari ottenuti per via teorica attraverso il modello analitico relativo alla Normativa ACI 549-6R (2020). Infatti, seguendo questo filo logico, si va ad estrarre un primo grafico dove si va ad evidenziare la relazione tra resistenza cilindrica del provino confinato ricavata sperimentalmente e per via teorica:

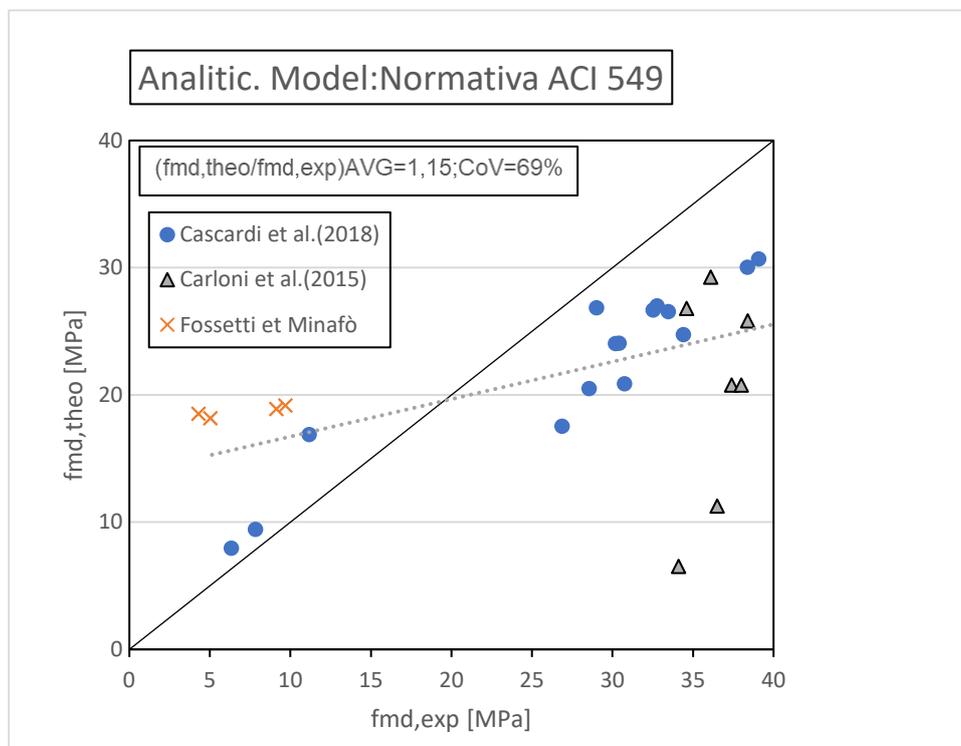


Figura 108_ Relazione Resistenza cilindrica confinata teorica- Resistenza cilindrica confinata sperimentale

Il grafico a dispersione, riportato nella **Figura 108**, tende a fornire delle informazioni molto importanti circa il confronto tra valore teorico e sperimentale della resistenza cilindrica a provino confinato estratto mediante il modello analitico della *Normativa ACI 549-6R (2020)*: infatti, il modello tende a sovrastimare tutti i dati appartenenti all'articolo sperimentale di *Fossetti et al. (2016)*, mentre sottostima i valori della resistenza cilindrica del provino confinato nella trattazione dell'articolo di *Carloni et al. (2015)*. Infine, per l'articolo di *Cascardi et al. (2018)*, si nota una sovrastima della resistenza nei primi 3 provini dove le resistenze risultano essere molto piccole, mentre ad entità maggiori si verifica una sottostima dei valori.

Infatti, risulta essere ben visibile dalla linea di tendenza in **Figura 108**, tali conclusioni possono essere ben attestate dal posizionamento dei diversi punti nel grafico: infatti, i punti dell'articolo di *Carloni et al. (2015)* sono posizionati al di sotto della retta di riferimento di equazioni $y=x$; i punti di *Fossetti et al. (2016)* sono, invece, posizionati al di sopra della retta di riferimento, mentre i dati di *Cascardi et al. (2018)* sono posizionati ambo i lati rispetto all'elemento di riferimento.

Infine, come fase ultima dello studio degli articoli sperimentali in esame mediante il modello analitico della *Normativa ACI 549-6R (2020)*, andiamo a stillare degli istogrammi dove si evidenzia la variazione del comportamento del rapporto dei parametri teorici e sperimentali in funzione del singolo provino esaminato. Questo step, viene eseguito in modo singolo per ognuno dei tre articoli.

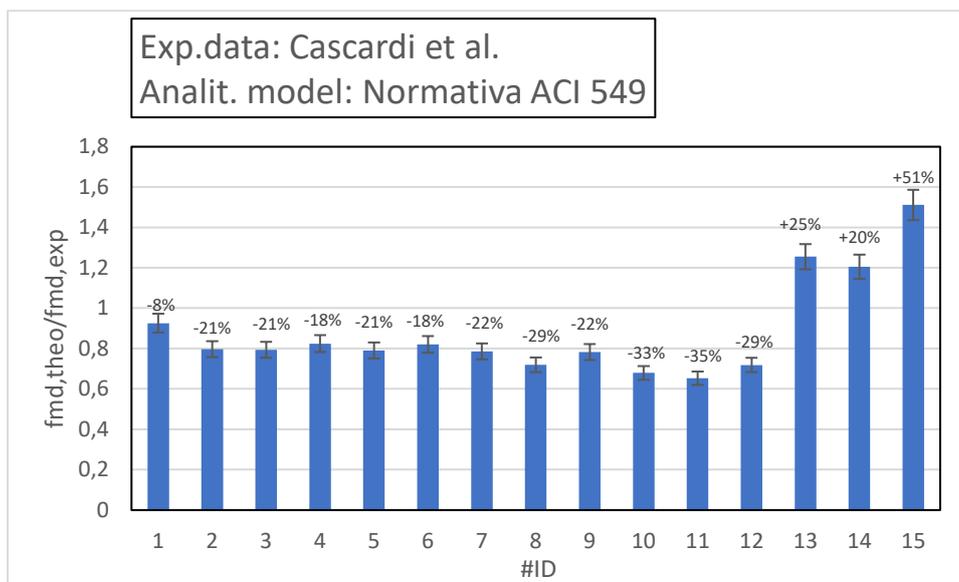


Figura 109_Articolo sperimentale di *Cascardi et al. (2014)*: Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

Dal grafico riportato in **Figura 109**, è possibile attestare che la variazione del rapporto tra valore teorico e sperimentale tende ad essere legato alla rigidezza e allo spessore del rinforzo. Da sottolineare, che tra i due parametri quello che tende ad incidere di più, nella questione della variazione della resistenza cilindrica teorica, risulta essere il valore del modulo elastico della fibra. Difatti, il scarto di più alto si ha per provini con applicazione di un rinforzo con bassa rigidezza. Si può asserire, quindi, che il modello tende a sovrastimare i valori di resistenza cilindrica e tende ad essere meno cautelativo nella casistica di E_f basso.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra -35% e +51%. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con grafico riportato in **Figura 108**, dove appunto va a mostrare il posizionamento, della maggioranza dei punti, al di sopra della retta di riferimento di equazione $y=x$

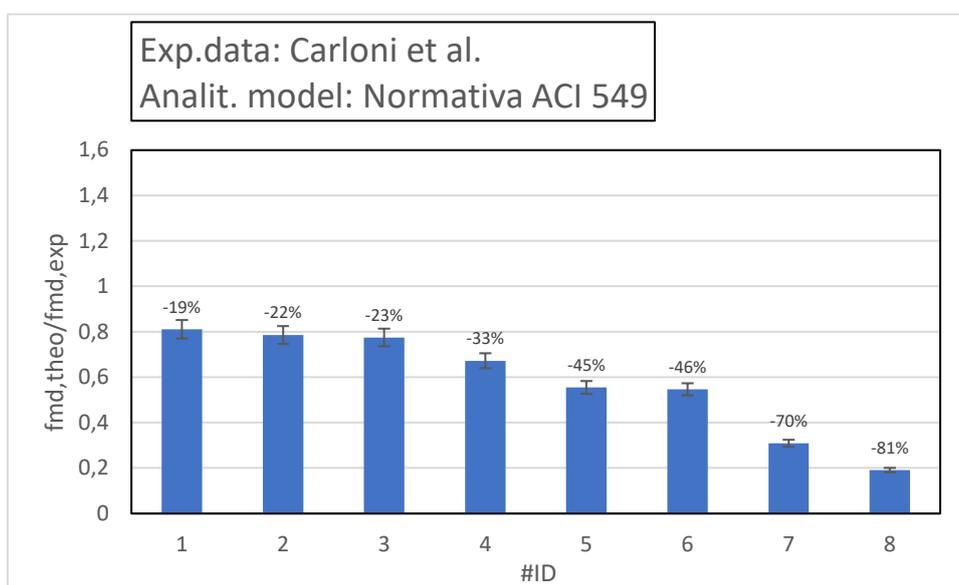


Figura 110_Articolo sperimentale di *Carlioni et al. (2014)*: Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale

Come detto in precedenza, la **Figura 110**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate e del relativo scarto rispetto al valore unitario che andrebbe a sancire, così, la coincidenza tra i due parametri interessati. Come è possibile attestare, la variazione del

rapporto tende ad essere irregolare e ciò risulta essere conseguenza della dimensione geometrica della sezione trasversale del provino. Difatti, i valori più bassi di scarto tendono ad essere presenti nei provini di dimensioni 102x100mm, mentre si ha un grande discostamento per elementi con sezione 102x204 mm. Si può asserire, quindi, che il modello tende a fornire dei valori di resistenza cilindrica cautelativi, soprattutto nell' ipotesi di provini con dimensioni geometriche elevate.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra -81%% e -19 %. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con il grafico riportato in **Figura 108**, quale mostra il posizionamento, dei valori in questione, risultano essere tutti al di sotto rispetto alla retta di riferimento di equazione $y=x$

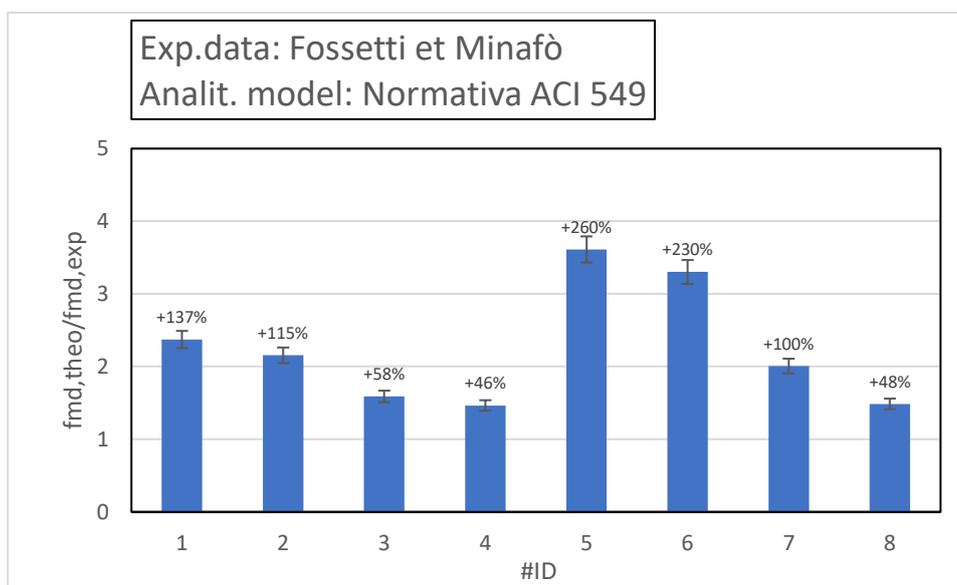


Figura 111_Articolo sperimentale di Fossetti et al. (2016): *Rapporto resistenza cilindrica confinata teorica con resistenza cilindrica confinata sperimentale*

Come detto in precedenza, la **Figura 111**, presenta un grafico che va a soffermarsi sulla variazione dei valori assunti da parte del rapporto tra le due resistenze cilindriche confinate. E' possibile attestare, che la variazione del rapporto tende ad essere molto ampia e ciò risulta essere conseguenza della stratigrafia del rinforzo applicato. Difatti, i valori di discostamento più elevati sono stati registrati con il rinforzo costituito dalla malta M3+fibra di carbonio, mentre quelli più bassi sono ottenuti con i provini rinforzati con malta M3+fibra di acciaio.

È possibile notare che il range di variazione risulta essere compreso tra +48%% e +260 %. Da sottolineare, che risulta essere possibile eseguire una verifica attraverso confronto con il grafico riportato in **Figura 108**, quale mostra il posizionamento, dei valori in questione, risultano essere tutti al di sopra rispetto alla retta di riferimento di equazione $y=x$

4.3 OSSERVAZIONI

A conclusione del seguente capitolo, possiamo tirare alcune osservazioni in merito ai modelli applicati per le differenti casistiche di confinamento e materiale trattato.

Nella trattazione del confinamento di colonne in calcestruzzo tramite FRP, il modello di *Campione and Miraglia (2003)* va a restituire un valore della resistenza a compressione a provino confinato che risulta essere direttamente correlato all'entità dello spessore del rinforzo fibroso. Difatti, si nota che le casistiche di sovrastima si hanno nelle casistiche con fibre spesse 2,54 mm, mentre i restanti provini fanno registrare una sottostima conseguente all'applicazione di spessori con un ordine di grandezza inferiore.

Per il modello di *Spoelstra and Monti (1999)*, si ha una restituzione dei valori teorici che risultano essere nuovamente legati al valore dello spessore dello spessore fibroso: difatti, si hanno dei valori teorici alti e casi di sovrastima, per le casistiche di provini quali vedono l'applicazione di spessori pari a 0,85 mm e 1,02 mm. Per valori, invece, dell'ordine ai 30 mm, il modello tende ad essere più conservativo rispetto al riferimento sperimentale.

Infine, il modello relativo alla *Circolare CNR DT200 R1*, si nota che i risultati forniti tendono ad essere in funzione di tre parametri: spessore e modulo elastico della fibra, e modulo elastico del calcestruzzo non confinato. Per i primi due parametri, si presenta un legame direttamente proporzionale, dove all'aumentare dello spessore e del modulo elastico della fibra, il modello tende ad essere meno cautelativo. Invece, nella casistica di provini con modulo elastico crescente, lo strumento teorico tende ad essere sempre più conservativo, fornendo dei valori molto prossimi a quelli sperimentali.

Trattando, invece, le colonne realizzate in muratura e confinate con la medesima tecnica di confinamento, tutti e tre i modelli, nella casistica di elementi con resistenza a compressione iniziale bassa, fanno registrare dei risultati teorici di entità inferiore rispetto ai corrispettivi sperimentali.

Invece, per valori alti di resistenza, si presenta una differenza in termini di risposta da parte dei tre strumenti analitici analizzati. *Di Ludovico et al. (2010)* e *la Circolare CNR DT 200 R1(2013)* possono fornire sia sovrastima che sottostima, è dettato sia dall'entità della resistenza a compressione iniziale e sia dall'entità del raggio di curvatura della sezione trasversale. Si nota, infatti, che più il provino tende a presentare i vertici più arrotondati più il modello valuta il confinamento più efficace.

Infine, *Krevaikas and Triantifollou (2005)* tende esclusivamente a sottostimare la resistenza cilindrica confinata. Questi valori, risultano essere influenzati dal modulo elastico e spessore del rinforzo fibroso, e dalle dimensioni geometriche del provino: difatti, il modello tende a fornire una resistenza più elevata all'aumentare della E_f e della t_f , mentre il rinforzo risulta meno efficace per provini più grandi.

Parlando del confinamento tramite FRCM per le colonne in calcestruzzo, il modello relativo alla *Normativa ACI 549-6R* e alla *Circolare CNR DT 215*, tendono a fornire dei valori sottostimati della resistenza cilindrica confinata per qualsiasi range di valori presi in considerazione. Si nota, che i valori teorici restituiti risultano essere legati allo spessore e alla resistenza cilindrica iniziale: difatti, secondo il modello, il confinamento risulta essere più efficace per provini con resistenza iniziale più bassa e spessore della fibra più elevata. Invece, il modello di *Colajanni et al. (2014)*, tende a sovrastimare i diversi valori dei rapporti incrementali. Si nota, anche in tale modello, che i valori teorici tendono salire all'aumentare della resistenza a compressione iniziale e dello spessore della fibra.

Infine, nelle colonne rinforzate tramite FRCM, i modelli di *Balsamo et al. (2018)* e della *Normativa ACI 549*, tendono a fornire una sovrastima nella trattazione di valori bassi di resistenza cilindrica confinata, mentre tende ad una sottostima in presenza di valori alti. Invece, per il modello della *Circolare CNR DT215-2018*, tale tende ad una sovrastima nella trattazione di ogni entità di resistenza confinata.

5. ANALISI PARAMETRICA E CONFRONTO TRA I MODELLI

Nel seguente capitolo, dopo esser venuti a conoscenza dei vari articoli sperimentali e modelli analitici utilizzati nelle corrispettive casistiche di confinamento, si procede all'esecuzione dell'analisi parametrica nella quale si sfrutteranno i modelli analitici visti nei capitoli precedenti: si valuterà la loro risposta alla variazione i parametri cardine, quali risultano essere modulo elastico della fibra, E_f , numero strati del materiale di rinforzo, n_f , percentuale meccanica di armatura, ρ_f , pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$, e resistenza cilindrica iniziale, f_0 . Inoltre, nella casistica di confinamento tramite *FRCM*, si considera la variazione del valore della resistenza e dello spessore della matrice rinforzante, rispettivamente $f_{c,mat}$, e t_{mat} .

5.1 CONFINAMENTO MEDIANTE SISTEMI FRP

In tale paragrafo, si procederà all'analisi parametrica per le diverse casistiche di colonne in calcestruzzo e in muratura, andando a considerare i modelli visti nei capitoli precedenti e facendo variare i parametri cardine di essi: modulo elastico della fibra, E_f , numero strati del materiale di rinforzo, n_f , percentuale meccanica di armatura, ρ_f , pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$, e resistenza cilindrica iniziale, f_0 . Lo scopo di ciò, è riuscire a determinare la risposta del singolo modello analitico con la variazione di uno di questi parametri e, successivamente, confrontare i risultati ottenuti. Inoltre, prima dell'esecuzione dei confronti dei modelli tramite analisi parametrica, è stato eseguito un'ulteriore comparazione relativa ai grafici di relazione tra valori teorici e sperimentali relativi alla resistenza a compressione e alla deformazione ultima.

Per le colonne in calcestruzzo rinforzate tramite sistemi *FRP*, vengono considerati i modelli dell'articolo sperimentale di *Spoelstra and Monti (1999)*, *Campione and Miraglia (2003)*, *Circolare CNR DT200 R1 (2013)*.

Grazie ai dati a disposizione, il primo step utile per il confronto vede la presa in considerazione del grafico relativo alla relazione tra i valori teorici e sperimentali della resistenza cilindrica confinata (**Figura 112**). Inoltre, ulteriore confronto può essere eseguito sfruttando la relazione tra valori sperimentali e teorici in termini deformativi (**Figura 113**):

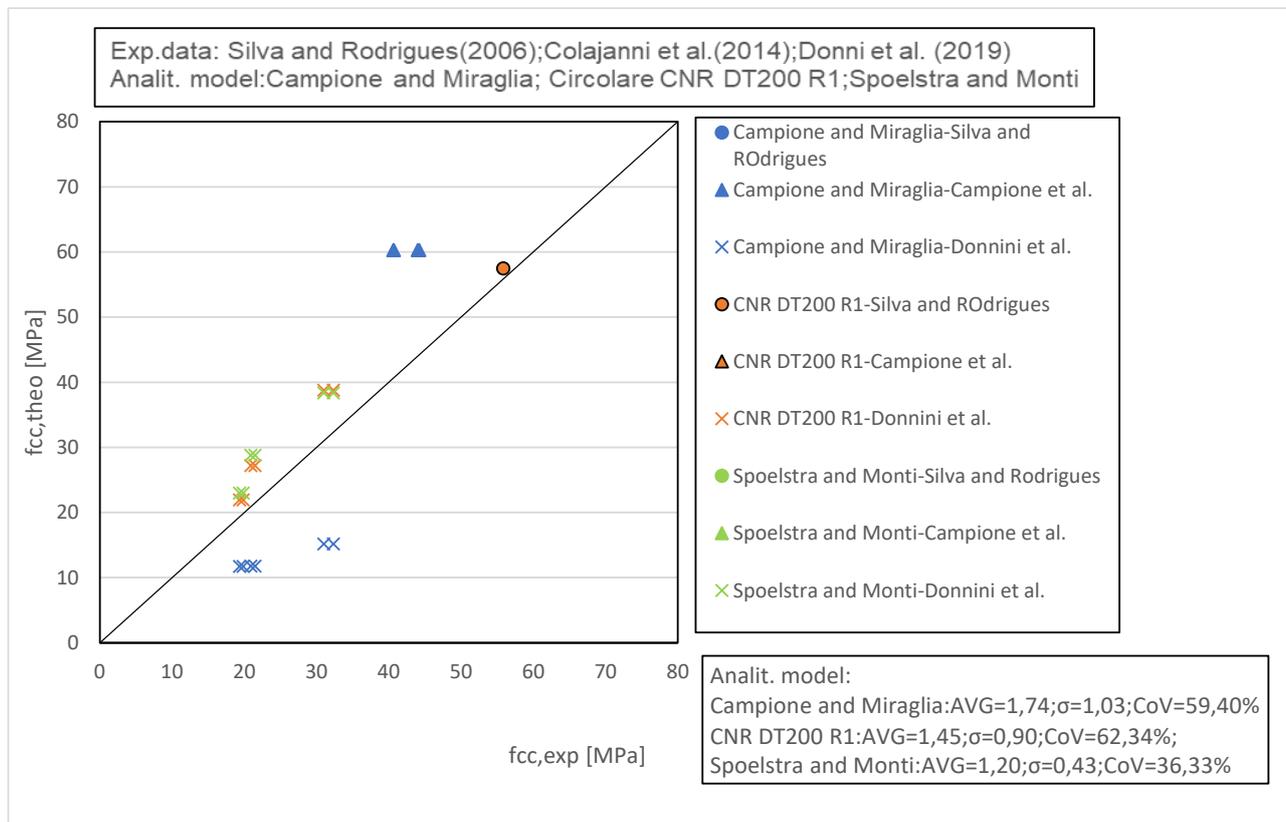


Figura 112_Relazione dei valori teorici e sperimentali della resistenza cilindrica per colonne in calcestruzzo rinforzate tramite *FRP*

Dal grafico riportato in **Figura 112**, si nota che il modello di *Campione and Miraglia (2003)* tende ad effettuare una sottostima della resistenza cilindrica confinata col crescere della entità dello spessore del rinforzo fibroso. Difatti, la sottostima si registra nelle casistiche dei provini confinati con 2,54 mm di spessore fibroso.

Invece, i modelli relativi alla *Circolare CNR DT200 R1* e all'articolo di *Spoelstra and Monti (1999)*, tendono a sovrastimare i valori della resistenza cilindrica confinata in qualsiasi range di valori considerati. Ciò, risulta essere spiegato dal fatto che i due modelli tendono ad essere meno cautelativi nella casistica di elevato spessore e modulo elastico della fibra rinforzante, mentre per provini con modulo elastico del calcestruzzo elevato, i modelli si comportano in modo più cautelativo.

Grazie alla tabella, posta in basso a destra nel grafico in esame, è stato possibile determinare con esattezza quale modello risulta discostarsi meno dalla retta di riferimento di equazione $y=x$ e che, quindi, riporta dei valori teorici molto prossimi a quelli sperimentali. Da tale, il modello di *Spoelstra et al. (1999)*, risulta essere il modello più attendibile per la valutazione della resistenza cilindrica all'atto del confinamento di colonne in calcestruzzo tramite FRP.

Analoga analisi, può essere eseguita anche in termini deformativi:

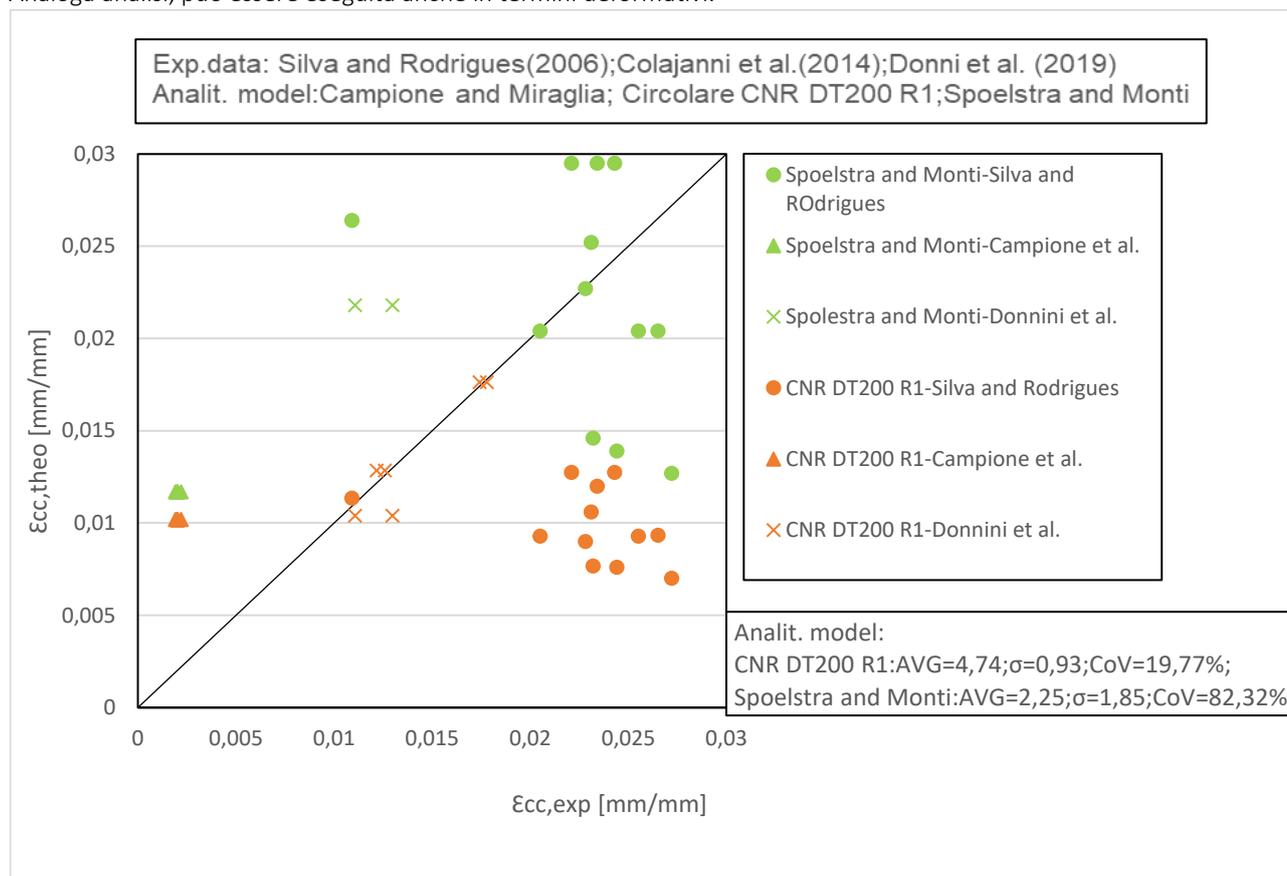


Figura 113_Relazione dei valori teorici e sperimentali della deformazione confinata per colonne in calcestruzzo rinforzate tramite FRP

Come è possibile vedere nel grafico riportato in **Figura 113**, vengono rappresentati tutti i punti, relativi alle deformazioni confinate, ricavati dai tre articoli sperimentali di riferimento tramite i modelli analitici scelti. Si nota, che il modello di *Campione and Miraglia (2003)* non risulta essere presente, in quanto non fornisce la formulazione utile per la determinazione dei dati deformativi. Invece, i modelli relativi alla *Circolare CNR DT200 R1* e all'articolo di *Spoelstra and Monti (1999)*, mostrano un comportamento simile: infatti, per un range di deformazione basso, si nota che i due modelli tendono a sovrastimare il parametro in esame, mentre ad alti valori essi tendono ad essere più cautelativi.

Grazie alla tabella, posta in basso a destra nel grafico in esame, è stato possibile riuscire a determinare con esattezza quale dei due modelli risulta discostarsi meno dalla retta di riferimento di equazione $y=x$ e che, quindi, riporta dei valori teorici più prossimi a quelli sperimentali. Da tale, il modello di *Spoelstra et al. (1999)* risulta essere il modello più attendibile per la valutazione della deformazione all'atto del confinamento di colonne in calcestruzzo tramite FRP.

Per quanto riguarda, invece, la casistica delle colonne rinforzate tramite FRP, si andranno a prendere in considerazione i modelli di *Krevaikas et al. (2005)*, *Di Ludovico et al. (2010)*, e della *Circolare CNR DT200 R1 (2013)*. Grazie ai dati a disposizione, il primo step utile per il confronto tra i modelli indicati, vede la presa in considerazione del grafico relativo alla relazione tra i valori teorici e sperimentali della resistenza cilindrica confinata (**Figura 114**).

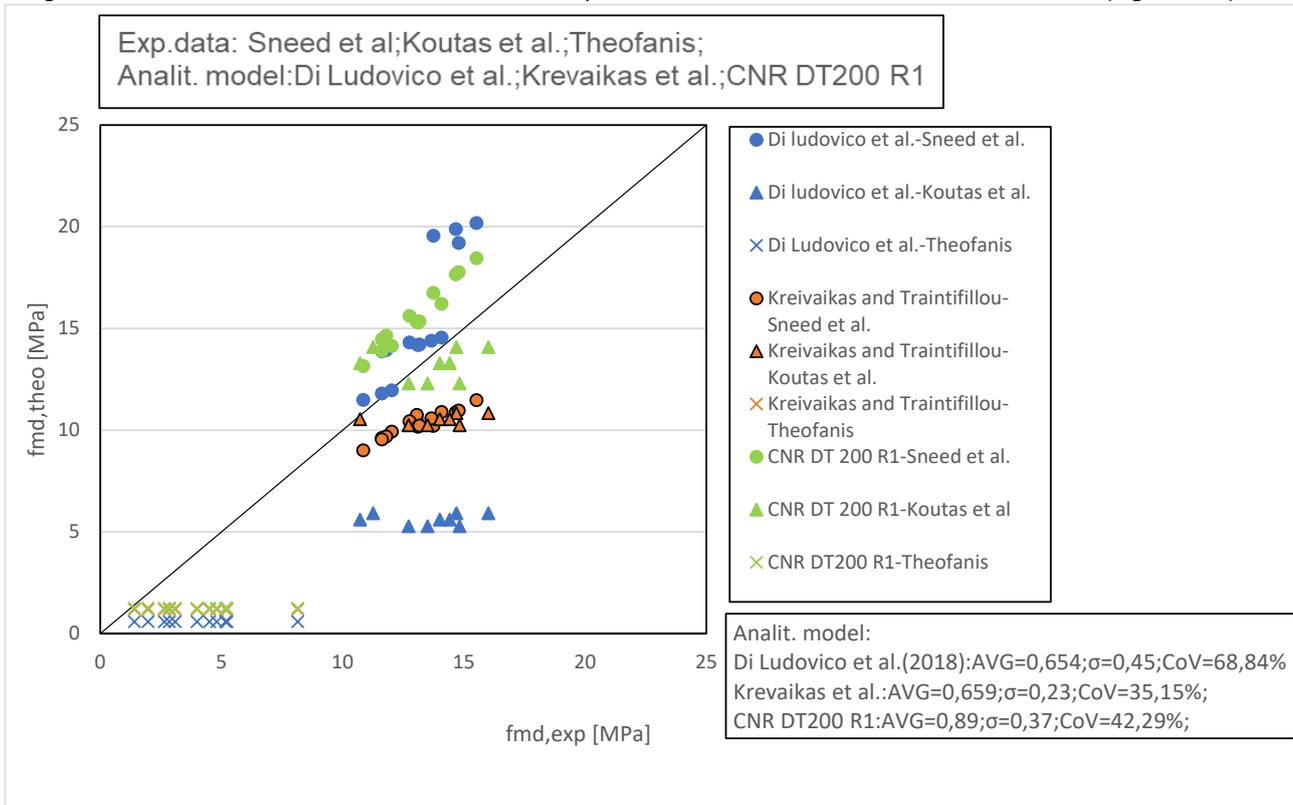


Figura 114_Relazione dei valori teorici e sperimentali della resistenza cilindrica per colonne in muratura rinforzate tramite FRP

Come è possibile vedere nel grafico riportato in **Figura 114**, vengono rappresentati tutti i punti ricavati dai tre articoli sperimentali di riferimento tramite i modelli analitici scelti. Da notare, che tutti e tre i modelli in questione tendono a fornire una sottostima nella casistica di resistenza confinata a valori bassi. Invece, per valori alti di resistenza, si presenta una differenza in termini di risposta dei modelli: *Di Ludovico et al. (2010)* e *la Circolare CNR DT 200 R1(2013)* possono fornire sia sovrastima che sottostima, e ciò è dettato sia dall'entità della resistenza a compressione iniziale e sia dall'entità del raggio di curvatura della sezione trasversale: più il provino tende a presentare i vertici più arrotondati più il modello valuta il confinamento più efficace.

Per *Krevaikas and Triantifollou (2005)*, si ha esclusivamente una sottostima della resistenza cilindrica confinata. Questi valori, risultano essere influenzati dalla rigidità e dallo spessore del rinforzo fibroso, oltre che dalle dimensioni geometriche del provino: il modello tende a fornire una resistenza più elevata all'aumentare della E_f e della t_f .

Grazie alla tabella posta in basso a destra nel grafico in esame, è stato possibile riuscire a determinare con esattezza quale modello risulta discostarsi meno dalla retta di riferimento di equazione $y=x$ e che, quindi, riporta dei valori teorici più prossimi a quelli sperimentali. Da tale, il modello della *Circolare CNR DT 200 R1(2013)* risulta essere il modello più attendibile per la valutazione della resistenza cilindrica all'atto del confinamento di colonne in muratura tramite FRP.

5.1.a INFLUENZA DELLA RIGIDEZZA DELLE FIBRE

Nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati i modelli, relativi alle colonne in calcestruzzo e in muratura confinate tramite FRP, andando a verificare come tali tendono a comportarsi al variare della rigidità delle fibre rinforzanti.

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del primo parametro cardine ossia il modulo elastico della fibra, E_f , che si vuole fare oscillare da 0 a 270000 MPa con intervalli costanti.

E' stato possibile riuscire ad estrapolare un grafico quale va a mostrare la comparazione delle risposte dei tre modelli in questione al variare del valore del modulo elastico della fibra, E_f :

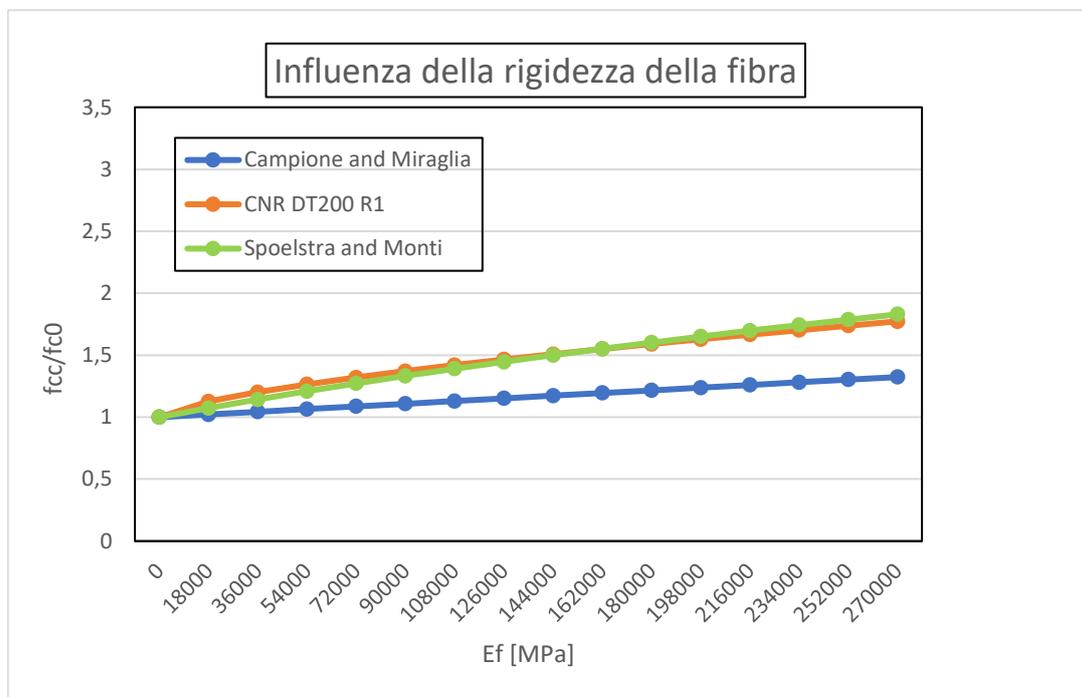


Figura 115_Confronto della risposta dei modelli al variare del modulo elastico della fibra, E_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 115**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{c0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere la rigidità della fibra che tende ad oscillare tra 0 e 270 GPa. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che tutti e tre i modelli hanno una crescita lineare dei valori dei rapporti incrementali delle resistenze cilindriche dei provini e, inoltre, tendono a presentare medesima origine nel primo provino dove non si presenta confinamento. Il modello relativo a *Campione and Miraglia (2003)*, tende a presentare la crescita più limitata tra i tre modelli, raggiungendo un picco di incremento pari a 1,32 volte e un valore medio di 1,16 volte. Questa differenza risulta essere ben evidente già dal provino n.3, dove si presenta un E_f pari a 36 GPa. Invece, per i restanti due modelli, il discostamento tra di essi risulta essere minimo, presentando una stessa velocità nella crescita lineare dei valori. Da osservare, che fino al provino n.8, con rigidità della fibra pari a 126 GPa, l'incremento maggiore si ha con il modello relativo alla *Circolare CNR DT200 R1*, dove si ha un valore pari a 1,46 volte a fronte di 1,44 volte appartenente al modello di *Spoelstra and Monti (1999)*. Continuando nella lettura, nei due provini successivi rispettivamente con modulo elastico della fibra pari a 144 GPa e 162 GPa, si registrano degli incrementi coincidenti. Invece, da un valore di modulo elastico pari a 180 GPa, si registra un superamento, in termini di crescita dei valori della resistenza confinata, da parte del modello di *Spoelstra and Monti (1999)*. Quindi, al crescere di E_f , i valori di resistenza cilindrica confinata, forniti dai modelli di *Spoelstra and Monti (1999 e della Circolare CNR DT200 R1)*, tendono ad essere molto vicini.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere in considerazioni i modelli utilizzati in precedenza per la casistica di confinamento di colonne in muratura tramite FRP: articolo sperimentale di *Krevaikas et al. (2005)*, *Di Ludovico et al. (2010)*, e della *Circolare CNR DT 200 R1 (2013)*.

Come dati di partenza, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{m0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

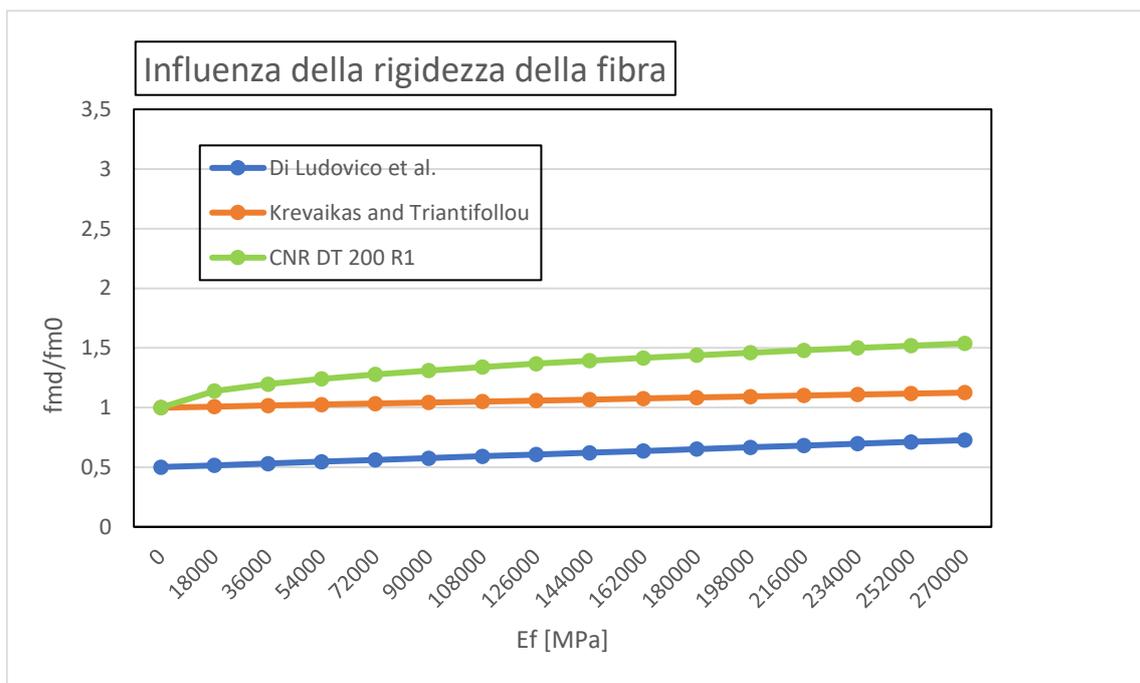


Figura 116_Confronto della risposta dei modelli al variare del modulo elastico della fibra, E_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 116**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{m0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale confronto, il parametro variabile risulta essere la rigidità della fibra quale oscilla tra 0 a 270 GPa. Il primo aspetto ben percettibile, risulta essere il fatto che tutti e tre i modelli hanno una crescita lineare dei valori incrementali. Il modello relativo a *Di Ludovico et al. (2010)*, fornisce esclusivamente una sottostima della resistenza, al contrario dei restanti due modelli quali tendono a sovrastimare il rapporto. Da notare che, però, tale modello tende ad avvicinarsi al valore unitario col crescere del modulo elastico della fibra. Parlando dei restanti due modelli, invece, *Circolare CNR DT 200 R1(2013)* presenta una coincidenza nei valori, col modello di *Krevaikas and Triantifollou (2005)*, solo nella casistica del primo provino dove la rigidità della fibra risulta essere nulla. Infatti, con l'aumentare del parametro variabile, il discostamento tra i due tende a salire fino ad un picco del 27%. Quindi, all'aumentare di E_f , il modello di *Krevaikas and Triantifollou (2005)*, risulta essere quello più conservativo mentre la *Circolare CNR DT 200 R1(2013)* fornisce dei valori incrementali più alti con un picco pari a 1,53 volte.

5.1.b INFLUENZA DEL NUMERO DI STRATI DI RINFORZO

Nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati i modelli, relativi alle colonne in calcestruzzo e in muratura confinate tramite *FRP*, andando a verificare come tali tendono a comportarsi al variare del numero di strati di rinforzo. Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, quale deve oscillare da 0 a 5 strati. Da notare, che vengono presi in considerazione solo 6 provini cilindrici, a fronte dei 16 nella casistica precedente:

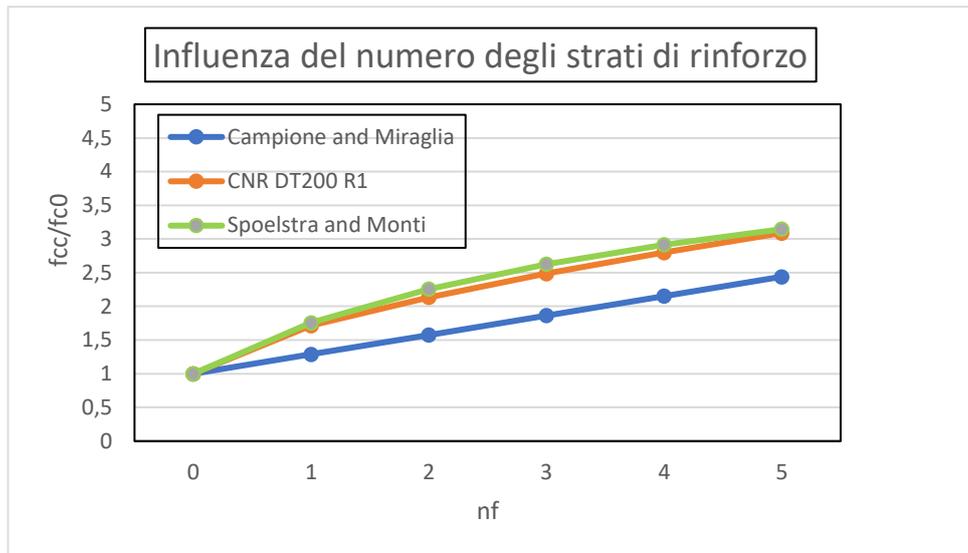


Figura 117_Confronto della risposta dei modelli al variare del numero degli strati di rinforzo, n_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 117**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{c0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere il numero di strati del materiale di rinforzo, n_f , quale tende ad oscillare tra 0 e 5 strati. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che il modello di *Campione and Miraglia (2003)* presenta un trend dei valori incrementali che risulta essere crescente in maniera lineare, al contrario dei restanti due quali hanno una crescita di tipo parabolica e, inoltre, risulta essere molto più veloce. Difatti, *Campione and Miraglia (2003)*, ha un picco di incremento pari a 2,44 volte e un valore medio di 1,72 volte. Invece, i restanti due modelli, presentano un discostamento minimo, conseguenza del fatto che hanno una stessa velocità nella crescita lineare dei valori. Da osservare, che l'incremento maggiore si ha con il modello relativo a *Spoelstra et al. (1999)*, anche se di poco. Da notare, però, che tale discostamento tende ad assottigliarsi col crescere del numero degli strati. Quindi, al crescere di n_f , i valori di resistenza cilindrica confinata, forniti dai modelli di *Spoelstra and Monti (1999 e della Circolare CNR DT200 R1)*, tendono ad essere molto vicini.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere gli stessi dati di partenza, ossia un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{m0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

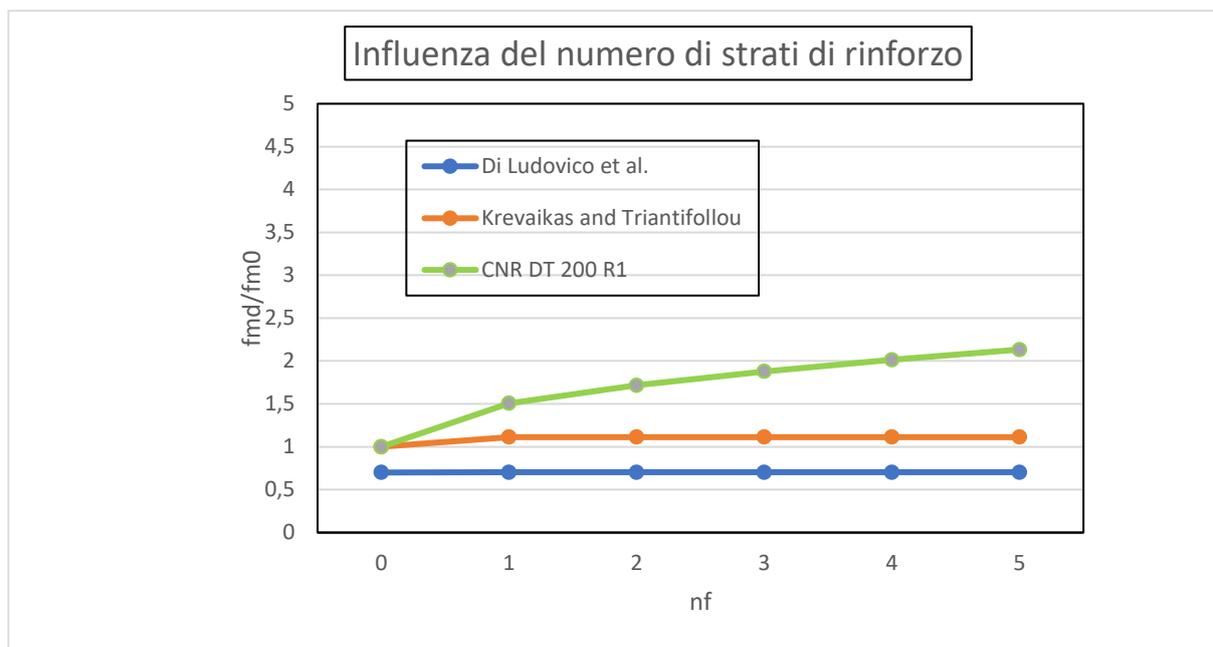


Figura 118_Confronto della risposta dei modelli al variare del numero degli strati di rinforzo, n_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 118**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{m0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Il parametro variabile risulta essere il numero di strati del materiale di rinforzo, n_f , quale tende ad oscillare tra 0 e 5 strati. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che il modello di *Di Ludovico et al. (2010)* e di *Krevaikas and Triantifollou (2005)*, presentano un trend dei valori incrementali che risulta essere costante, al contrario del modello della *Circolare CNR DT 200 R1(2013)* quale mostra una crescita parabolica. Ulteriore aspetto da non trascurare, risulta essere il fatto che *Di Ludovico et al. (2010)* comporta una sottostima dei valori incrementali fissi nonostante ci sia un aumento del numero di strati di rinforzo. Simile discorso è riservato per *Krevaikas and Triantifollou (2005)* che, però, fornisce una sovrastima dei valori. Infine, i valori più alti sono registrati dal modello della *Circolare CNR DT 200 R1(2013)*, con un picco pari a 1,70 volte.

5.1.c INFLUENZA DEL RAPPORTO VOLUMETRICO DELLE FIBRE

Nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati i medesimi modelli nella casistica della variazione dell'entità del rapporto volumetrico di armatura, ρ_f .

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, quale va ad assumere valori che vanno dallo 0% al 2%. Da notare, che verranno presi in considerazione nuovamente 16 provini, in modo da poter garantire degli intervalli a passo costante.

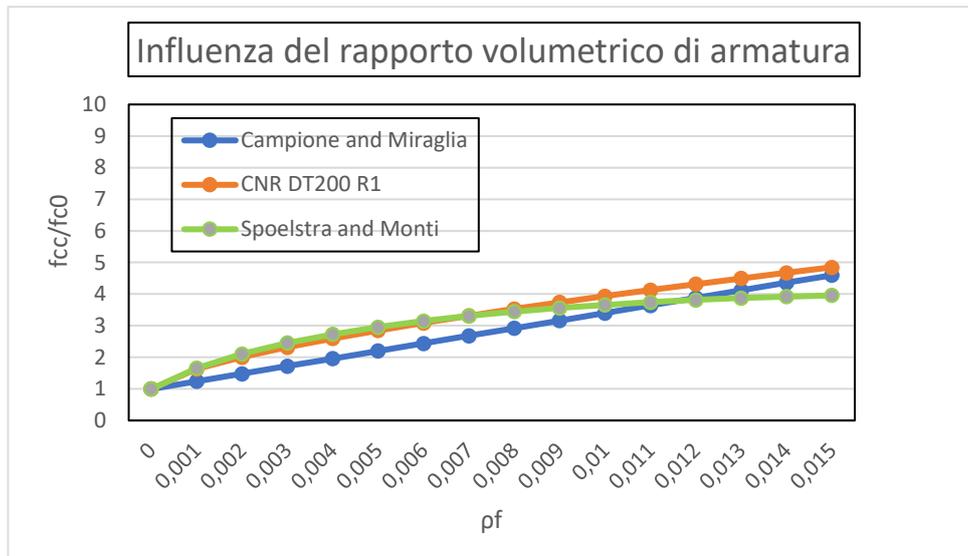


Figura 119_Confronto della risposta dei modelli al variare del rapporto volumetrico di armatura, ρ_f

Come mostrato nel grafico riportato in Figura 119, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{c0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale confronto, l'elemento variabile risulta essere il rapporto volumetrico di armatura quale tende ad oscillare tra lo 0% e il 2%. Ben visibile, risulta essere il fatto che i tre modelli tendono ad essere molto ravvicinati tra loro, nonostante presentino delle crescite dei valori diverse: il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che il modello di *Campione and Miraglia (2003)* presenta una crescita lineare, al contrario dei restanti due quali hanno una crescita di tipo parabolica. Da notare, che fino al provino n.7 con ρ_f pari a 0,6%, i modelli di *Spoelstra and Monti (1999)* e della *Circolare CNR DT200 R1* forniscono dei valori molto vicini. Questo loro discostamento, va a ridursi sempre di più con l'aumentare della ρ_f , fino ad arrivare al valore allo 0,6% dove i valori coincidono. Da tale punto in poi, *Spoelstra and Monti (1999)* restituisce valori non superiori alle 4 volte, mentre l'altro modello cresce in maniera lineare fino ad un picco pari a 4,84 volte. Invece, il modello di *Campione and Miraglia (2003)* fino a valori di rapporto volumetrico di armatura pari a 1,1%, registra un incremento di resistenza più basso. Da qui, invece, supera il modello di *Spoelstra and Monti (1999)* e raggiunge anche quello relativo alla *Circolare CNR DT200 R1*. Quindi, all'aumentare di ρ_f , i modelli di *Spoelstra and Monti (1999)* e della *Circolare CNR DT200 R1*, forniscono valori di crescita più elevati, mentre il restante risulta essere più conservativo.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere gli stessi dati di partenza, ossia un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{m0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, quale va ad assumere valori che vanno dallo 0% al 2%. Da notare, che verranno presi in considerazione nuovamente 16 provini, in modo da poter garantire degli intervalli a passo costante.

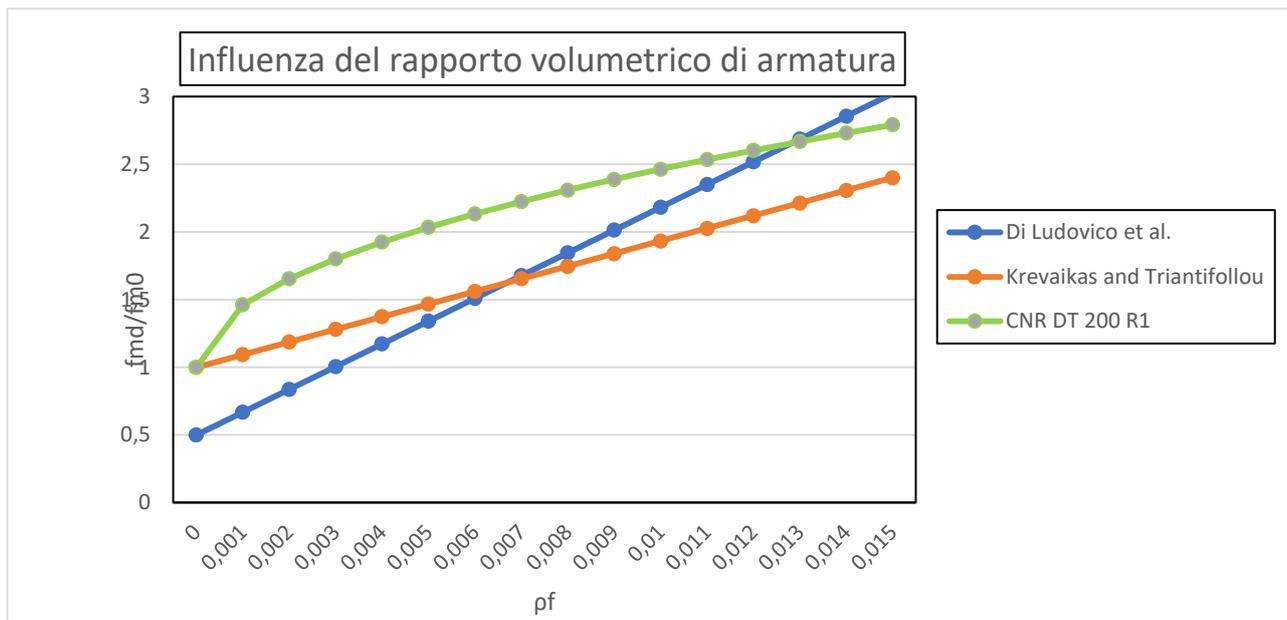


Figura 120_Confronto della risposta dei modelli al variare del rapporto volumetrico di armatura, ρ_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 120**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{m0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. In tale casistica, il parametro variabile risulta essere la ρ_f , quale rappresenta valori compresi tra lo 0% e il 2%. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che il modello di *Di Ludovico et al. (2010)* e *di Krevaikas et al. (2005)* presentano un accrescimento dei valori di tipo lineare, al contrario del modello della *Circolare CNR DT 200 R1(2013)* quale presenta una crescita parabolica. È interessante notare che *Di Ludovico et al. (2010)*, nei primi 3 provini fornisce una sottostima della resistenza e, con l'aumentare della ρ_f , passa ad una sovrastima fino a raggiungere i valori incrementali più alti riportati tra i tre modelli. Il modello di *Krevaikas and Triantifollou (2005)*, presenta dei valori che crescono in maniera lineare, ma in maniera più lenta rispetto al modello precedente: fino ad un rapporto volumetrico pari a 0,6%, tale registra un incremento maggiore rispetto al modello *Di Ludovico et al. (2010)* e, inoltre, i loro valori vanno a coincidere con ρ_f pari a 0,7%. Successivamente, per valori più alti, *Di Ludovico et al. (2010)* fornisce dei valori molto più alti. Invece, il modello della *Circolare CNR DT 200 R1(2013)* fornisce gli incrementi più alti in assoluto, fino ad una percentuale di rapporto volumetrico di armatura pari a 1,3%, punto dove i valori di tale modello coincidono con quelli forniti da *Di Ludovico et al. (2010)*. Successivamente, quest'ultimo restituisce valori più alti di resistenza confinata con un picco pari a 3,02 volte. Quindi all'aumentare di ρ_f , *Krevaikas and Triantifollou (2005)* fornisce valori più conservativi mentre la *Circolare CNR DT 200 R1(2013)* da i valori più elevati con una media pari a 2,17 volte.

5.1.d INFLUENZA DELLA PRESSIONE LATERALE DI CONFINAMENTO EFFICACE

Nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati i medesimi modelli nella casistica della variazione della pressione laterale di confinamento efficace, $f_{l,eff}$.

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D, pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, ossia tra 0 MPa e 45 MPa. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 10 provini:

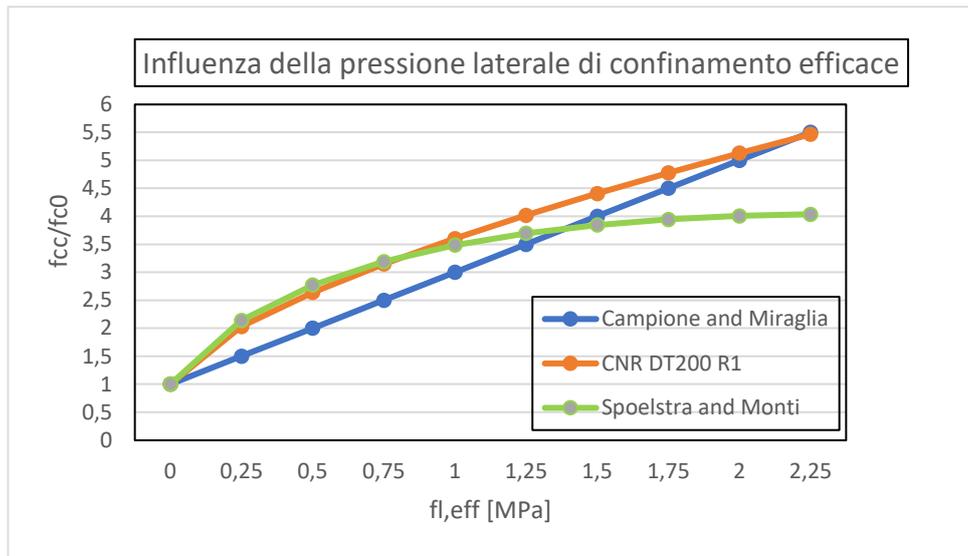


Figura 121_ Confronto della risposta dei modelli al variare della pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 121** vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{c0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere la pressione efficace di confinamento, che riveste valori da 0 MPa a 45 MPa. Ben visibile, risulta essere il fatto che i tre modelli tendono ad essere molto ravvicinati tra loro, nonostante presentino delle crescite dei valori diverse: il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che il modello di *Campione and Miraglia (2003)* presenta una crescita lineare, al contrario dei restanti due quali hanno una crescita di tipo parabolica. Da notare, che fino al provino n.4 con $f_{l,eff}$ incrementata di 0,75 volte, i modelli di *Spoelstra and Monti (1999)* e della *Circolare CNR DT200 R1* forniscono dei valori molto vicini. Questo loro discostamento, va a ridursi sempre di più con l'aumentare della pressione efficace di confinamento fino ad arrivare al valore di incremento di 0,75 volte dove i valori coincidono. Da tale punto in poi, *Spoelstra and Monti (1999)* restituisce valori non superiori alle 4 volte, mentre l'altro modello cresce in maniera lineare fino ad un picco pari a 5,46 volte. Invece, il modello di *Campione and Miraglia (2003)*, fino a valori di $f_{l,eff}/f_{c0}$ pari a 1,35 volte, fa registrare un incremento di resistenza più basso. Da qui, invece, supera il modello di *Spoelstra and Monti (1999)* e raggiunge anche quello relativo alla *Circolare CNR DT200 R1*. Quindi, all'aumentare dell'incremento della resistenza efficace di confinamento, i modelli di *Spoelstra and Monti (1999)* e della *Circolare CNR DT200 R1*, forniscono valori di crescita più elevati, mentre il restante risulta essere più conservativo.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere gli stessi dati di partenza, ossia un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{m0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, ossia tra 0 MPa e 45 MPa. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 10 provini:

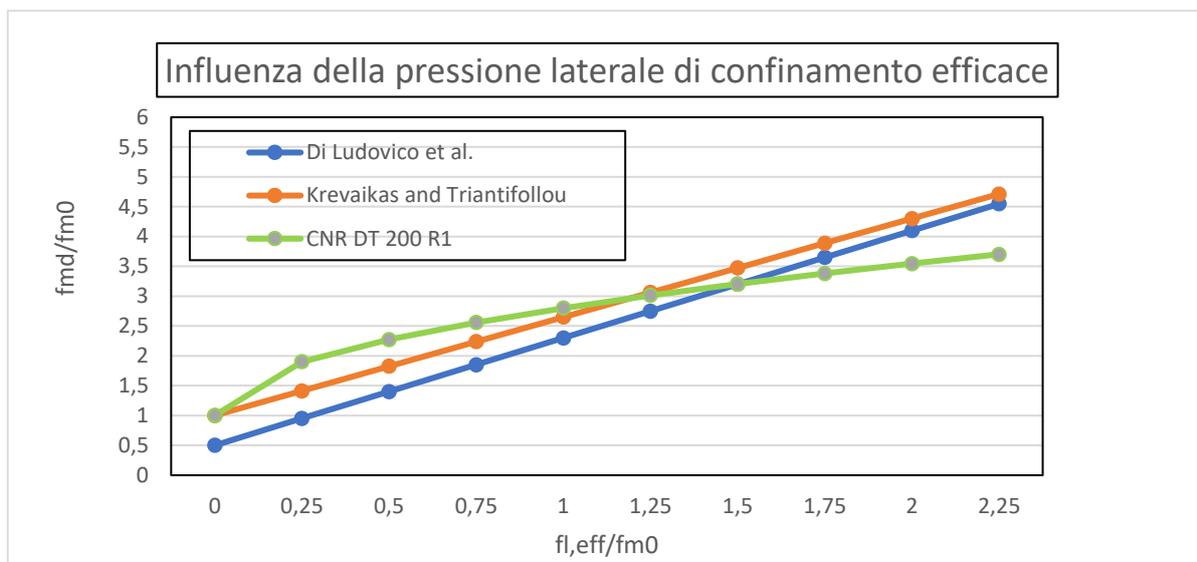


Figura 122_Confronto della risposta dei modelli al variare della pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 122**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{m0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere la pressione efficace di confinamento, che riveste valori da 0 MPa a 45 MPa. Si nota che il modello di *Di Ludovico et al. (2010)* e di *Kreaikas and Triantifollou (2005)*, presentano una crescita lineare dei valori, al contrario del modello della *Circolare CNR DT 200 R1(2013)* quale ha una crescita parabolica. Quest'ultima, fino al provino n.5 dove si ha una $f_{l,eff}$ di 25 MPa, risulta fornire i valori incrementali più alti rispetto agli altri due modelli. Successivamente, tale tende ad estrarre valori molto contenuti e, quindi, le resistenze confinate maggiori si ottengono dai restanti due modelli. *Di Ludovico et al. (2010)*, per il primo caso, tende a sottostimare la resistenza, mentre fornisce una sovrastima nelle prove successive. Tale modello, presenta un discostamento, con *Kreaikas and Triantifollou (2005)*, quale tende a ridursi con l'aumento della $f_{l,eff}$ e tale presenta un valore medio pari al 33%. I valori incrementali più alti tendono ad essere forniti da questi ultimi due modelli, con un valore di picco di 4,71.

5.1.e INFLUENZA DELLA RESISTENZA DEL MATERIALE NON CONFINATO

Infine, nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati gli stessi modelli nella casistica di differenti valori della resistenza iniziale del materiale non confinato, $f_{c,0}$.

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Visti i dati iniziali a disposizione e visto il diretto legame con la resistenza cilindrica confinata, un'ulteriore verifica risulta consistere nell'andare a far variare la resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} in un intervallo tra 0 MPa e 45 MPa. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 10 provini:

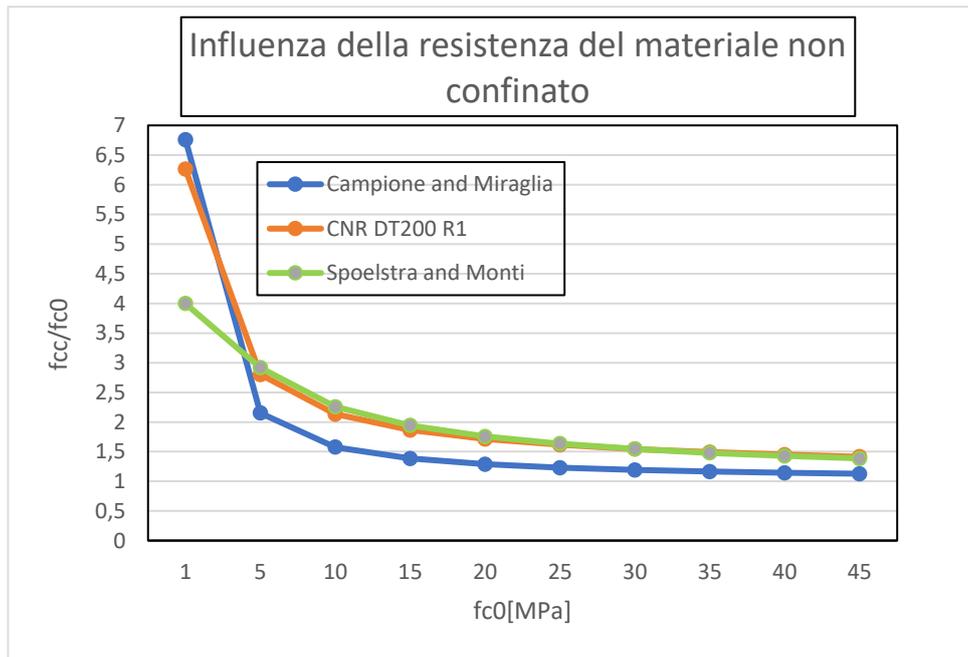


Figura 123 Confronto della risposta dei modelli al variare della resistenza iniziale, f_{c0}

Come mostrato nel grafico riportato in Figura 123, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: deformazione iniziale, ϵ_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ϵ_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere la resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} , che riveste valori da 0 MPa a 45 MPa. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che tutti e tre i modelli presentano dei valori incrementali che tendono ad abbassarsi, e ciò è dovuto al fatto che la f_{c0} , ha una crescita “più rapida” rispetto alla resistenza confinata. Nonostante ciò, non si registrano casi di sottostima del contributo del rinforzo. Inizialmente, i modelli di Campione and Miraglia (2003) e della Circolare CNR DT200 R1 forniscono dei valori incrementali vicini alle 7 volte, mentre quello di Spoelstra and Monti (1999) presenta un incremento vicino alle 4 volte. Si nota, però, che Campione and Miraglia (2003) fa registrare l’abbattimento di 6 volte, andando a rappresentare la caduta di valori più alta. Invece, dal provino con resistenza iniziale pari a 5 MPa, i due restanti provini tendono a presentare dei valori molto vicini, se non coincidenti. Quindi all’aumentare della f_{c0} , il contributo del confinamento tramite FRP, in colonne in calcestruzzo, tende ad essere meno efficace. Inoltre, il modello più conservativo risulta essere quello di Campione and Miraglia (2003), mentre i modelli di Spoelstra and Monti (1999) e della Circolare CNR DT200 R1 forniscono dei valori medi incrementali pari, rispettivamente, a 2,22 volte e 2,03 volte.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere gli stessi dati di partenza, ossia un diametro, D, pari a 150 mm, una deformazione iniziale, ϵ_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ϵ_{uf} , uguale a 0,02. Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, ossia tra 0 MPa e 45 MPa. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 10 provini:

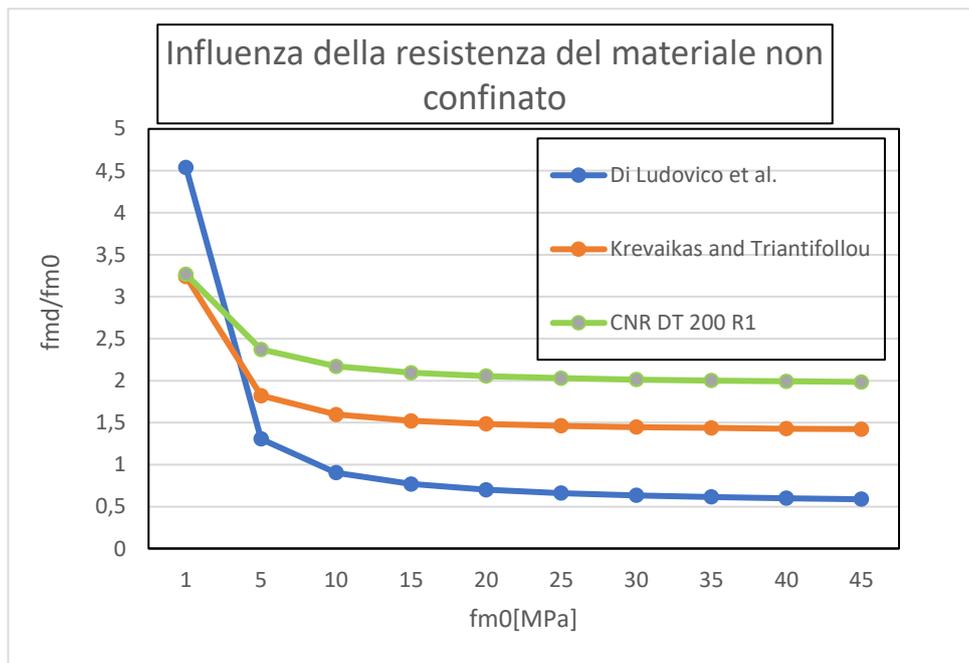


Figura 124 _Confronto della risposta dei modelli al variare della resistenza iniziale, f_{m0}

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 124**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: deformazione iniziale, ϵ_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ϵ_{uf} , uguale a 0,02. Il parametro variabile risulta essere la resistenza cilindrica iniziale, f_{m0} , che riveste valori da 0 MPa a 45 MPa. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che tutti e tre i modelli presentano dei valori incrementali che tendono ad abbassarsi, e ciò è dovuto al fatto che la f_{m0} , ha una crescita "più rapida" rispetto alla resistenza confinata. Nonostante ciò, non si registrano casi di sottostima del contributo del rinforzo. Inizialmente, il modello di *Di Ludovico et al. (2010)* fornisce dei valori incrementali vicini alle 4,5 volte, mentre quello di *Kreaikas and Triantifollou (2005)* e della *Circolare CNR DT 200 R1(2013)* presenta un incremento vicino alle 3,2 volte. Si nota, però, che *Di Ludovico et al. (2010)* fa registrare l'abbattimento di 4 volte, andando a rappresentare la caduta di valori più alta. Invece, dal provino con resistenza iniziale pari a 5 MPa, i due restanti provini tendono a presentare dei valori distanziati di un valore costante corrispondente al 29%. Quindi all'aumentare della f_{m0} , il contributo del confinamento tramite FRP in colonne in calcestruzzo, tende ad essere meno efficace. Inoltre, il modello più conservativo risulta essere quello di *Di Ludovico et al. (2010)*, mentre il modello della *Circolare CNR DT 200 R1(2013)* fornisce i valori incrementali più alti pari a 2,03 volte.

5.2 CONFINAMENTO MEDIANTE SISTEMI FRCM

In tale paragrafo, si procederà all'analisi parametrica per le diverse casistiche di colonne in calcestruzzo e in muratura confinate tramite FRCM, andando a considerare i modelli visti nei capitoli precedenti e facendo variare i parametri cardine di essi: modulo elastico della fibra, E_f , numero strati del materiale di rinforzo, n_f , percentuale meccanica di armatura, ρ_f , pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$, e resistenza cilindrica iniziale, f_0 . Inoltre, in tale casistica, si prenderanno in considerazioni anche la variazione della resistenza e dello spessore della matrice rinforzante, rispettivamente $f_{c,mat}$ e t_{mat} .

Lo scopo di quest'analisi, è riuscire a determinare la risposta del singolo modello analitico con la variazione di uno di questi parametri e, successivamente, riuscire a confrontare la risposta di tali al variare dei diversi parametri variabili.

Inoltre, prima dell'esecuzione dei confronti dei modelli tramite analisi parametrica, è stato eseguito un ulteriore confronto relativo ai grafici quali vanno ad illustrare la relazione tra valore teorico e sperimentale della resistenza confinata. Analoga analisi, viene eseguita anche in termini deformativi.

Per il caso di confinamento di colonne in calcestruzzo tramite FRCM, vengono considerati i modelli relativi alla *Normativa ACI 549-6R (2013)*, all' articolo sperimentale di *Colajanni et al. (2014)* e alla *Circolare CNR DT215 (2018)*, e messi in confronto tra di essi andando a prendere in considerazione i grafici relativi ai valori teorici e sperimentali di

resistenza cilindrica e di deformazione. e messi in confronto tra di essi andando a prendere in considerazione i grafici relativi ai valori teorici e sperimentali di resistenza cilindrica e di deformazione.

Grazie ai dati a disposizione, il primo step utile per il confronto vede la presa in considerazione del grafico relativo alla relazione tra i valori teorici e sperimentali della resistenza cilindrica confinata (**Figura 129**). Inoltre, ulteriore confronto può essere eseguito sfruttando la relazione tra valori sperimentali e teorici in termini deformativi (**Figura 130**):

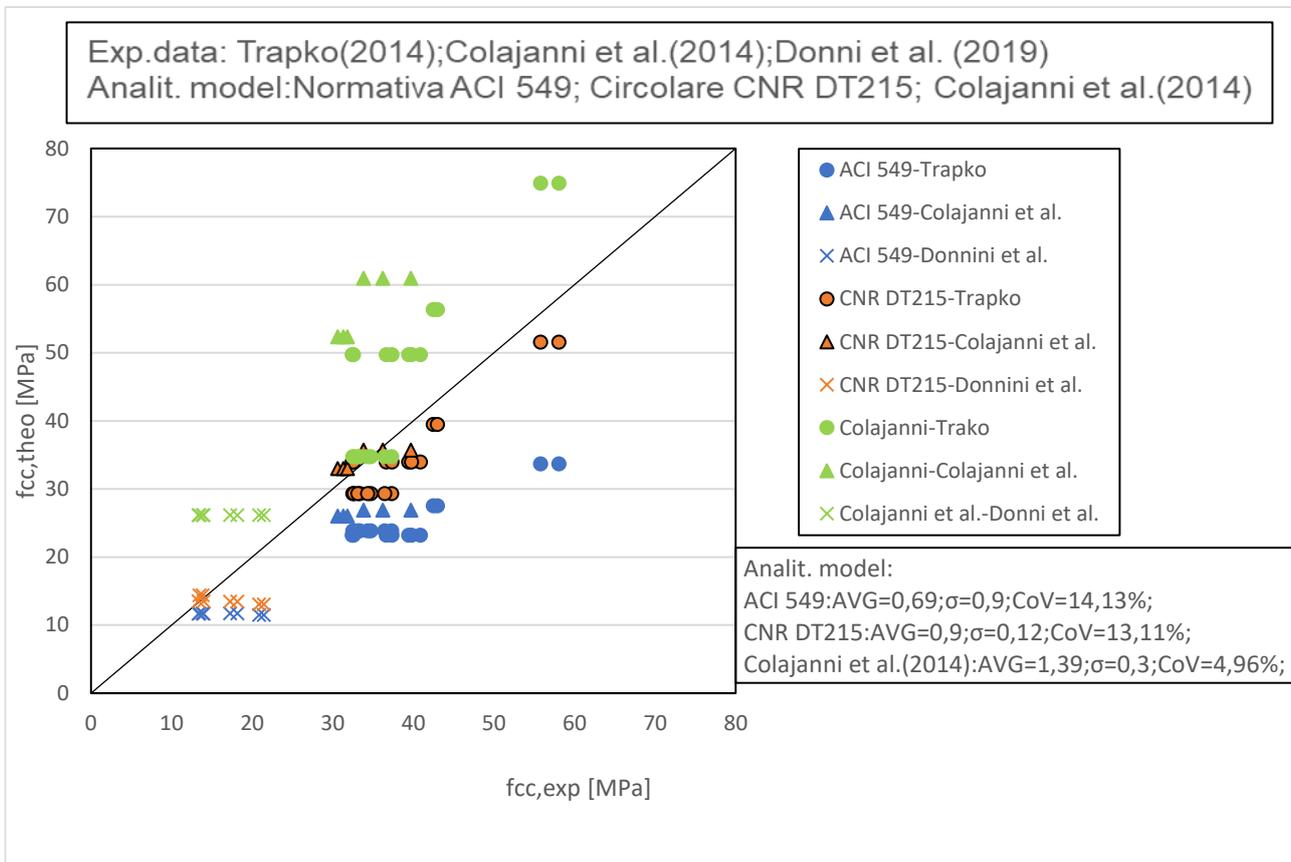


Figura 125_Relazione dei valori teorici e sperimentali della resistenza cilindrica per colonne in calcestruzzo rinforzate tramite *FRCM*

Come è possibile vedere nel grafico riportato in **Figura 125**, vengono rappresentati tutti i punti ricavati dai tre articoli sperimentali di riferimento tramite i modelli analitici scelti. Si nota che il modello relativo *alla Normativa ACI 549-6R e alla Circolare CNR DT 215*, tendono a fornire dei valori sottostimati della resistenza cilindrica confinata per qualsiasi range di valori presi in considerazione. i valori teorici restituiti risultano essere legati allo spessore e alla resistenza cilindrica iniziale: difatti, secondo il modello, il confinamento risulta essere più efficace per provini con resistenza iniziale più bassa e spessore della fibra più elevata

Invece, il modello di *Colajanni et al. (2014)*, tende a sovrastimare i diversi valori dei rapporti incrementali. Si nota, anche in tale, che i valori teorici tendono a salire all'aumentare della resistenza a compressione iniziale e dello spessore della fibra.

Grazie alla tabella posta in basso a destra nel grafico in esame, è stato possibile riuscire a determinare con esattezza quale modello risulta discostarsi meno dalla retta di riferimento di equazione $y=x$. Tale risulta essere il modello della *Circolare CNR DT 215*.

Analogamente, può essere eseguita anche in termini deformativi:

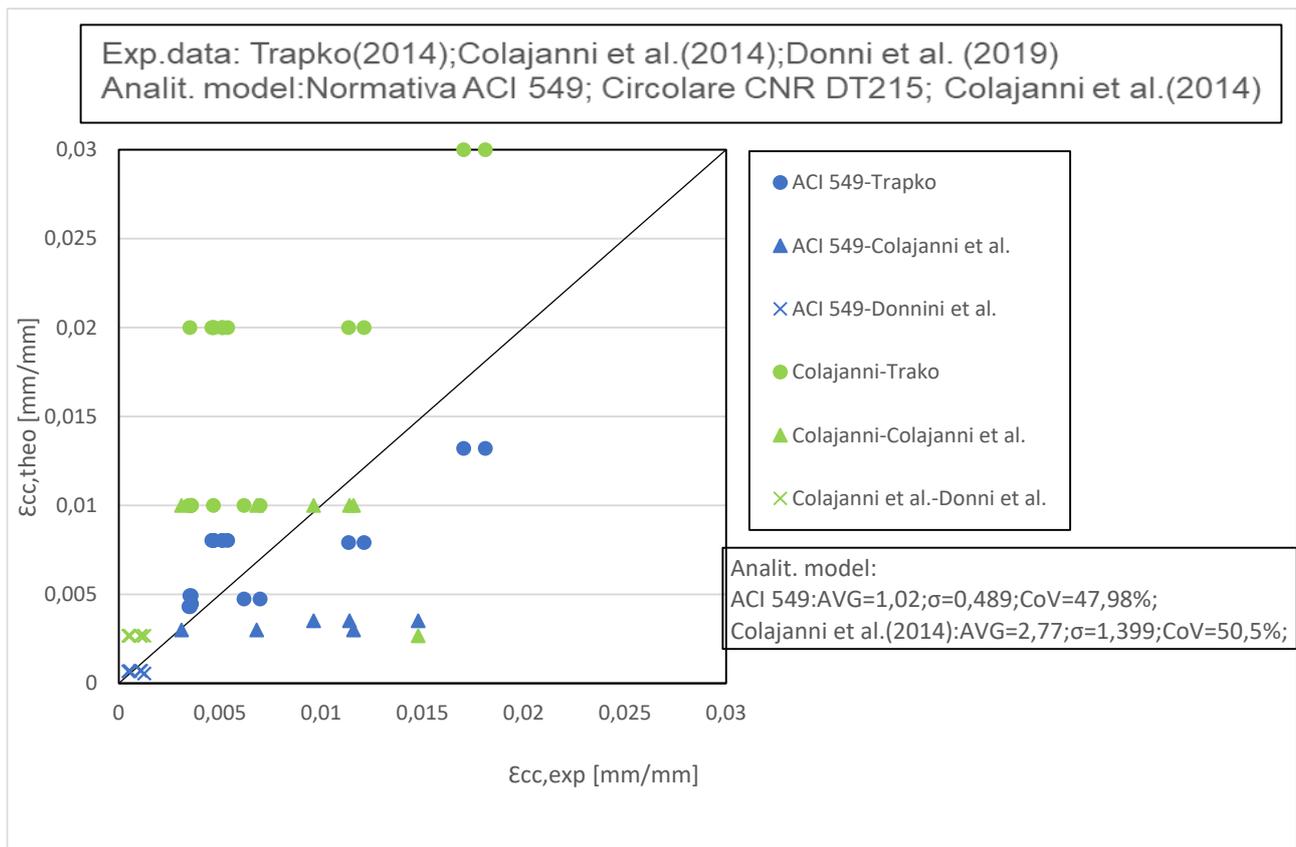


Figura 126_Relazione dei valori teorici e sperimentali della deformazione confinata per colonne in calcestruzzo rinforzate tramite FRCM

Come è possibile vedere nel grafico riportato in **Figura 126**, vengono rappresentati tutti i punti ricavati dai tre articoli sperimentali di riferimento tramite i modelli analitici scelti. Si nota, che il modello della Circolare CNR DT 215 non risulta essere presente in quanto non fornisce la formulazione utile per la determinazione dei dati deformativi. Per i dati relativi ai due restanti modelli, entrambi mostrano un comportamento simile: per un range di deformazione basso, si nota che i due modelli tendono a sovrastimare il parametro in esame, mentre ad alti valori essi tendono a sottostimare e, quindi, tendono ad essere più cautelativi.

Grazie alla tabella posta in basso a destra nel grafico in esame, è stato possibile riuscire a determinare con esattezza quale dei due modelli risulta discostarsi meno dalla retta di riferimento di equazione $y=x$ e che, quindi, fornisce dei valori teorici più prossimi a quelli sperimentali. Il modello della Normativa ACI 549-6R risulta essere il modello più attendibile per la valutazione della deformazione all'atto del confinamento di colonne in calcestruzzo tramite FRCM.

Per quanto riguarda, invece, la casistica delle colonne in muratura rinforzate tramite FRCM, si andranno a prendere in considerazione i modelli relativi a *Balsamo et al. (2018)*, alla *Circolare CNR DT215 (2018)* e alla *Normativa ACI 549-4R (2020)*, e messi in confronto tra di essi andando a prendere in considerazione i grafici relativi ai valori teorici e sperimentali di resistenza cilindrica e di deformazione. Infine, nella fase finale di confronto, i modelli saranno confrontati anche mediante i risultati ottenuti nell'analisi parametrica vista in precedenza.

Grazie ai dati a disposizione, il primo step utile per il confronto tra i modelli indicati, vede la presa in considerazione del grafico relativo alla relazione tra i valori teorici e sperimentali della resistenza cilindrica confinata (**Figura 127**).

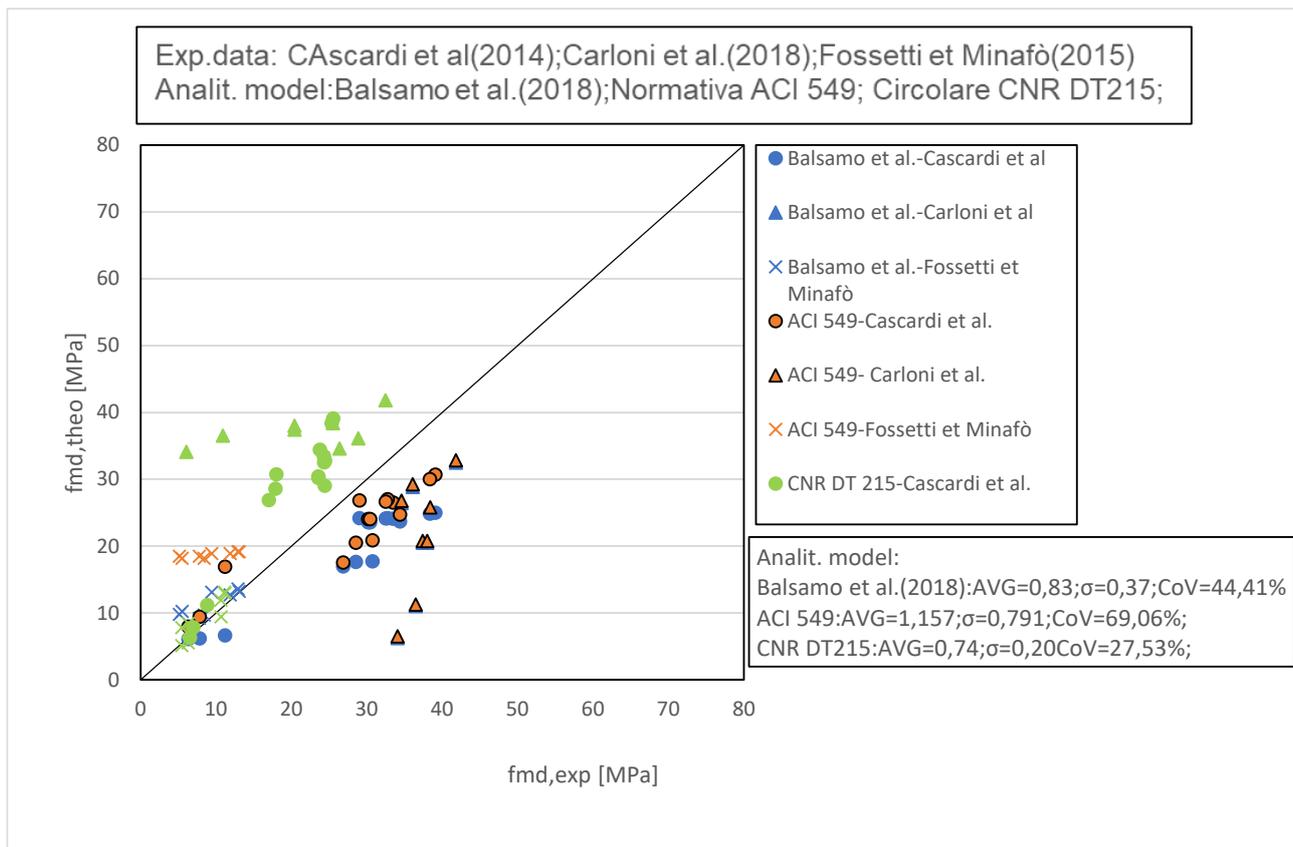


Figura 127 _Relazione dei valori teorici e sperimentali della resistenza cilindrica per colonne in muratura rinforzate tramite FRCM

Come è possibile vedere nel grafico riportato in **Figura 127**, vengono rappresentati tutti i punti ricavati dai tre articoli sperimentali di riferimento tramite i modelli analitici scelti. Da notare, che i modelli di *Balsamo et al. (2018)* e della *Normativa ACI 549*, tendono a fornire una sovrastima nella trattazione di valori bassi di resistenza cilindrica confinata, mentre tende ad una sottostima in presenza di valori alti. Invece, per il modello della *Circolare CNR DT215-2018*, tale tende ad una sovrastima nella trattazione di ogni entità di resistenza confinata. Grazie alla tabella posta in basso a destra nel grafico in esame, è stato possibile determinare con esattezza quale modello risulta discostarsi meno dalla retta di riferimento di equazione $y=x$. Da tale, il modello della *Normativa ACI 549-4R (2013)* risulta essere il modello più attendibile per la valutazione della resistenza cilindrica all'atto del confinamento di colonne in muratura tramite FRCM.

5.2.a INFLUENZA DELLA RIGIDEZZA DELLE FIBRE

Nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati i modelli, relativi alle colonne in calcestruzzo e in muratura confinate tramite FRCM, andando a verificare come tali tendono a comportarsi al variare della rigidità delle fibre rinforzanti.

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ϵ_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ϵ_{uf} , uguale a 0,02.

Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del primo parametro cardine ossia il modulo elastico della fibra, E_f , che si vuole fare oscillare da 0 a 270000 MPa con intervalli costanti.

E' stato possibile riuscire ad estrapolare un grafico quale va a mostrare la comparazione delle risposte dei tre modelli in questione al variare del valore del modulo elastico della fibra, E_f :

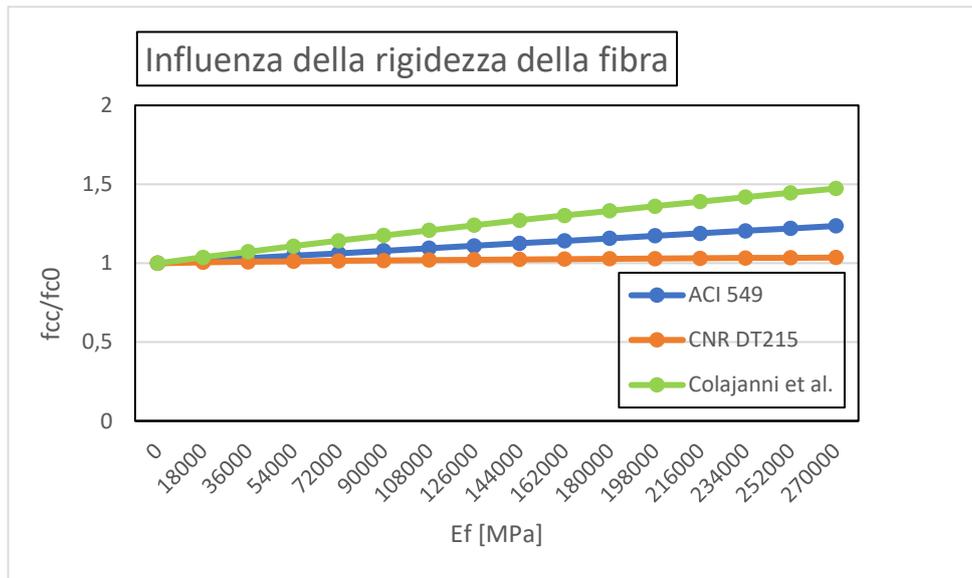


Figura 128 _Confronto della risposta dei modelli al variare del modulo elastico della fibra, E_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 128**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{c0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere la rigidità della fibra che tende ad oscillare tra 0 e 270 GPa. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che tutti e tre i modelli hanno una crescita lineare dei valori dei rapporti incrementali delle resistenze cilindriche dei provini e, inoltre, tendono a presentare medesima origine nel primo provino dove non si presenta confinamento. Il modello relativo alla Circolare CNR DT 215, tende a presentare la crescita più limitata tra i tre modelli, raggiungendo un picco di incremento pari a 1,04 volte e un valore medio di 1,02 volte. Valori molto vicini a tali, risulta essere restituiti da parte del modello della Normativa ACI 549, dove il discostamento risulta essere davvero minimo. Invece, Colajanni et al. (2014) fornisce i valori incrementali più alti. L'incremento maggiore, che si ha con tale modello ha un valore pari a 1,47 volte. Quindi, all'aumentare della rigidità della fibra, Colajanni et al. (2014) fornisce i valori di resistenza confinata più alti.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere in considerazioni i modelli utilizzati in precedenza per la casistica di confinamento di colonne in muratura tramite FRP: articolo sperimentale di Balsamo al. (2018), della Circolare CNR DT 215 (2018) e della Normativa ACI 549-4R (2013).

Come dati di partenza, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D, pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{m0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

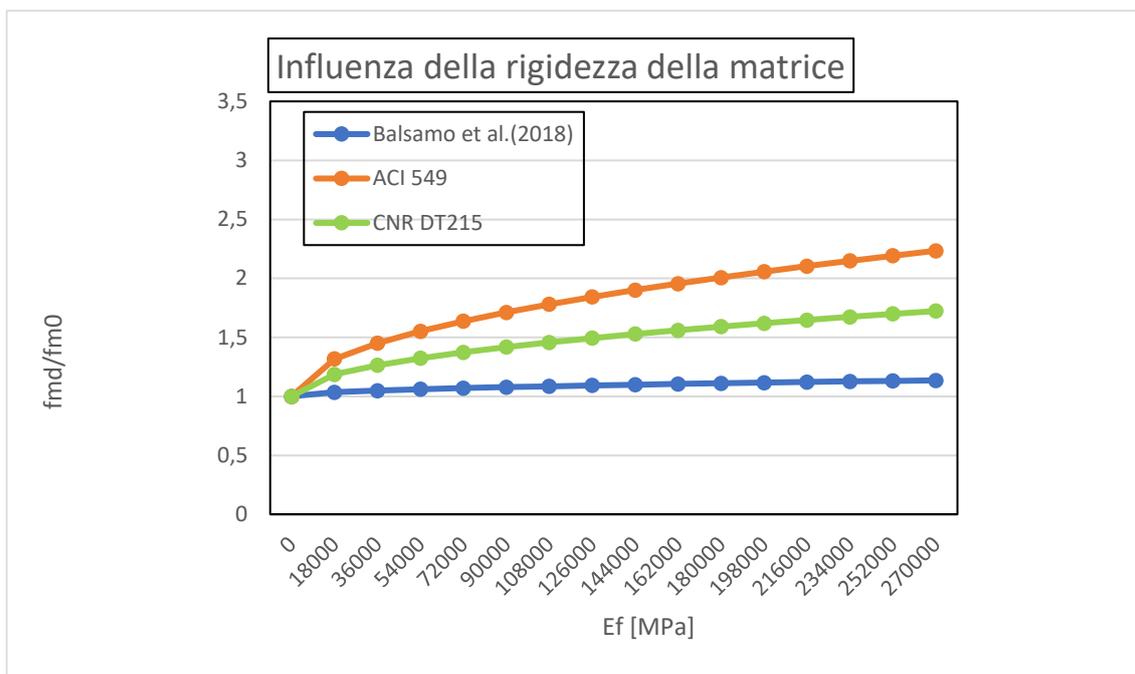


Figura 129_Confronto della risposta dei modelli al variare del modulo elastico della fibra, E_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 129**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{m0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Il parametro variabile risulta essere la rigidità della fibra che tende ad oscillare tra 0 e 270 GPa. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile, risulta essere il fatto che i modelli della *Circolare CNR DT215-2018* e della *Normativa ACI 549-4R (2013)* presentano una crescita parabolica dei valori incrementali, mentre il restante modello fornisce un incremento costante molto vicino al valore unitario. Difatti, *Balsamo et al. (2018)* presenta una sovrastima con valore medio pari a 1,08 volte. I restanti modelli, invece, presentano un andamento molto simile dove il discostamento dei valori risulta aumentare con l'incremento della rigidità della fibra. Il valore medio di tale, risulta essere 0,5 volte. Li incrementi maggiori, sono forniti dal modello e della *Normativa ACI 549-4R (2013)* con valore massimo pari a 2,23 volte

5.2.b INFLUENZA DEL NUMERO DI STRATI DI RINFORZO

Nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati i modelli, relativi alle colonne in calcestruzzo e in muratura confinate tramite *FRCM*, andando a verificare come tali tendono a comportarsi al variare del numero di strati di rinforzo.

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, quale deve oscillare da 0 a 6 strati. Da notare, che vengono presi in considerazione solo 6 provini cilindrici, a fronte dei 16 nella casistica precedente:

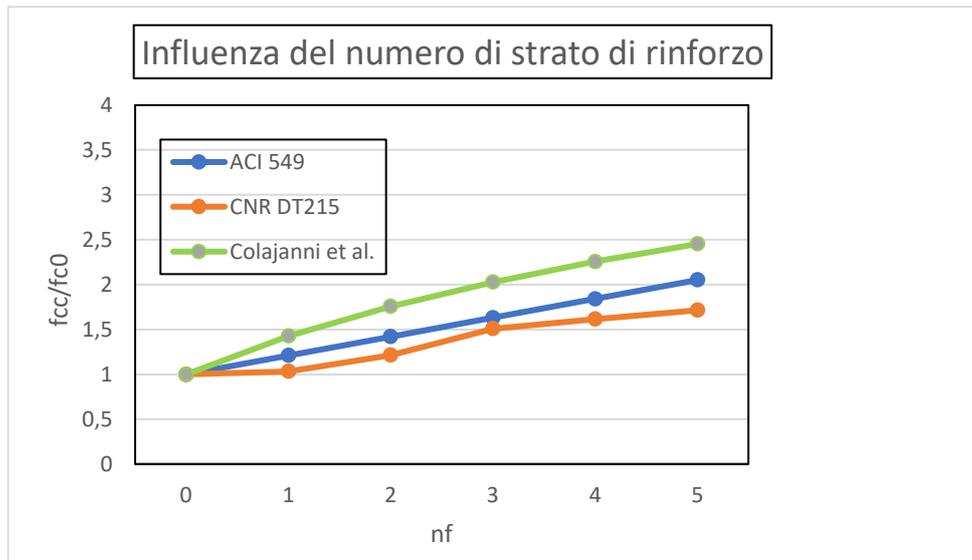


Figura 130_Confronto della risposta dei modelli al variare del numero degli strati di rinforzo, n_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 130**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{c0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere il numero di strati del materiale di rinforzo, n_f , quale tende ad oscillare tra 0 a 5 strati. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che tutti e tre i modelli tendono a presentare una sovrastima dei valori con un accrescimento di tipo lineare, oltre che presentare la medesima origine nel primo provino dove non si presenta confinamento. Si nota, inoltre, che i modelli della *Normativa ACI 549* e della *Circolare CNR DT 215*, presentano dei valori molto simili fino alla presenza di 3 strati di rinforzo. Successivamente, la *Normativa ACI 549-6R* restituisce dei valori di resistenza confinata che risultano essere più alti, rispetto all'altro modello, con un picco pari a 2,05 volte. Invece, *Colajanni et al. (2014)* fornisce i valori incrementali più alti, con un picco corrispondente a 2,45 volte.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere gli stessi dati di partenza, ossia un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{m0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

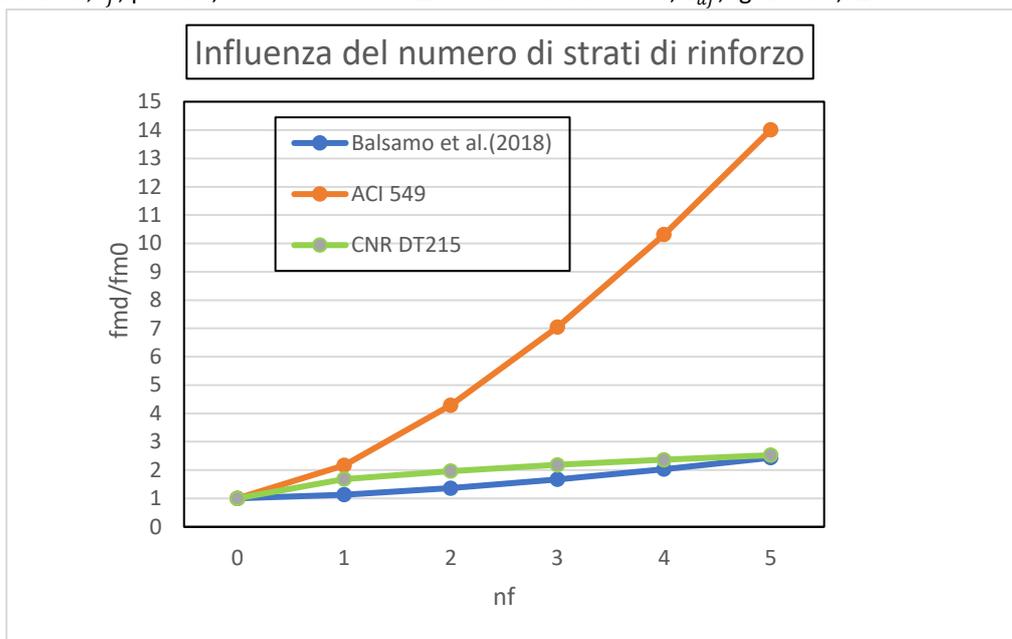


Figura 131_Confronto della risposta dei modelli al variare del numero degli strati di rinforzo, n_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 131**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{m0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere il numero di strati del materiale di rinforzo, n_f , quale tende ad oscillare tra 0 e 5 strati. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che il modello della *Circolare CNR DT215-2018* e della Normativa ACI 549 presentano un trend dei valori incrementali che risulta essere parabolico, al contrario del modello di *Balsamo et al. (2018)* quale mostra una crescita parabolica molto limitata. Quest'ultimo, infatti, mostra un valore medio incrementale pari a 1,60 volte. Per quanto riguarda, invece, la *Circolare CNR DT215-2018*, tale presenta dei valori poco discostati rispetto al modello precedente e, infatti, ha un valore di picco coincidente con quello di *Balsamo et al. (2018)*. Li incrementi maggiori, sono forniti dal modello *e* della *Normativa ACI 549-4R (2013)* con valore massimo pari a 14 volte.

5.2.c INFLUENZA DEL RAPPORTO VOLUMETRICO DELLE FIBRE

Nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati i medesimi modelli nella casistica della variazione dell'entità del rapporto volumetrico di armatura, ρ_f .

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D, pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, quale va ad assumere valori che vanno dallo 0% al 2%. Da notare, che verranno presi in considerazione nuovamente 16 provini, in modo da poter garantire degli intervalli a passo costante.

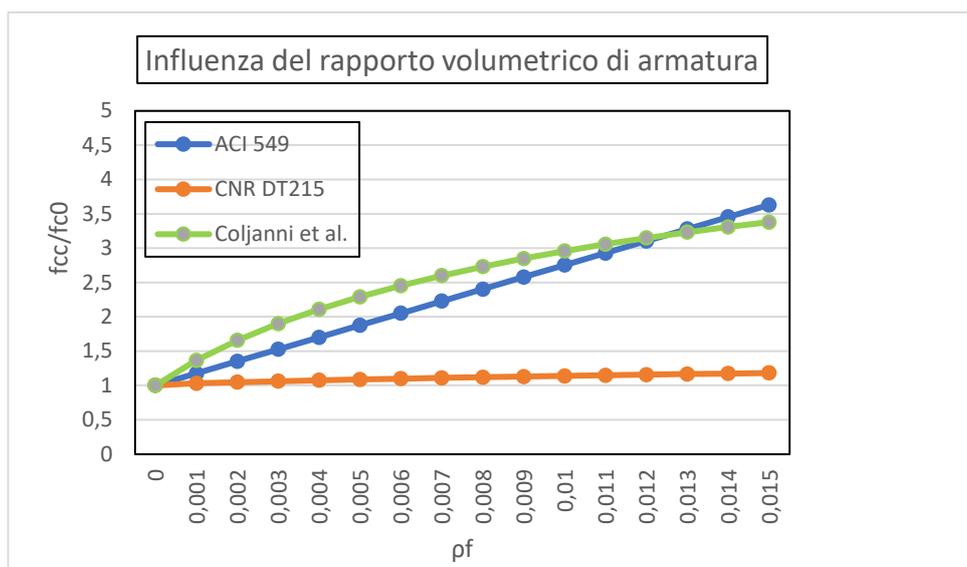


Figura 132_ Confronto della risposta dei modelli al variare del rapporto volumetrico di armatura, ρ_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 132**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{c0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Il parametro variabile risulta essere la ρ_f , quale tende ad oscillare tra lo 0% e il 2%. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che tutti e tre i modelli tendono a presentare una sovrastima dei valori con un accrescimento di tipo lineare, oltre che presentare la medesima origine nel primo provino dove non si presenta confinamento. In questo caso, si nota che il modello della *Circolare CNR DT 215*, fornisce i valori più bassi in termini di incremento della resistenza cilindrica presentando un valore medio pari a 1,10 volte. Invece, i restanti due modelli, presentano una crescita nettamente più elevata, con *Colajanni et al. (2014)* che fornisce i valori più elevati fino al provino n.13, con ρ_f pari a 1,3%, dove i suoi valori incrementali vanno a coincidere col modello della *Normativa ACI 549-6R*. Successivamente, quest'ultima tende a presentare delle resistenze confinate più alte valore di picco pari a 3,62 volte.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere gli stessi dati di partenza, ossia un diametro, D, pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{m0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002,

spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, quale va ad assumere valori che vanno dallo 0% al 2%. Da notare, che verranno presi in considerazione nuovamente 16 provini, in modo da poter garantire degli intervalli a passo costante.

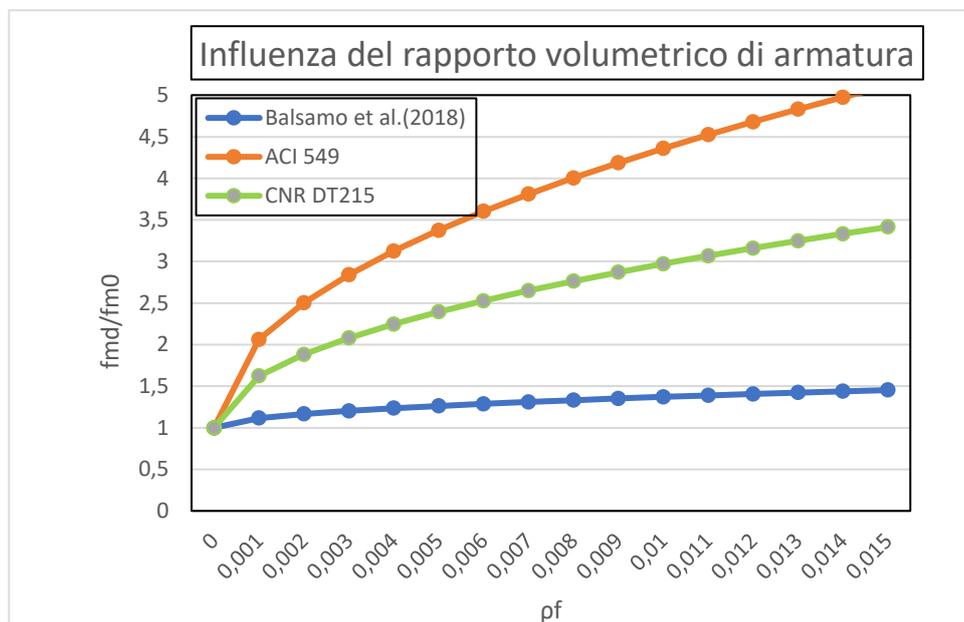


Figura 133_Confronto della risposta dei modelli al variare del rapporto volumetrico di armatura, ρ_f

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 133**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{m0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere la ρ_f , quale tende ad oscillare tra lo 0% e il 2%. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che il modello della *Circolare CNR DT215-2018* e della Normativa ACI 549 presentano un trend dei valori incrementali che risulta essere parabolico, al contrario del modello di *Balsamo et al. (2018)* quale mostra una crescita parabolica molto limitata. Quest'ultimo, infatti, mostra un valore medio incrementale pari a 1,29 volte. I restanti modelli, invece, presentano dei valori molto discostati, dove il loro scarto tende ad aumentare con l'aumentare del parametro esaminato. Difatti, gli incrementi maggiori, sono forniti dal modello e della *Normativa ACI 549-4R (2013)* con valore massimo pari a 5,11 volte.

5.2.d INFLUENZA DELLA PRESSIONE LATERALE DI CONFINAMENTO EFFICACE

Nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati i medesimi modelli nella casistica della variazione della pressione laterale di confinamento efficace, $f_{l,eff}$.

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, ossia tra 0 MPa e 45 MPa. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 10 provini:

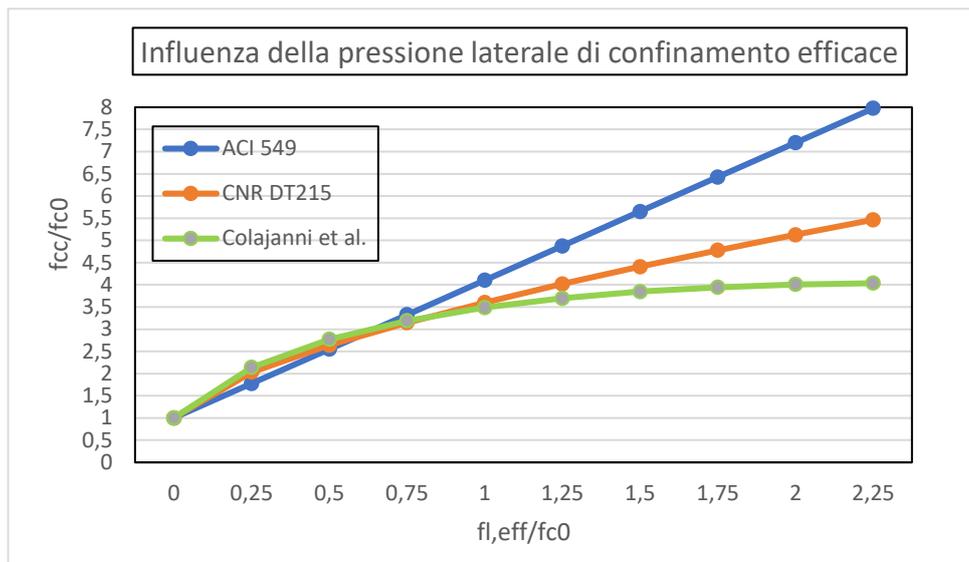


Figura 134_ Confronto della risposta dei modelli al variare della pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 134**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{c0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere la pressione efficace di confinamento, che riveste valori da 0 MPa a 45 MPa. Qui, il modello della *Normativa ACI 549-6R* presenta una crescita lineare, al contrario dei restanti due quali hanno una crescita di tipo parabolica. Da notare, che fino al provino n.4, con $f_{l,eff}$ pari a 15 MPa, i tre modelli tendono a fornire dei valori molto simili e, inoltre, si verifica un valore minimo di discostamento in corrispondenza di un incremento pari a 0,75 della pressione efficace di confinamento. Successivamente, la *Normativa ACI 549-6R* tende a fornire dei valori nettamente più elevati, con un picco pari a 7,97 volte. Invece, i restanti due modelli presentano dei valori molto simili fino ad un incremento unitario e, poi, la *Circolare CNR DT 215* va ad aumentare lo scarto con picco pari al 35%.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere gli stessi dati di partenza, ossia un diametro, D , pari a 150 mm, una resistenza cilindrica iniziale, f_{m0} , pari a 20 MPa, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, ossia tra 0 MPa e 45 MPa. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 10 provini:

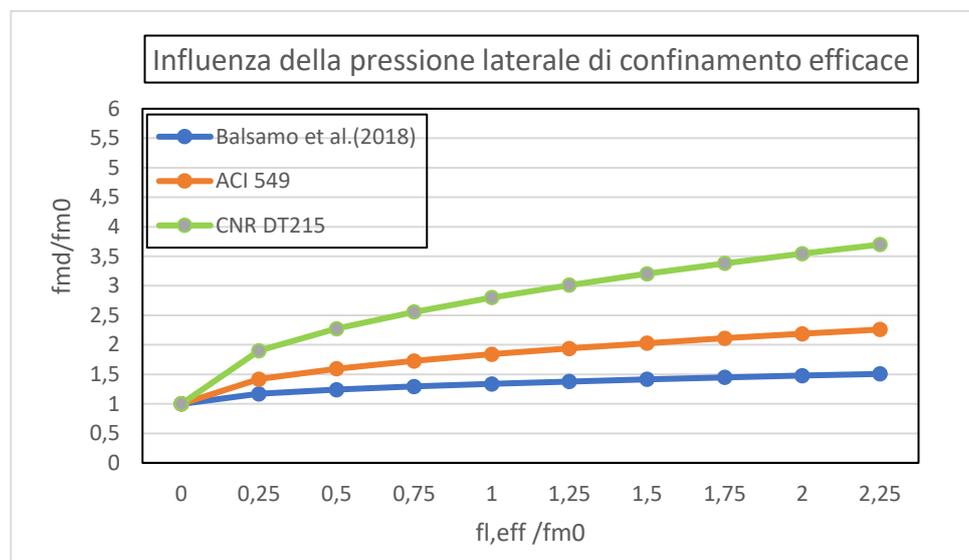


Figura 135_ Confronto della risposta dei modelli al variare della pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 135**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: f_{m0} pari a 20 MPa, deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere la pressione efficace di confinamento, che riveste valori da 0 MPa a 45 MPa. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che il modello di *Balsamo et al. (2018)* e della *Normativa ACI 549* presentano un trend dei valori incrementali che risulta essere parabolico, al contrario del modello della *Circolare CNR DT215-2018* quale mostra una crescita parabolica più ampia. I primi due, mostrano un valore medio incrementale pari, rispettivamente a 1,28 volte e a 1,70 volte. Invece, per la *Normativa ACI 549*, si ha un una crescita dei valori molto più marcata, dove il valore di picco è pari a 3,7 volte.

5.2.e INFLUENZA DELLA RESISTENZA DEL MATERIALE NON CONFINATO

Infine, nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati gli stessi modelli nella casistica di differenti valori della resistenza iniziale del materiale non confinato, $f_{c,0}$.

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Visti i dati iniziali a disposizione e visto il diretto legame con la resistenza cilindrica confinata, un'ulteriore verifica risulta consistere nell'andare a far variare la resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} in un intervallo tra 0 MPa e 45 MPa. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 10 provini:

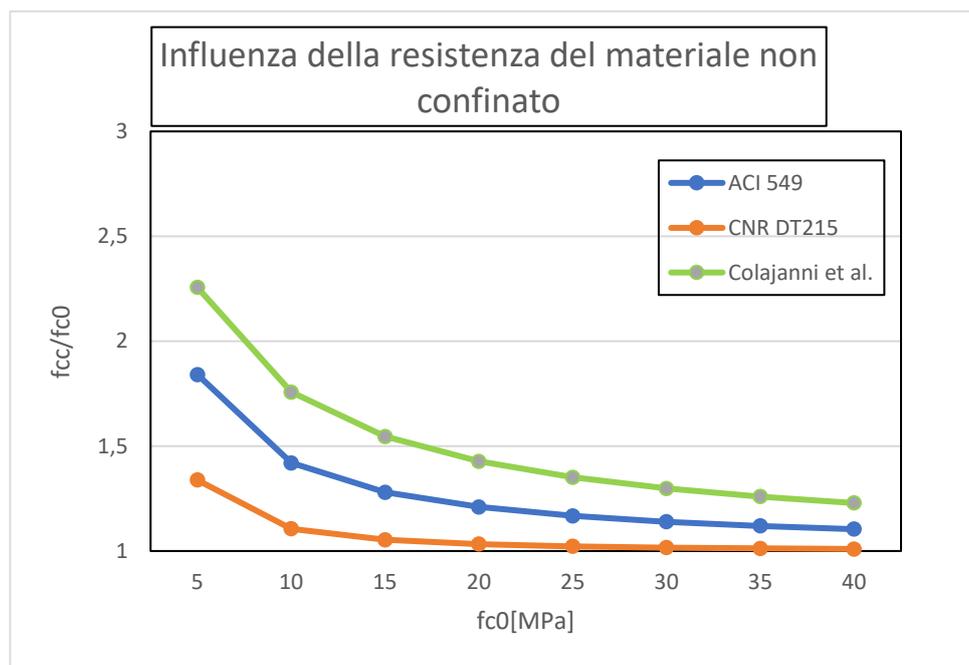


Figura 136_ Confronto della risposta dei modelli al variare della resistenza iniziale, f_{c0}

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 136**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere la resistenza cilindrica iniziale, f_{c0} , che riveste valori da 15 MPa a 45 MPa. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che tutti e tre i modelli presentano dei valori incrementali che tendono ad abbassarsi, e ciò è dovuto al fatto che la f_{c0} , ha una crescita "più rapida" rispetto alla resistenza confinata. Nonostante ciò, non si registrano casi di sottostima del contributo del rinforzo.

Inizialmente, il modello di *Colajanni et al. (2014)* fornisce dei valori incrementali vicini alle 2,25 volte, mentre *Normativa ACI 549-6R* ha un incremento iniziale pari a 1,84 volte. Invece, la *Circolare CNR DT 215* presenta un valore iniziale pari a 1,34 volte. Si nota, però, che la *Normativa ACI 549-6R* fa registrare l'abbattimento di 4 volte, andando a rappresentare la caduta di valori più alta. Invece, dal provino con resistenza iniziale pari a 5 MPa, tutti e tre i modelli tendono a presentare un discostamento che tende a ridursi con l'aumentare della f_{m0} , fino a che tali arrivano a

fornire dei valori molto simili. Quindi il contributo del confinamento tramite *FRCM* in colonne in calcestruzzo, tende ad essere meno efficace per valori alti di resistenza cilindrica iniziale. Inoltre, la scelta del modello, per la valutazione dell'incremento della resistenza confinata, risulta essere non determinante dato che i valori forniti tendono ad essere molto vicini.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere gli stessi dati di partenza, ossia un diametro, D , pari a 150 mm, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, ossia tra 0 MPa e 45 MPa. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 10 provini:

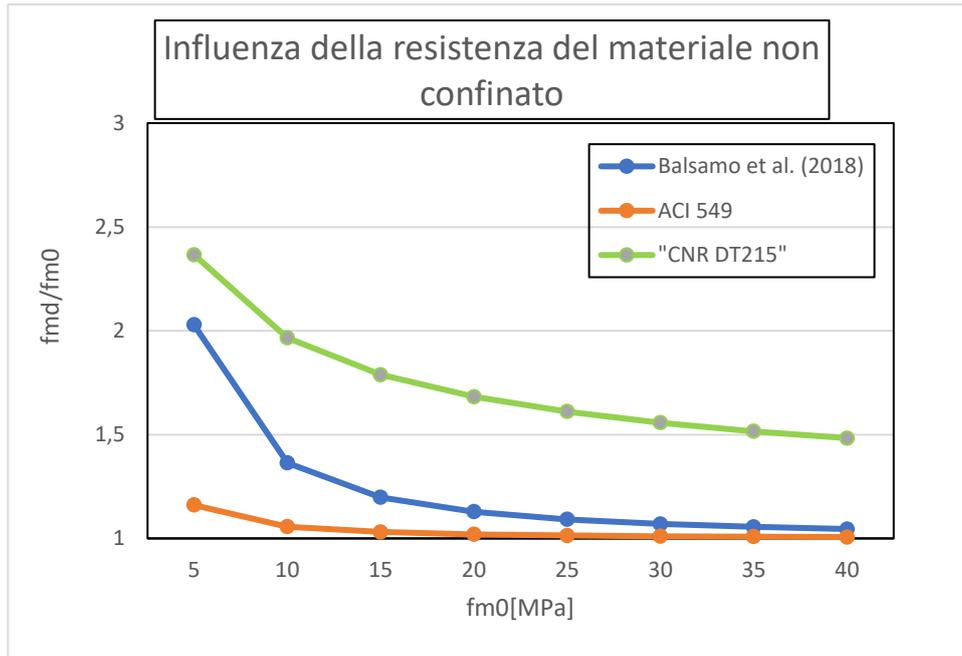


Figura 137 _Confronto della risposta dei modelli al variare della resistenza iniziale, f_{m0}

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 137**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda che, in tale casistica, il parametro variabile risulta essere la resistenza cilindrica iniziale, f_{m0} , che riveste valori da 15 MPa a 60 MPa. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che tutti e tre i modelli presentano dei valori incrementali che tendono ad abbassarsi, e ciò è dovuto al fatto che la f_{m0} ha una crescita "più rapida" rispetto alla resistenza confinata. Nonostante ciò, non si registrano casi di sottostima del contributo del rinforzo. Il modello della *Normativa ACI 549 e di Balsamo et al. (2018)*, forniscono dei valori incrementali molto vicini a quello unitario, al contrario quello della *CNR DT215-2018* fornisce un incremento con valore medio pari a 1,94 volte. Si nota, inoltre, che i primi due modelli tendono a fornire risultati molto simili già da una resistenza cilindrica pari a 5 MPa, mentre la *CNR DT215-2018*, tende a 1,5 volte con l'aumentare della f_{m0} .

5.2.f INFLUENZA DELLA RESISTENZA DELLA MATRICE

Nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati gli stessi modelli nella casistica di differenti valori della resistenza della matrice rinforzante, $f_{c,mat}$.

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Visti i dati iniziali a disposizione e visto il diretto legame con la resistenza cilindrica confinata, un'ulteriore verifica risulta consistere nell'andare a far variare la resistenza della matrice, $f_{c,mat}$, in un intervallo tra 0 MPa e 45 MPa. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 10 provini:

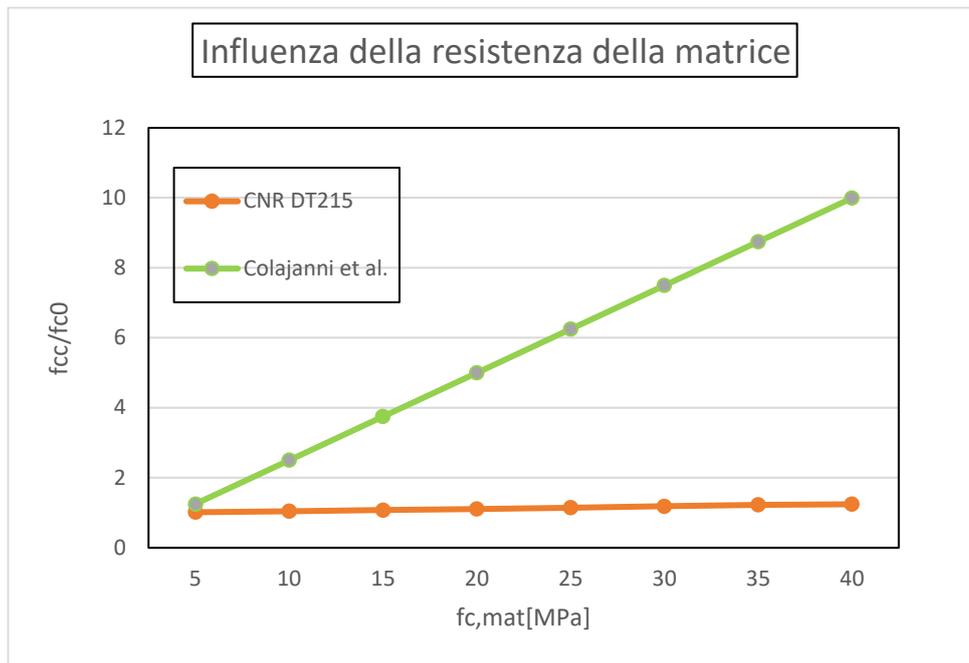


Figura 138_ Confronto della risposta dei modelli al variare della resistenza della matrice, $f_{c,mat}$

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 138**, vengono illustrate le risposte di due modelli, rispetto ai 3 totali, andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Da osservare, che non viene preso in considerazione il modello relativo alla Normativa ACI 549, in quanto non fornisce delle formulazioni utili per affrontare tale casistica di variazione. Si ricorda, che il parametro variabile risulta essere la resistenza della matrice, $f_{c,mat}$, che riveste valori da 5 MPa a 40 MPa. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che i due modelli tendono a presentare dei comportamenti molto distinti: infatti, la *CNR DT215-2018* tende a fornire dei valori pressochè costanti andando a fornire un valore medio di crescita pari a 1,13 volte. Invece, il modello di *Colajanni et al. (2014)* presenta una crescita lineare con un valore di picco pari a 10 volte.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere gli stessi dati di partenza, ossia un diametro, D , pari a 150 mm, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, ossia tra 5 MPa e 40 MPa. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 10 provini:

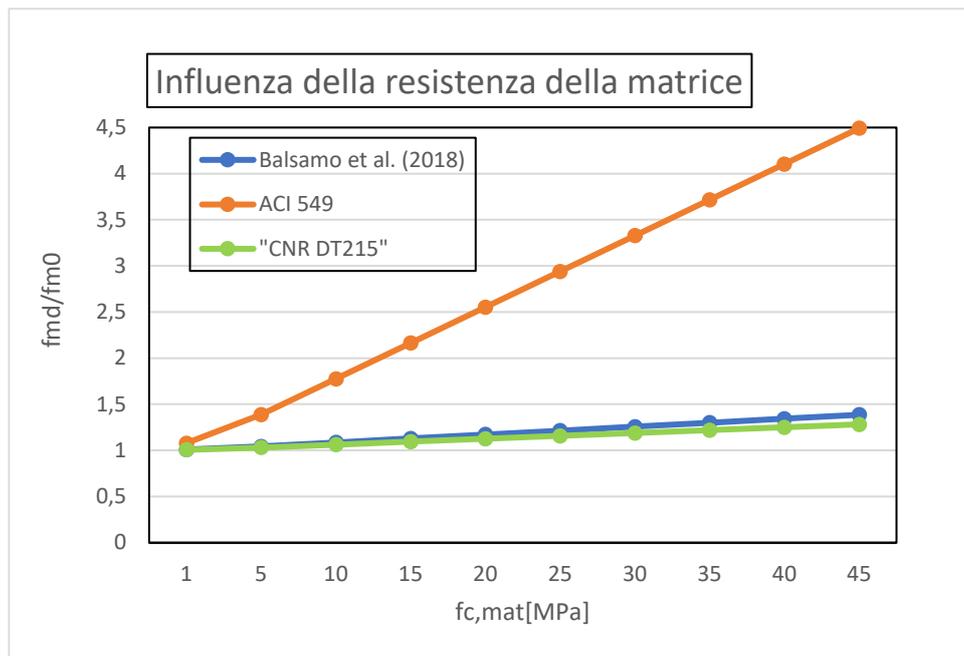


Figura 139_Confronto della risposta dei modelli al variare della resistenza della matrice, $f_{c,mat}$

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 139**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli, andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda, che il parametro variabile risulta essere la resistenza della matrice, $f_{c,mat}$, che riveste valori da 5 MPa a 40 MPa. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che i modelli di *Balsamo et al. (2018)* e della *CNR DT215-2018*, forniscono dei valori molto simili. Si nota un minimo discostamento che tende ad aumentare con la crescita della resistenza della matrice. Invece, la Normativa ACI 549 fornisce una crescita incrementale di tipo lineare con un valore di picco pari a 4,5 volte.

5.2.g INFLUENZA DELLO SPESSORE DELLA MATRICE

Nel seguente sottoparagrafo, saranno considerati gli stessi modelli nella casistica di differenti valori dello spessore della matrice rinforzante, t_{mat} .

Nella casistica delle colonne in calcestruzzo, sono stati presi in considerazione dei provini quali vanno a presentare un diametro, D , pari a 150 mm, una deformazione iniziale, ε_{c0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02.

Visti i dati iniziali a disposizione e visto il diretto legame con la resistenza cilindrica confinata, un'ulteriore verifica risulta consistere nell'andare a far variare dello spessore della matrice, t_{mat} , in un intervallo tra 1mm e 20 mm. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 20 provini:

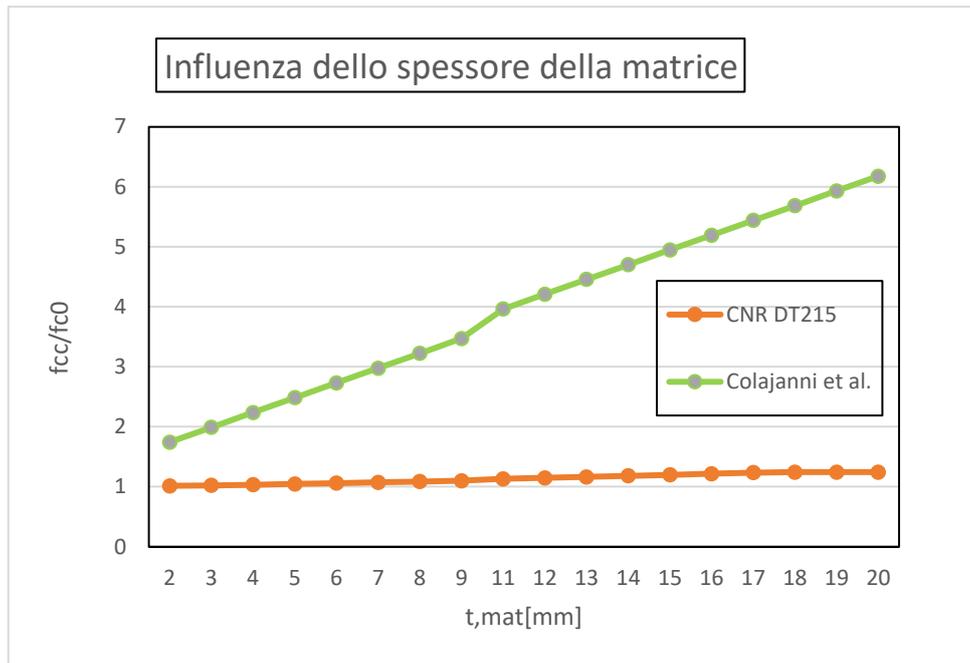


Figura 140_Confronto della risposta dei modelli al variare dello spessore della matrice, t_{mat}

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 140**, vengono illustrate le risposte di due modelli, rispetto ai 3 totali, andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Da osservare, che non viene preso in considerazione il modello relativo alla Normativa ACI 549, in quanto non fornisce delle formulazioni utili per affrontare tale casistica di variazione. Si ricorda, che il parametro variabile risulta essere lo spessore della matrice, t_{mat} , che riveste valori da 1 mm a 20 mm. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che i due modelli tendono a presentare dei comportamenti molto distinti: infatti, la *CNR DT215-2018* tende a fornire dei valori pressochè costanti andando a fornire un valore medio di crescita pari a 1,13 volte. Invece, il modello di *Colajanni et al. (2014)* presenta una crescita lineare con un valore di picco pari a 6,18 volte.

Nella casistica delle colonne in muratura, invece, si andranno a prendere gli stessi dati di partenza, ossia un diametro, D , pari a 150 mm, una deformazione iniziale, ε_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ε_{uf} , uguale a 0,02. Avendo questi dati iniziali a disposizione, si procede alla variazione del nuovo parametro cardine che viene sottoposto ad una variazione ad intervalli continui, ossia tra 1 mm e 20 mm. Si nota, che per garantire la presenza di intervalli ad ampiezza costante, si prendono in considerazione 20 provini:

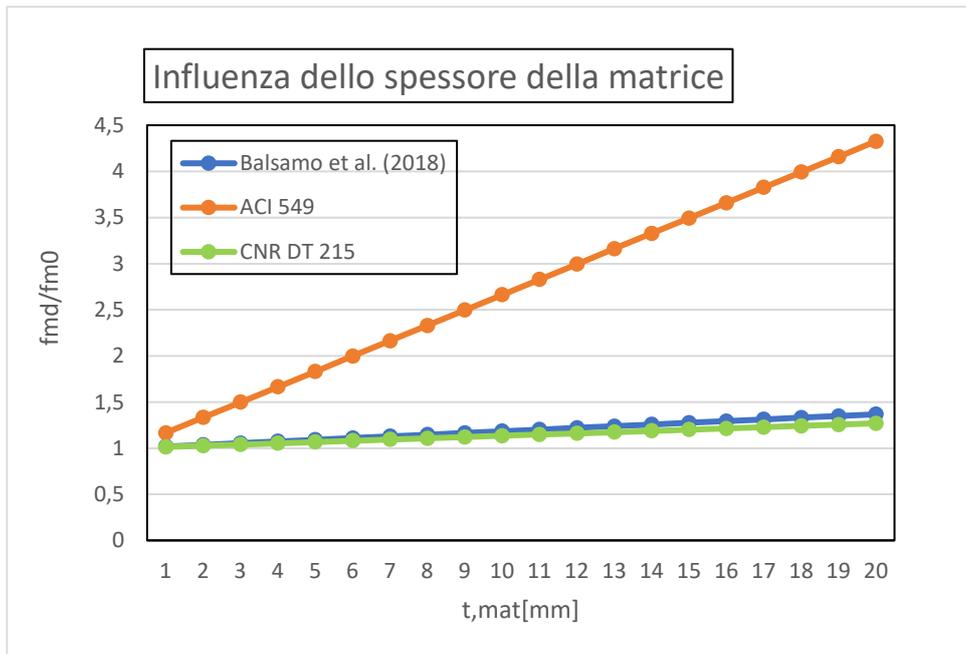


Figura 141_Confronto della risposta dei modelli al variare dello spessore della matrice, t_{mat}

Come mostrato nel grafico riportato in **Figura 141**, vengono illustrate le risposte dei 3 modelli, andando a prendere in considerazione dei provini cilindrici con medesimi parametri iniziali: deformazione iniziale, ϵ_{m0} , pari a 0,002, spessore della fibra, t_f , pari a 0,045mm e deformazione ultima della fibra, ϵ_{uf} , uguale a 0,02. Si ricorda, che il parametro variabile risulta essere lo spessore della matrice, t_{mat} , che riveste valori da 1 mm a 20 mm. In questo confronto, il primo aspetto ben percettibile risulta essere il fatto che i modelli di *Balsamo et al. (2018)* e della *CNR DT215-2018*, forniscono dei valori molto simili. Si nota un minimo discostamento che tende ad aumentare con la crescita della resistenza della matrice. Invece, la *Normativa ACI 549* fornisce una crescita incrementale di tipo lineare con un valore di picco pari a 4,32 volte.

6. OSSERVAZIONI DI PROGETTO SULLE STRATEGIE DI INTERVENTO

Nel seguente capitolo, dove aver esaminato le differenti risposte dei modelli analitici e determinato i più attendibili per ciascun caso di confinamento, si esegue nuova comparazione con lo scopo di determinare quale metodologia risulta essere più efficace nel rinforzo di colonne in calcestruzzo e di colonne in muratura. Successivamente, simile confronto vien effettuato tra i materiali costituenti le colonne, con lo scopo di determinare quale di questi risulta presentare maggiori miglioramenti delle prestazioni meccaniche con l'applicazione di *FRP* e *FRCM*.

6.1 PRESTAZIONI MECCANICHE DI COLONNE IN CALCESTRUZZO CONFINATE MEDIANTE FRP VS FRCM

Come detto in precedenza, tale paragrafo va a concentrarsi sul confronto delle prestazioni meccaniche del confinamento, tramite sistemi *FRP* o *FRCM*, di colonne in calcestruzzo.

Come metodo di comparazione, vengono contemplati i grafici derivanti dall'analisi parametrica per tale tipologia di colonne che sono stati ricavati nel capitolo precedente. In questa fase, però, vengono comparati gli strumenti analitici reputati più attendibili: per il confinamento tramite *FRP*, viene considerato il modello relativo all'articolo di *Spoelstra and Monti (1999)*; invece, per il rinforzo tramite *FRCM*, si adotta lo strumento analitico riguardante la *Circolare CNR DT215 (2018)*. Da ricordare, che la scelta di tali, è basata sul fatto che risultano presentare un discostamento medio, rispetto ai valori sperimentali, con entità minore rispetto i restanti modelli.

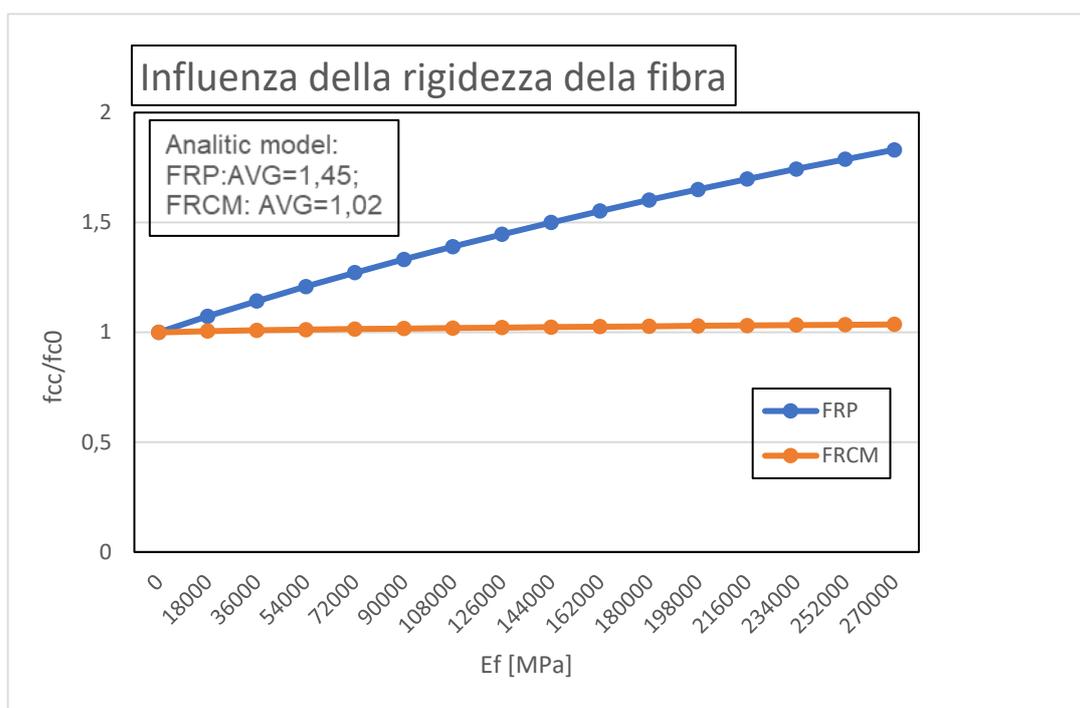


Figura 142_Confronto della risposta, al variare del modulo elastico della fibra, degli FRCM e FRP nelle colonne realizzate in calcestruzzo

Come mostra il grafico riportato in **Figura 142**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli più attendibili riguardanti le tecniche di rinforzo, tramite *FRP* e *FRCM*, per colonne realizzate in calcestruzzo. Aspetto molto importante, risulta essere il fatto che i due modelli sviluppano una crescita dei valori incrementali in due modi completamente differenti: il confinamento tramite *FRP*, mostra un aumento di tipo lineare arrivando ad un picco di 1,83 volte al crescere della rigidezza della fibra rinforzante; invece, i valori forniti dal rinforzo con *FRCM*, crescono in maniera molto più lenta, con un valore di picco raggiunto che risulta essere pari a 1,04 volte. Da notare, però, che il discostamento tende ad evidenziarsi a partire da un valore di E_f pari a 18 GPa. In seguito, con l'aumento del parametro variabile, tale scarto si ingrandisce fino ad arrivare ad un valore massimo vicino al 44% in corrispondenza di una rigidezza di 270 GPa. Quindi, all'aumentare della rigidezza della fibra, il confinamento tramite *FRP* tende a restituire valori di resistenza cilindrica confinata più alti rispetto a quelli ottenuti tramite uso di *FRCM*.

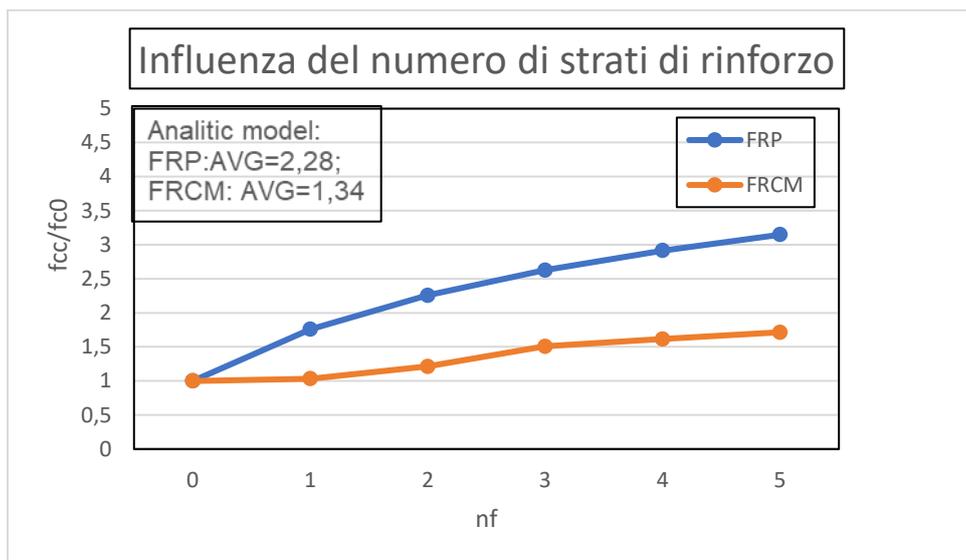


Figura 143_Confronto della risposta, al variare del numero di strati, degli FRCM e FRP nelle colonne realizzate in calcestruzzo

Come mostra il grafico riportato in **Figura 143**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli più attendibili riguardanti le tecniche di rinforzo, tramite *FRP* e *FRCM*, per colonne realizzate in calcestruzzo nella casistica di variazione del numero di strati del rinforzo. I due modelli sviluppano una crescita dei valori incrementali in due modi completamente differenti: il confinamento tramite *FRP*, mostra un aumento di tipo lineare con un picco di 3,14 volte al crescere della rigidezza della fibra rinforzante; invece, i valori forniti dal rinforzo con *FRCM*, crescono in maniera molto più lenta, con un valore di picco raggiunto che risulta essere pari a 1,71 volte. Da osservare, però, che il discostamento tende ad evidenziarsi già dal confinamento tramite un solo strato di confinamento. In seguito, con l'aumento del parametro variabile, tale scarto si ingrandisce fino ad arrivare ad un valore massimo vicino al 46%, in corrispondenza del provino confinato con 5 strati. Quindi, all'aumentare del numero degli strati, il confinamento tramite *FRP* tende a restituire valori di resistenza cilindrica confinata più alti rispetto a quelli ottenuti tramite uso di *FRCM*.

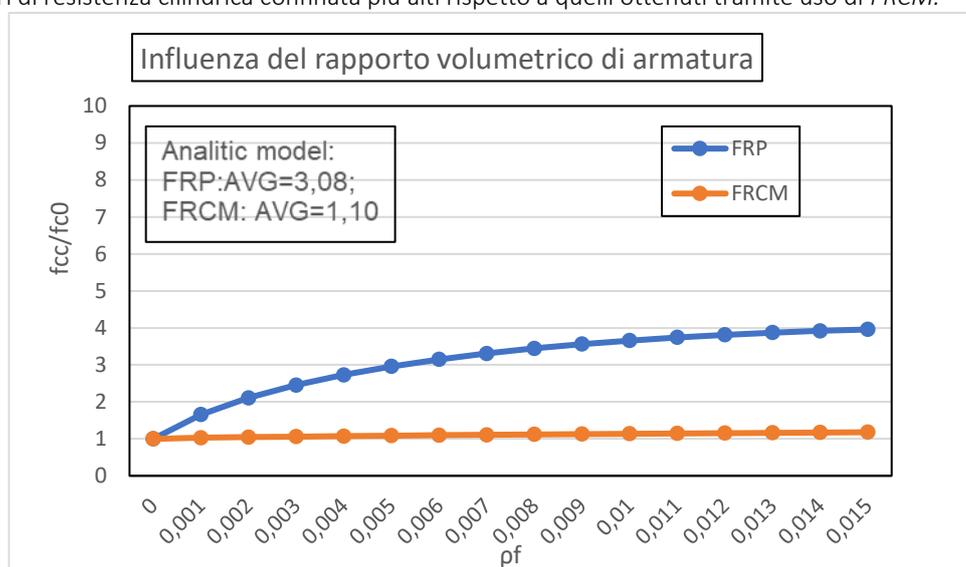


Figura 144_Confronto della risposta, al variare del rapporto volumetrico di armatura, degli FRCM e FRP nelle colonne realizzate in calcestruzzo

Come mostra il grafico riportato in **Figura 144**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli più attendibili riguardanti le tecniche di rinforzo, tramite *FRP* e *FRCM*, per colonne realizzate in calcestruzzo al variare del rapporto volumetrico di armatura. I due modelli si comportano in modo differente al variare della ρ_f : il modello per il sistema *FRCM*, fornisce dei valori incrementali che risultano essere crescenti linearmente ma in maniera limitata, mentre l'applicazione di un sistema *FRP*, tende a presentare la sovrastima di tali valori in maniera parabolica e con un aumento più elevato rispetto all'altro modello. Caratteristica molto interessante, risulta essere che le due modalità di rinforzo

presentano dei valori molto simili fino ad un valore di ρ_f pari a 0,1%, mentre lo scarto diventa più ampio con l'aumento di tale parametro. Dalla tabella in allegato, è possibile notare che i valori medi incrementali sono molto distanti, ossia 3,08 volte per FRP e 1,10 volte per FRCM. Quindi, all'aumentare della ρ_f in una colonna realizzata in calcestruzzo, il modello relativo al sistema FRP tende a fornire dei valori incrementali meno conservativi rispetto a quelli forniti dall'applicazione di FRCM.

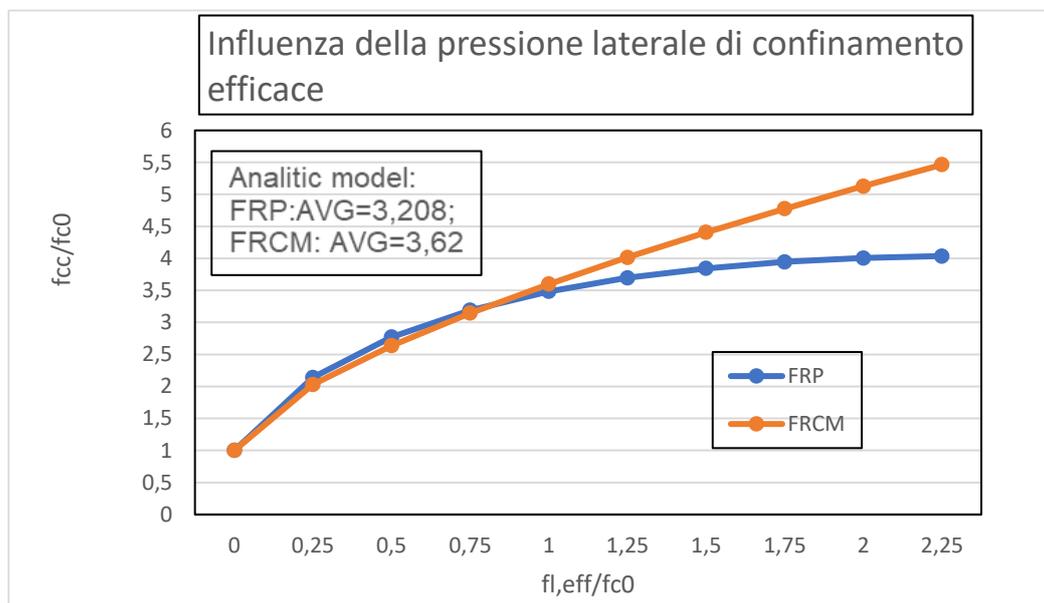


Figura 145_Confronto della risposta, al variare della pressione efficace di confinamento, degli FRCM e FRP nelle colonne realizzate in calcestruzzo

Come mostra il grafico riportato in **Figura 145**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli più attendibili riguardanti le tecniche di rinforzo, tramite FRP e FRCM, per colonne realizzate in calcestruzzo al variare della pressione efficace di confinamento. Aspetto che risalta subito all'occhio, risulta essere il fatto che i due modelli si comportano in modo simile, fornendo dei valori incrementali che si discostano di pochissimo, fino ad un incremento pari a 0,75 volte da parte della $f_{l,eff}$. Successivamente, invece, il confinamento tramite FRP va a fornire dei risultati che presentano una crescita molto limitata con un valore incrementale medio pari a 3,20 volte. Il rinforzo tramite FRCM restituisce una crescita lineare del rapporto andando a presentare un valore medio di accrescimento pari a 3,62 volte e con un valore di picco di 5,46 volte.

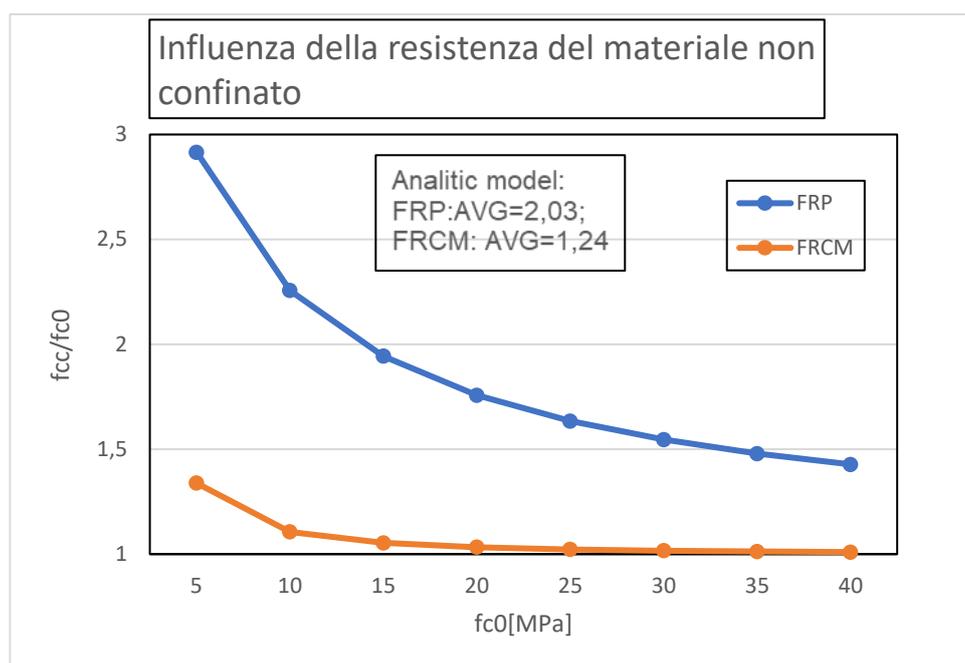


Figura 146_Confronto della risposta, al variare della resistenza cilindrica iniziale, degli FRCM e FRP nelle colonne realizzate in calcestruzzo

Come mostra il grafico riportato in **Figura 146**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli più attendibili riguardanti le tecniche di rinforzo, tramite FRP e FRCM, per colonne realizzate in calcestruzzo al variare della resistenza iniziale. Da notare, che i due modelli si comportano in modo simile, fornendo dei valori incrementali che tendono ad abbassarsi all'aumentare di f_{co} . Ciò è spiegato dal fatto che si ha una crescita più veloce della resistenza iniziale rispetto a quella confinata. Inoltre, con l'aumento di tale parametro variabile, si registra una riduzione del discostamento dei valori incrementali delle due tipologie. Dalla tabella allegata nel grafico dove è possibile notare che i valori medi di incremento risultano essere molto vicini, ossia 2,03 volte per FRP e 1,24 volte per FRCM. Quindi, all'aumentare della resistenza iniziale in una colonna realizzata in calcestruzzo, il modello relativo agli FRP tende a fornire dei valori incrementali più alti rispetto a quelli forniti dal modello per gli FRCM e, inoltre, entrambi i confinamenti tendono ad essere meno efficaci per calcestruzzo con resistenza iniziale elevata.

6.2 PRESTAZIONI MECCANICHE DI COLONNE IN MURATURA CONFINATE MEDIANTE FRP VS FRCM

Tale paragrafo, invece, va a concentrarsi sulla comparazione delle prestazioni meccaniche del confinamento, tramite sistemi *FRP* o *FRCM*, per colonne in muratura.

Come metodo di confronto, come visto nel paragrafo precedente, vengono presi in considerazione i grafici derivanti dall'analisi parametrica più attendibili per il confinamento di tale tipologia di colonna: per il rinforzo tramite applicazione di *FRP*, viene considerato il modello relativo alla *Circolare CNR DT200 R1 (2013)*, invece, per il rinforzo tramite *FRCM*, si adotta il modello analitico riguardante l'articolo di *Balsamo et al. (2018)*.

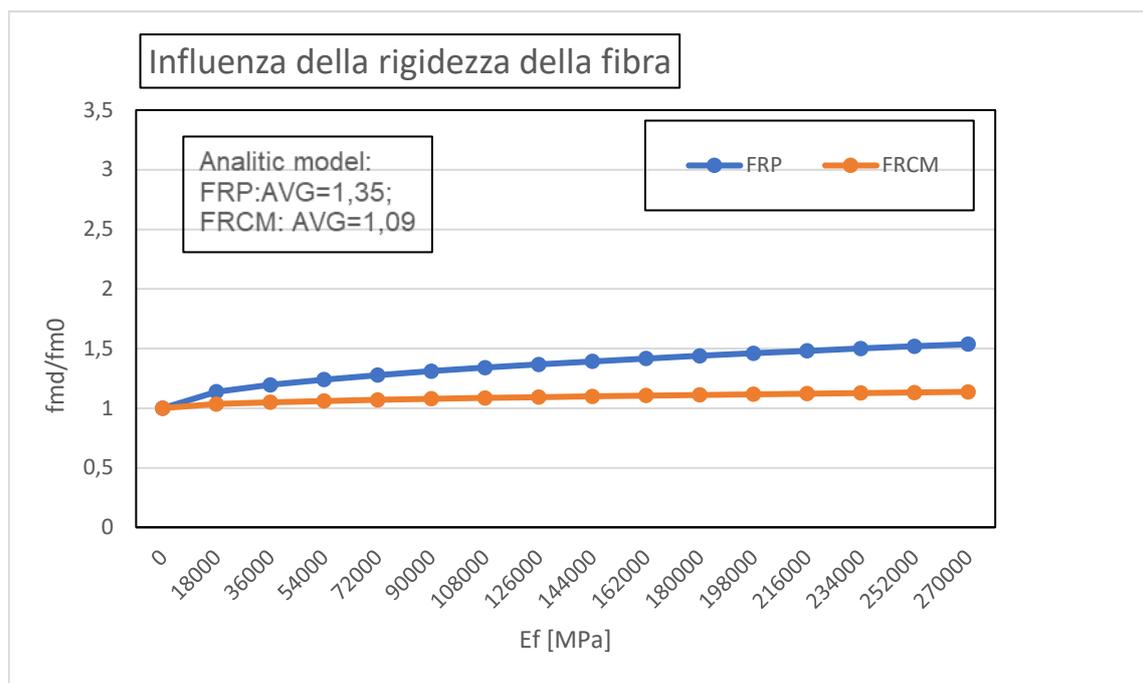


Figura 147_Confronto della risposta, al variare del modulo elastico della fibra, degli FRCM e FRP nelle colonne realizzate in muratura

In **Figura 147**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli più attendibili riguardanti le tecniche di rinforzo, tramite *FRP* o *FRCM*, per colonne realizzate in muratura al variare della rigidità della fibra rinforzante. Da tale rappresentazione grafica, i due modelli si comportano in modo simile, fornendo una crescita lineare ma limitata. Fino ad una rigidità di 18 GPa, i due strumenti analitici tendono a fornire dei valori molto prossimi, mentre si registra un aumento del loro discostamento all'aumentare di E_f con un massimo pari al 29%, in corrispondenza del provino rinforzato con una fibra di rigidità pari a 270 GPa. Il confinamento tramite *FRP*, restituisce un valore medio di incremento di 1,35 volte e un picco di 1,53 volte. Invece, con l'applicazione del sistema *FRCM*, si ha un incremento medio di 1,09 volte. Quindi all'aumentare della rigidità, il rinforzo con *FRP* fornisce una maggiore crescita dei valori della resistenza confinata.

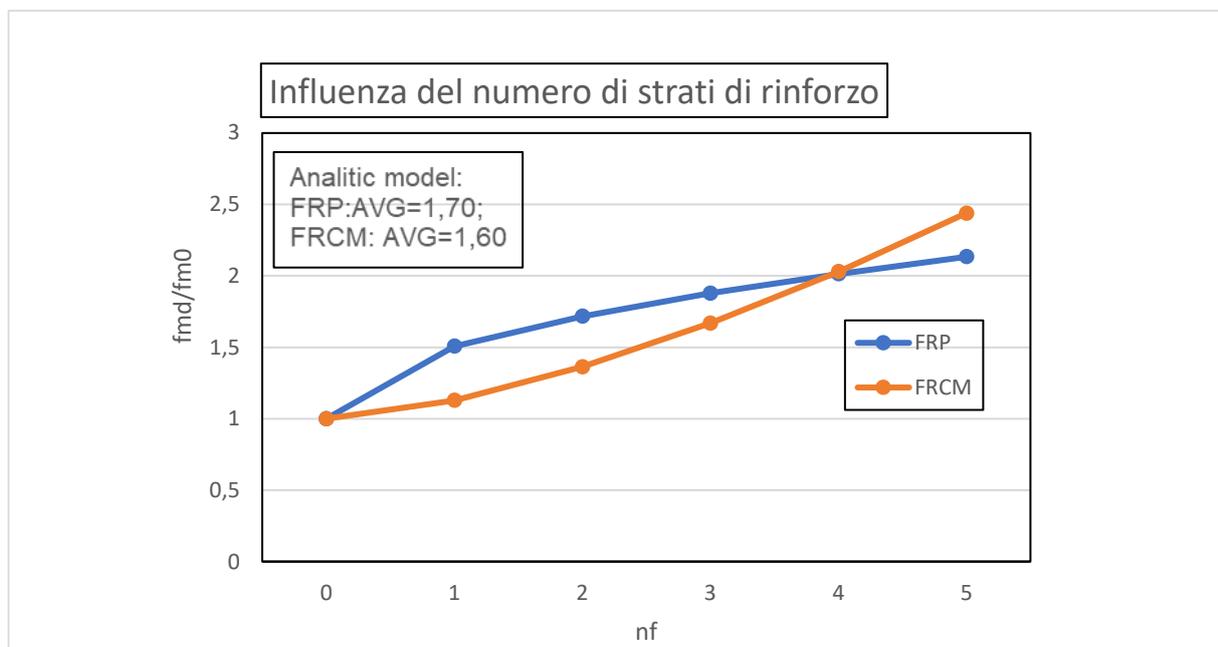


Figura 148_Confronto della risposta, al variare del numero di strati, degli FRCM e FRP nelle colonne realizzate in muratura

Come mostra il grafico riportato in **Figura 148**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli più attendibili al variare del numero di strati del rinforzo. Si nota, il fatto che i due modelli presentano degli sviluppi molto differenti: il rinforzo mediante sistema *FRP*, presenta una crescita di tipo parabolico ed è molto più elevato rispetto a quella dimostrata dal confinamento tramite *FRCM*. Questa circostanza, tende a presentarsi fino a 4 strati, dove i valori dei due modelli vanno a coincidere. Successivamente, nella sperimentazione con 5 strati, si registra un valore di resistenza maggiore dato dal confinamento tramite *FRCM*. Il primo dei due, presenta un valore medio di incremento pari a 1,70 volte, mentre il restante ha una crescita media pari a 1,60 volte. Questo fa concludere, che in funzione del numero di strati di rinforzo applicati, il modello più performante può variare: fino a 3 strati risulta essere l'applicazione di sistemi *FRP*, per 4 entrambi forniscono stesse prestazioni, mentre per 5 strati il sistema *FRCM* associa maggiore resistenza all'elemento in muratura.

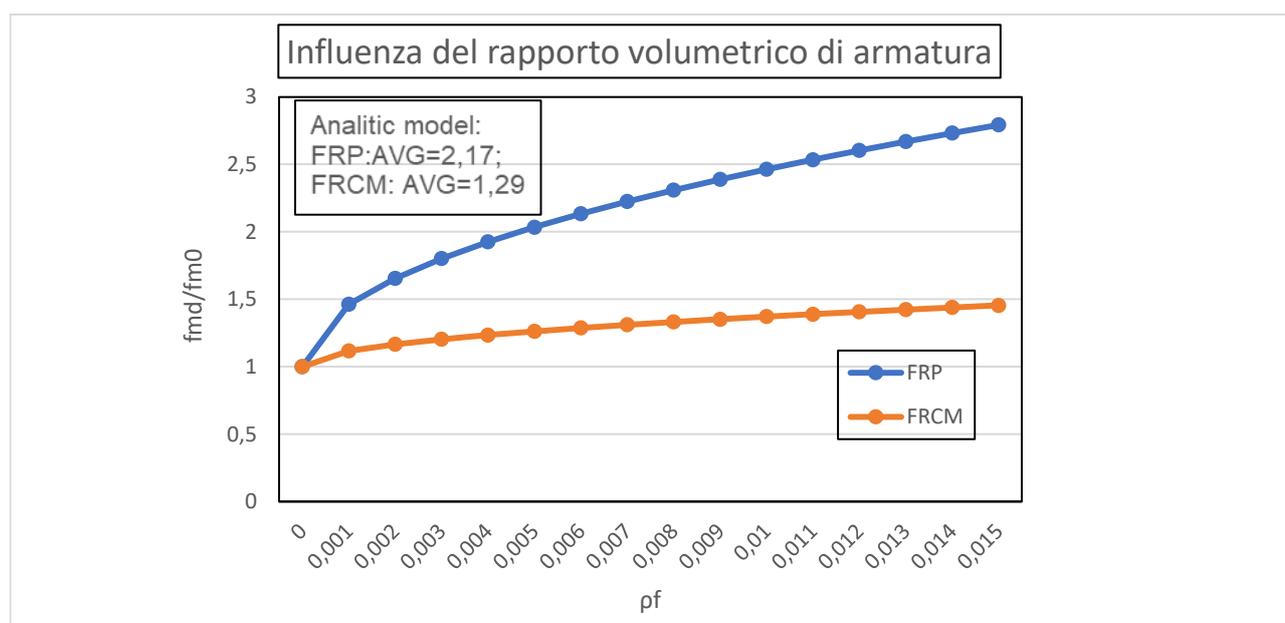


Figura 149_Confronto della risposta, al variare del rapporto volumetrico di armatura, degli FRCM e FRP nelle colonne realizzate in muratura

Come mostra il grafico riportato in **Figura 149**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli più attendibili nei confronti della variazione del rapporto volumetrico di armatura. Aspetto che risalta subito all'occhio, risulta essere il fatto che i due modelli si comportano in modo differente all'aumentare del rapporto volumetrico di armatura: l'applicazione di *FRCM*, fornisce dei valori incrementali che risultano essere crescenti linearmente ma in maniera limitata, mentre l'*FRP* tende ad aumentare la sovrastima della resistenza in maniera lineare. Lo scarto diventa sempre più ampio con l'aumento del rapporto volumetrico, raggiungendo un valore massimo del 47%, in corrispondenza di una pressione di confinamento efficace incrementata di 2,25 volte. Dalla tabella in allegato, è possibile notare che i valori medi di incremento risultano essere molto distanti, ossia 2,17 volte per *FRP* e 1,29 volte per *FRCM*. Quindi, all'aumentare del rapporto volumetrico di armatura in una colonna realizzata in muratura, l'inserimento di *FRP* tendono a fornire dei valori incrementali meno conservativi rispetto a quelli forniti dagli *FRCM*.

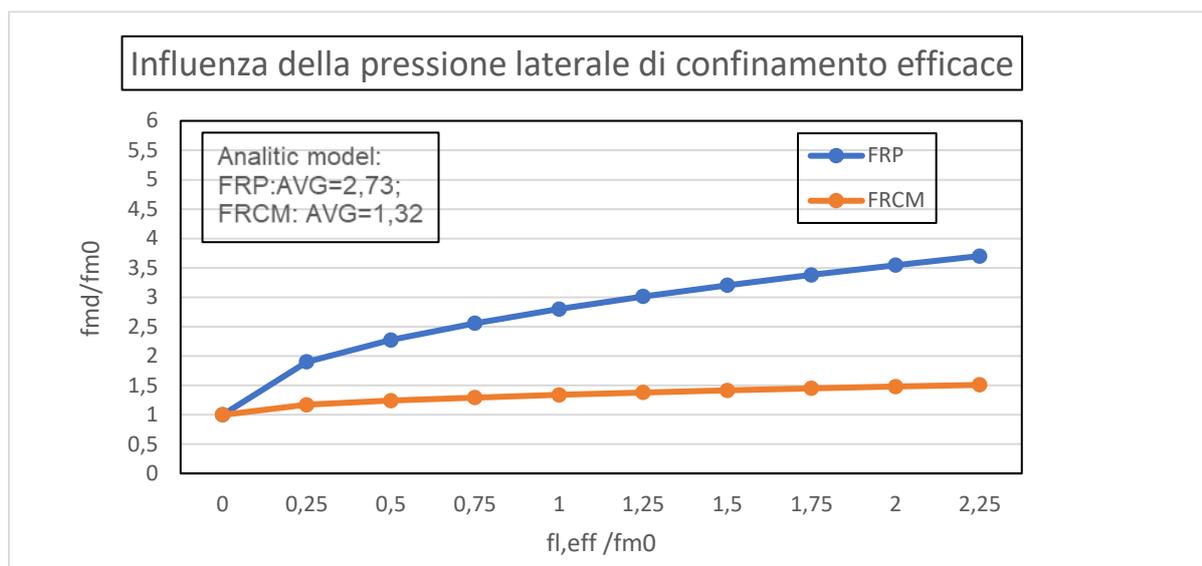


Figura 150_ Confronto della risposta, al variare della pressione efficace di confinamento, degli *FRCM* e *FRP* nelle colonne realizzate in muratura

Come mostra il grafico riportato in **Figura 150**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli più attendibili nei confronti della variazione della pressione di confinamento. I due modelli si comportano in modo completamente distinto, con una crescita parabolica nel caso di applicazione di sistema *FRP*, mentre quasi costante per il confinamento tramite *FRCM*. Conferma di ciò, è data dalla tabella presente nel grafico, dove è possibile osservare la restituzione di valori medi incrementali molto distanti, ossia 2,73 volte per *FRP* e 1,32 volte per *FRCM*. Quindi, all'aumentare della pressione efficace di confinamento in una colonna realizzata in muratura, l'applicazione di *FRP* tende a fornire una resistenza a compressione confinata più alta rispetto a quella fornita dall'inserimento di *FRCM*.

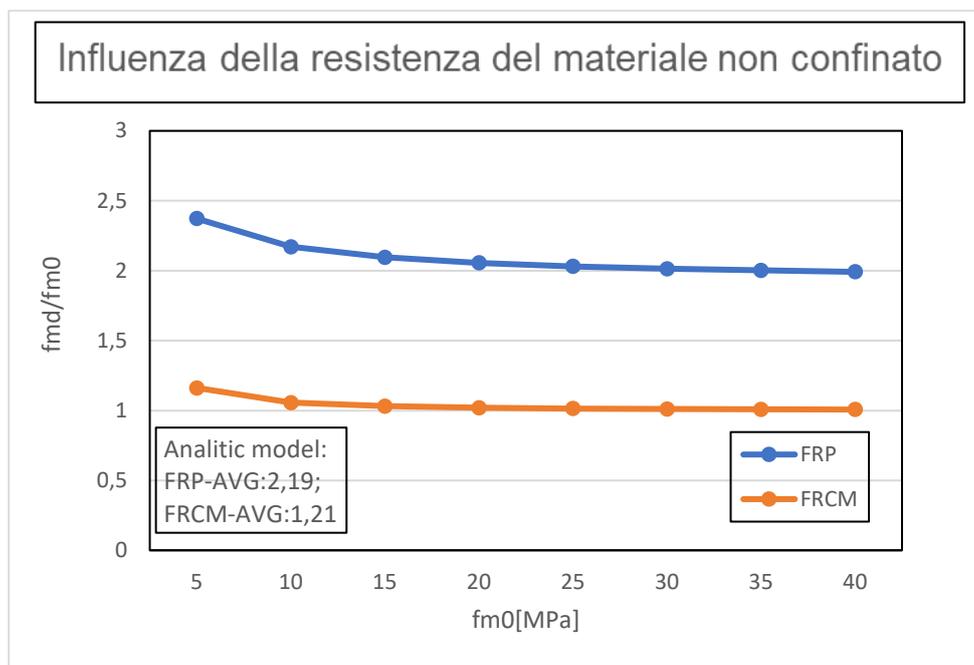


Figura 151_ Confronto della risposta, al variare della resistenza cilindrica iniziale, degli FRCM e FRP nelle colonne realizzate in muratura

Nella **Figura 151**, si vanno a comparare le risposte dei modelli più attendibili nei confronti della variazione della resistenza cilindrica iniziale. Fattore molto evidente, risulta essere il fatto che i due modelli si comportano in modo completamente distinti, fornendo dei valori incrementali che tendono ad abbassarsi all'aumentare di f_{m0} . Il rinforzo tramite *FRP*, mostra un incremento iniziale pari a 3,26 volte, mentre il confinamento tramite *FRCM* mostrano un incremento pari a 2,80 volte. Nei provini più performanti allo stato di fatto, entrambi mostrano una riduzione quantitativa di incremento della resistenza cilindrica, con valori che tendono a 2,0 volte per gli *FRP* e 1 volta per *FRCM*. I valori medi di incremento risultano essere molto differenti, ossia 2,19 volte per *FRP* e 1,21 volte per *FRCM*. Quindi, entrambi i rinforzi sono più efficaci se applicati su provini con basso livello di resistenza cilindrica. Invece, per valori superiori, l'applicazione dei sistemi *FRP* risulta essere ampiamente più efficace.

6.3 EFFICACIA DEL RINFORZO MEDIANTE FRP SU COLONNE IN CALCESTRUZZO VS MURATURA

In questo paragrafo, si procede alla determinazione della tipologia di colonna quale vedrà maggiore miglioramento prestazionale dopo aver subito il confinamento mediante applicazione di sistema *FRP*. Per poter eseguire ciò, vengono presi in considerazione i grafici derivanti dall'analisi parametrica relative alle colonne in calcestruzzo e in muratura confinate tramite tale tipologia di rinforzo. Da sottolineare il fatto che vengono comparati i modelli considerati più attendibili: per il confinamento per le colonne in calcestruzzo, viene considerato il modello relativo all'articolo di *Spoelstra and Monti (1999)*; invece, per il rinforzo per le colonne in muratura, si adotta il modello analitico relativo alla *Circolare CNR DT200 R1 (2013)*. Da ricordare, che la scelta di tali modelli, è basata sul fatto che risultano presentare un discostamento medio con entità minore rispetto ai restanti modelli.

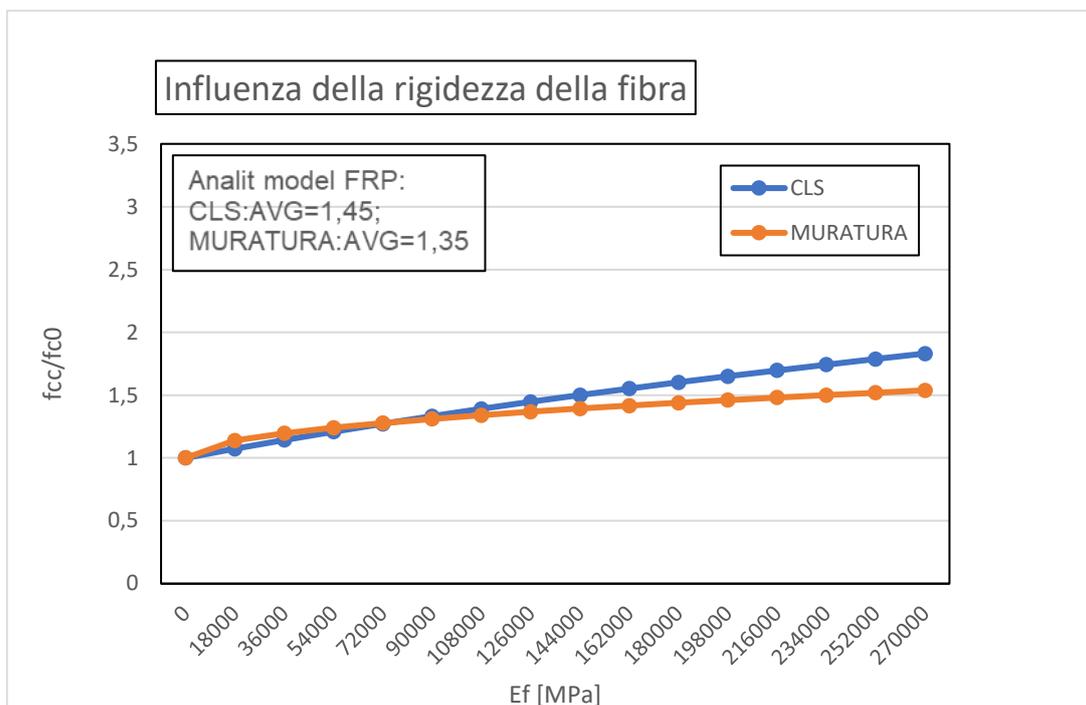


Figura 152_ Confronto della risposta, al variare del modulo elastico della fibra, tra colonna in calcestruzzo e colonna in muratura confinate con FRP

In **Figura 152**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli nei confronti della variazione della rigidità della fibra. Aspetto che risalta subito all'occhio, risulta essere il fatto che i risultati restituiti dalle due colonne risultano essere molto simili, presentando una crescita lineare ma limitata. Da notare, che lo scarto tende ad aumentare di poco all'incremento di E_f . Fino ad una rigidità pari a 90 Gpa, le resistenze confinate risultano essere estremamente vicine. Invece, per valori di rigidità più alti, il discostamento inizia ad essere sempre più evidente con picco pari del 17% registrato nell'ultimo provino con una rigidità della fibra pari a 270 GPa. Nella la tabella in allegato, è possibile notare che i valori medi di incremento risultano essere poco differenziati, 1,45 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,35 volte per le colonne in muratura. Quindi, le due colonne acquisiscono degli incrementi molto simili, per applicazione di rinforzi fibrosi di rigidità fino a 72 GPa. Per valori superiori a questo, il sistema FRP impartisce migliori maggiori per colonne in calcestruzzo.

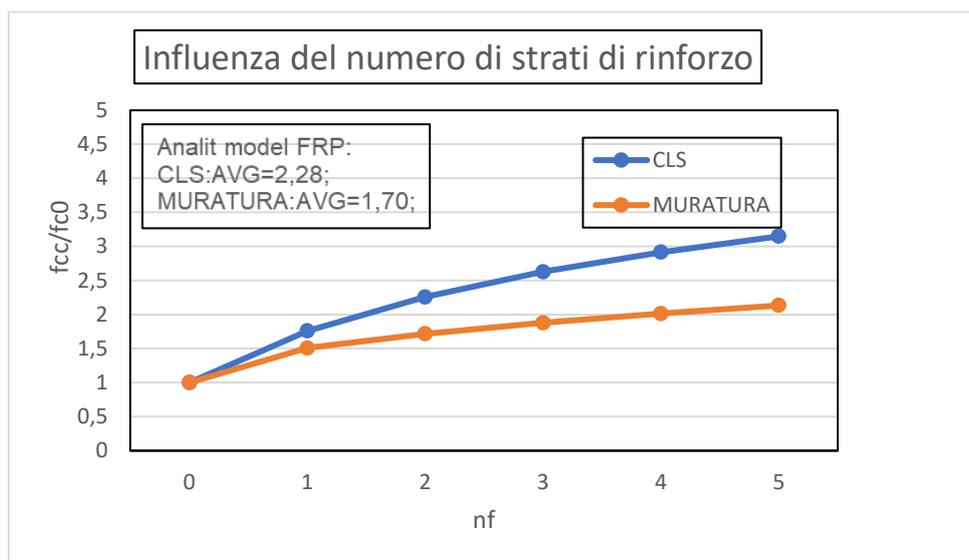


Figura 153_ Confronto della risposta, al variare del numero di strati del rinforzo, tra colonna in calcestruzzo e colonna in muratura confinate con FRP

Nella **Figura 153**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli scelti nei confronti della variazione del numero di strati di rinforzo. Si nota, che le due colonne presentano una crescita di tipo parabolica. Inoltre, i valori tendono ad essere molto ravvicinati, nella casistica della presenza di un solo strato di rinforzo. Successivamente, il discostamento

aumenta al crescere del n_f . Difatti, con la tabella allegata nel grafico, è possibile notare che i valori medi di incremento risultano essere molto vicini, 2,28 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,70 volte per le colonne in muratura. Quindi, all'aumentare del numero di strati del rinforzo, la colonna realizzata in calcestruzzo, risulta fornire valori più alti in termini di incremento della resistenza cilindrica.

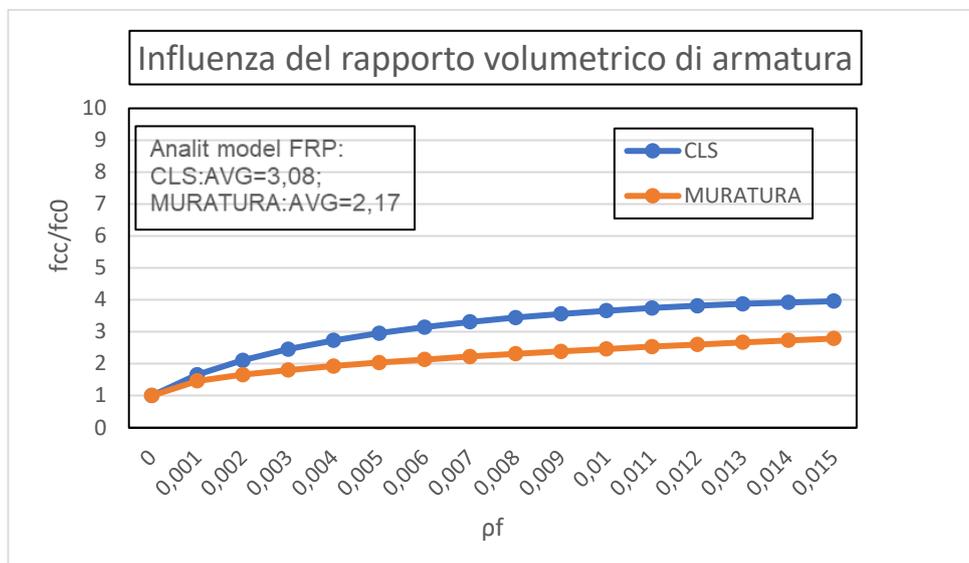


Figura 154_Confronto della risposta, al variare del rapporto volumetrico di armatura tra colonna in calcestruzzo e colonna in muratura confinate con FRP

Come mostra il grafico riportato in **Figura 154**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli più attendibili nei confronti di un'entità differente di rapporto volumetrico di armatura. Risulta evidente il fatto che i due modelli si comportano in modo analogo, in quanto presentano una crescita parabolica. Nei primi provini, si presentano dei valori che risultano essere molto vicini, con resistenze discostate di circa 0,3 volte. All'aumentare del rapporto volumetrico di armatura, lo scarto tende ad aumentare fino a raggiungere un valore costante, del circa 30%, in corrispondenza di ρ_f pari a 0,8%. Nella tabella in allegato, è possibile notare che i valori medi incrementali risultano essere pari a 3,08 volte per le colonne in calcestruzzo e 2,17 volte per le colonne in muratura. Quindi, all'aumentare del rapporto volumetrico di armatura, la colonna realizzata in calcestruzzo tende a presentare maggiori miglioramenti delle prestazioni meccaniche.

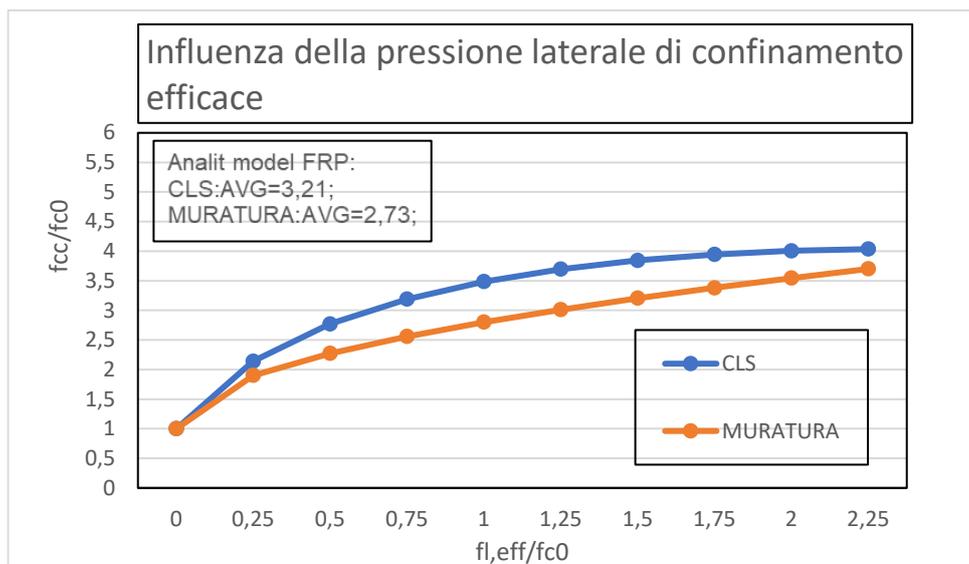


Figura 155_Confronto della risposta, al variare della pressione efficace di confinamento, tra colonna in calcestruzzo e colonna in muratura confinate con FRP

Come mostra il grafico riportato in **Figura 155**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli scelti nei confronti della variazione della pressione efficace di confinamento. In tale casistica, entrambi i modelli presentano una crescita

di tipo parabolica: la colonna in calcestruzzo, presenta dei valori che tendono a rimanere costanti a partire dal provino con un incremento pari a 1,5 volte; invece, la colonna in muratura prosegue questa crescita andando, così, a ridurre lo scarto dai dati dell'altro modello raggiungendo un valore minimo, pari a 0,33 volte. Nella tabella allegata nel grafico, è possibile notare che i valori medi di incremento risultano essere molto ravvicinati, 3,21 volte per le colonne in calcestruzzo e 2,73 volte per le colonne in muratura. Quindi, all'aumentare della pressione di confinamento, la colonna realizzata in muratura, risulta fornire valori più cautelativi in termini di incremento della resistenza cilindrica.

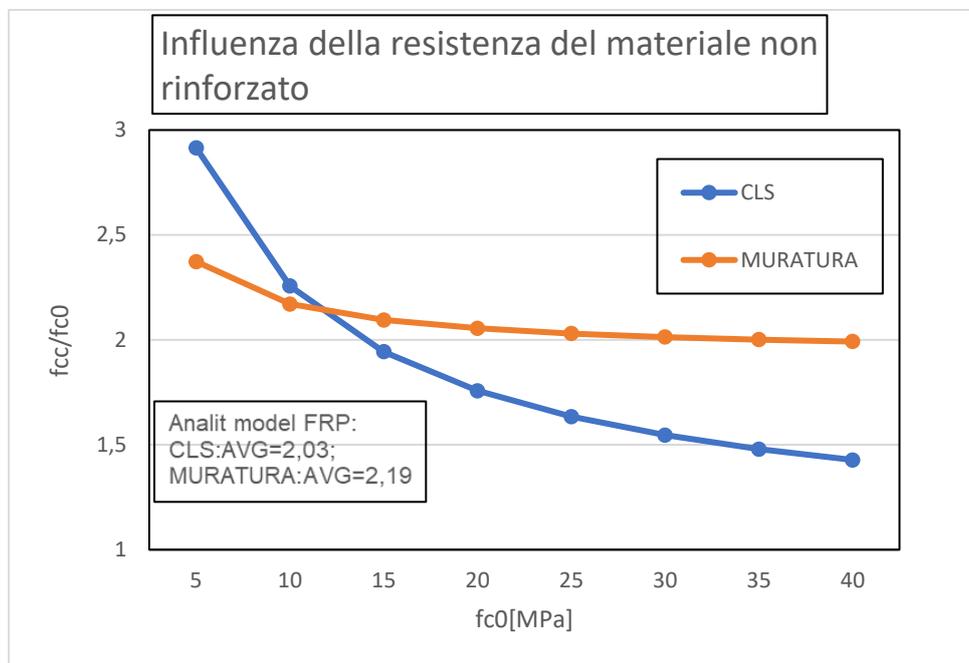


Figura 156_Confronto della risposta, al variare della resistenza cilindrica iniziale, tra colonna in calcestruzzo e colonna in muratura confinate con FRP

Come mostra il grafico riportato in **Figura 156**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli nei confronti della variazione della resistenza cilindrica iniziale. Fattore molto importante, risulta essere il fatto che il confinamento, in tale casistica, impartisce una risposta completamente differente tra le due tipologie di colonne: difatti le colonne in calcestruzzo, all'aumentare della f_{c0} , presenta i valori incrementali che si abbattano sempre di più; invece, sulle colonne in muratura, si registra un primo abbattimento dei valori, ma poi prosegue con un trend costante che risulta essere intorno alle 2 volte. Nella tabella allegata nel grafico, è possibile notare che i valori medi di incremento risultano essere molto vicini, ossia 2,03 volte per le colonne in calcestruzzo e 2,19 volte per le colonne in muratura. Quindi, all'aumentare della resistenza cilindrica iniziale, la colonna realizzata in calcestruzzo, risulta fornire valori più cautelativi in termini di incremento della resistenza cilindrica.

6.4 EFFICACIA DEL RINFORZO MEDIANTE FRM SU COLONNE IN CALCESTRUZZO VS MURATURA

In questo paragrafo, si procede alla determinazione della tipologia di colonna quale vedrà maggiore miglioramento prestazionale dopo aver subito il confinamento mediante applicazione di sistema FRM. Per poter eseguire ciò, vengono presi in considerazione i grafici derivanti dall'analisi parametrica relative alle colonne in calcestruzzo e in muratura confinate tramite tale tipologia di rinforzo. Da sottolineare il fatto che vengono comparati i modelli considerati più attendibili: per il confinamento per le colonne in calcestruzzo, viene considerato il modello riguardante la Circolare CNR DT215 (2018); invece, per il rinforzo per le colonne in muratura, si adotta il modello analitico relativo all'articolo di Balsamo et al. (2018). Da ricordare, che la scelta di tali modelli, è basata sul fatto che risultano presentare un discostamento medio con entità minore rispetto ai restanti modelli.

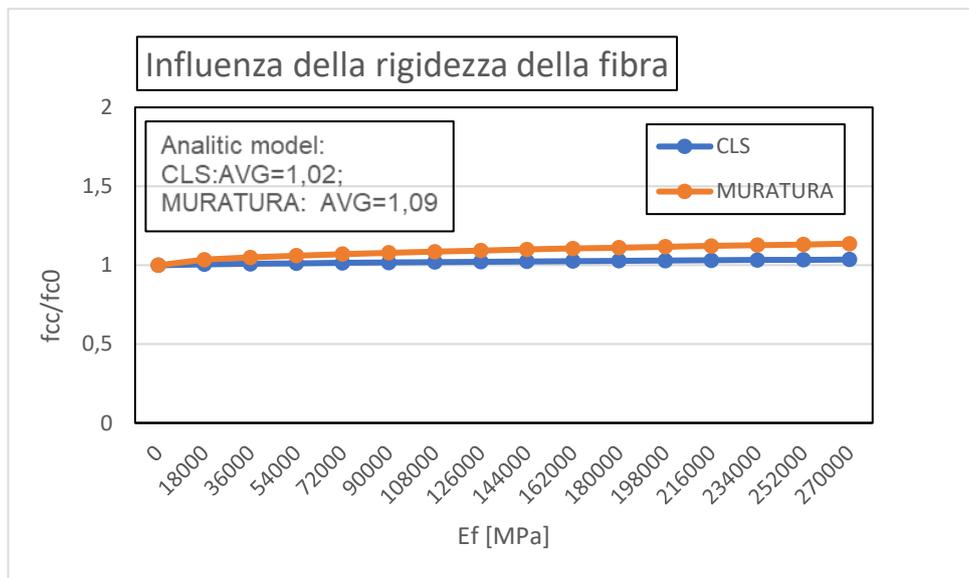


Figura 157_ Confronto della risposta, al variare del modulo elastico della fibra, tra colonna in calcestruzzo e colonna in muratura confinate con *FRCM*

La **Figura 157**, vede il confronto delle risposte delle due tipologie di colonne in funzione della variazione della rigidezza della fibra. Aspetto importante, risulta essere il fatto che la crescita delle resistenze a compressione delle due tipologie di colonne è molto simile, in quanto presentano una crescita lineare ma limitata. Difatti, all'aumentare del parametro variabile, tendono a valori incrementali molto vicini tra loro. Nella tabella in allegato, è possibile notare che i valori medi incrementali risultano essere poco distanziati, 1,02 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,09 volte per le colonne in muratura. Quindi, all'aumentare del modulo elastico della fibra, si registrano valori incrementali di resistenza più alti nelle colonne in muratura.

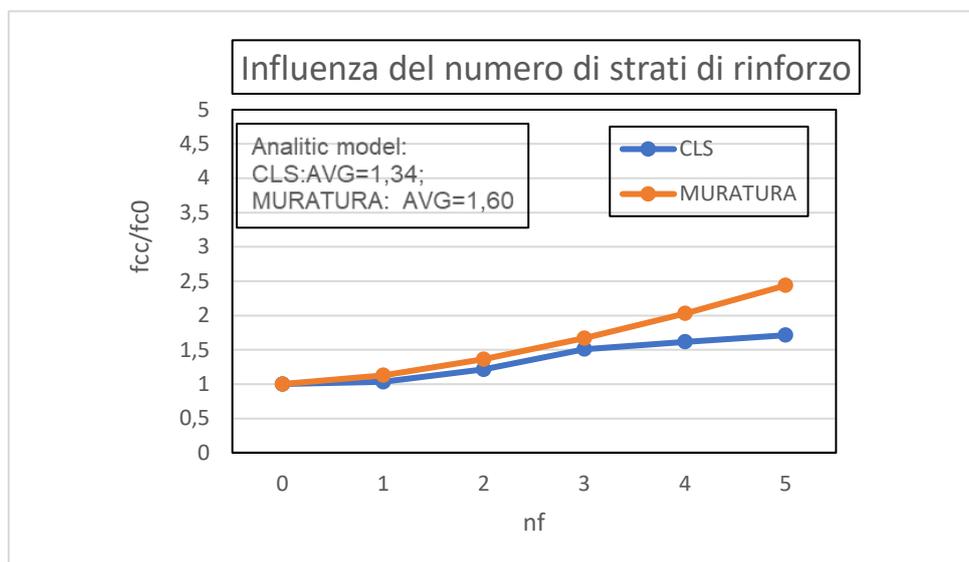


Figura 158_ Confronto della risposta, al variare del numero di strati del rinforzo, tra colonna in calcestruzzo e colonna in muratura confinate con *FRCM*

Come mostra il grafico riportato in **Figura 158**, vengono comparati le risposte dei modelli più attendibili nei confronti della variazione del numero di strati. I due modelli si comportano in modo differente, in quanto le colonne in muratura forniscono una crescita lineare con un valore di picco pari a 2,44 volte. Invece, le colonne in calcestruzzo registrano una crescita più limitata. Da osservare, che i due sviluppi incrementali tendono ad essere molto prossimi fino all'applicazione di 3 strati, mentre dopo si ha netta differenza a favore degli elementi murari. Nella tabella allegata nel grafico, è possibile notare che i valori medi di incremento risultano essere poco differenti, ossia 1,34 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,60 volte per le colonne in muratura. Quindi, all'aumentare del numero di strati del rinforzo, la colonna realizzata in muratura, risulta fornire valori meno cautelativi in termini di incremento della resistenza cilindrica.

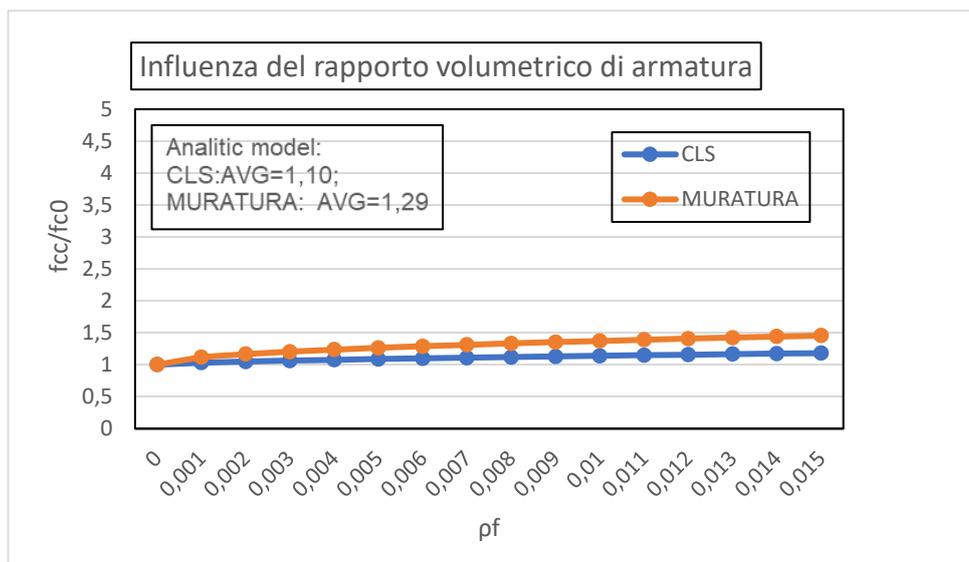


Figura 159_Confronto della risposta, al variare del rapporto volumetrico di armatura, tra colonna in calcestruzzo e colonna in muratura confinate con *FRCM*

Come mostra il grafico riportato in **Figura 159**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli scelti nei confronti del rapporto volumetrico di armatura. Aspetto che risalta subito all'occhio, risulta essere il fatto che i due modelli si comportano in modo simile, andando a presentare una crescita lineare ma molto limitata. Difatti, con la tabella allegata nel grafico, è possibile notare che i valori medi di incremento risultano essere molto vicini, ossia 1,10 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,29 volte per le colonne in muratura. Quindi, all'aumentare del rapporto volumetrico di armatura, la colonna realizzata in muratura, risulta fornire valori meno cautelativi in termini di incremento della resistenza cilindrica.

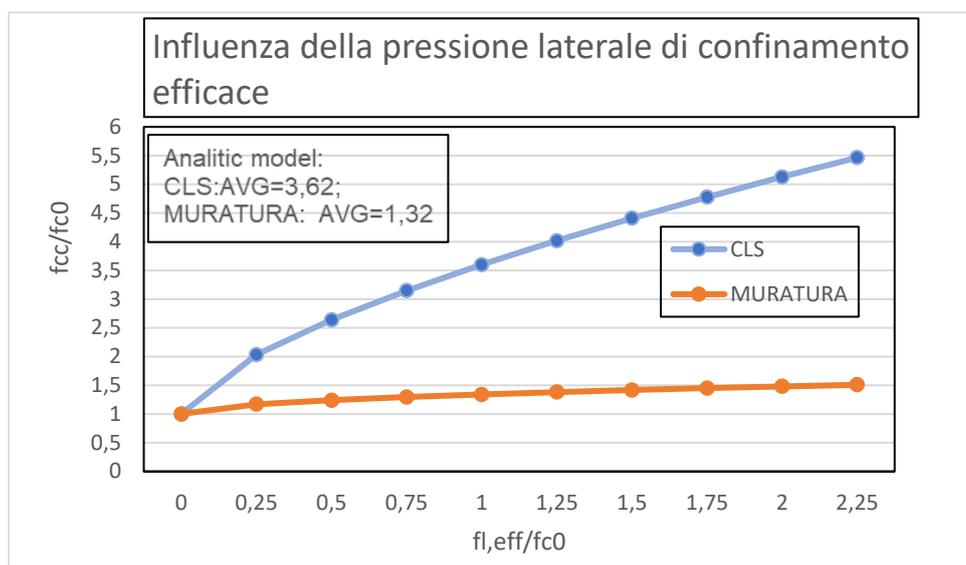


Figura 160_Confronto della risposta, al variare della pressione efficace di confinamento, tra colonna in calcestruzzo e colonna in muratura confinate con *FRCM*

In **Figura 160**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli nei confronti della variazione della pressione efficace di confinamento. Caratteristica importante, risulta essere il fatto che le colonne in muratura presentano una crescita lineare, mentre è di tipo parabolico nel caso delle colonne realizzate in calcestruzzo. I valori tendono ad essere distanti, con lo scarto che tende a crescere con l'incremento della pressione di confinamento. Difatti, con la tabella in allegato, è possibile notare che i valori medi di crescita della resistenza cilindrica risultano essere molto distanti, ossia 3,62 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,32 volte per le colonne in muratura. Quindi, all'aumentare della pressione di confinamento, il sistema *FRCM* impartisce un maggiore miglioramento prestazionale sulle colonne in calcestruzzo.

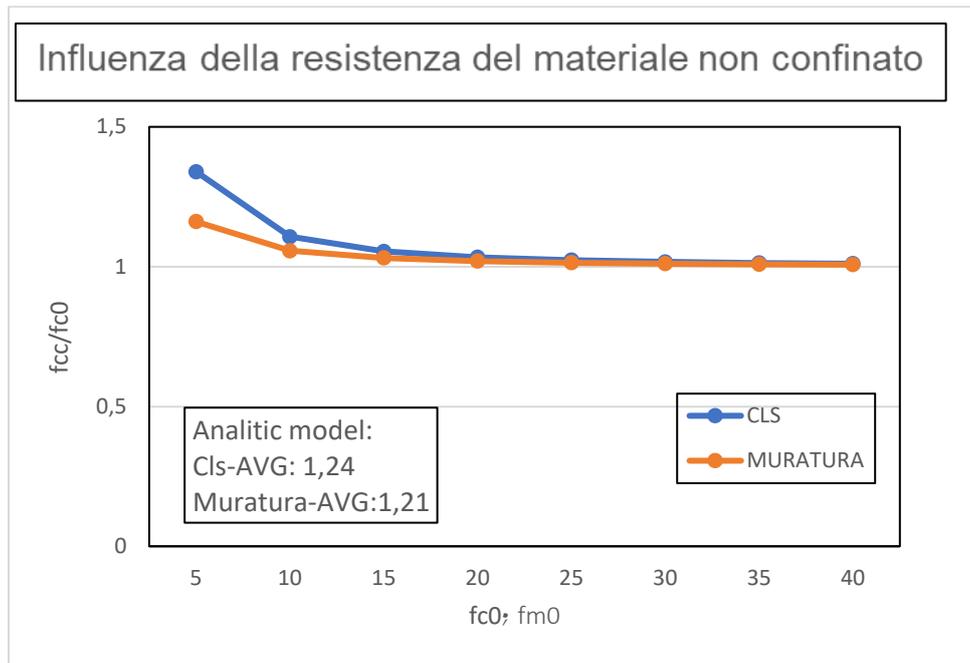


Figura 161_ Confronto della risposta, al variare della resistenza cilindrica iniziale, tra colonna in calcestruzzo e colonna in muratura confinate con *FRCM*

Come mostra il grafico riportato in **Figura 161**, vengono messi a confronto le risposte dei modelli scelti nei confronti della variazione della resistenza iniziale. Fattore molto importante, risulta essere il fatto che il confinamento, in tale casistica, impartisce una risposta simile tra le due tipologie di colonne: entrambe le tipologie di colonne, all'aumentare della f_{c0} o f_{m0} , presentano i valori incrementali che si abbattano fino a raggiungere dei valori costanti poco distanti dall'unità in corrispondenza di $f_{c0} = f_{m0} = 25 \text{ MPa}$. Unica differenza, risulta essere il fatto che le colonne in calcestruzzo presentano un incremento iniziale vicino alle 1,3 volte, mentre quelle in muratura forniscono un incremento vicino a 1,2 volte. Dalla tabella allegata nel grafico, è possibile notare che i valori medi di incremento risultano essere molto distanti, ossia 1,24 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,21 volte per le colonne in muratura.

7. CONCLUSIONI

Lo studio svolto all'interno di questa tesi, ha per oggetto il confinamento di colonne murarie e in calcestruzzo realizzato mediante l'impiego di materiali compositi di tipo *FRP* e *FRCM*. L'obiettivo principale è quello di fornire informazioni di carattere progettuale riferite al tema del rinforzo e consolidamento strutturale delle costruzioni esistenti, con particolare riferimento alle colonne in muratura e in calcestruzzo caricate assialmente con azioni centrate rispetto all'asse. Tale tematica è molto attuale in quanto il presente periodo storico-edilizio è caratterizzato dalla ricerca di nuove metodologie di rinforzo per rendere le strutture esistenti conformi alle normative tecniche.

A tale scopo, sono state valutate le principali caratteristiche delle due tecniche di rinforzo citate attraverso l'analisi di lavori sperimentali disponibili nella letteratura scientifica sul tema, riguardanti prove di carico assiali di colonne murarie e in calcestruzzo rinforzate con *FRP* e *FRCM*. Inoltre, sono stati confrontati i modelli analitici e le normative tecniche che forniscono formule di previsione della resistenza e della duttilità degli elementi confinati, individuando quelli che offrono le previsioni più accurate in base al confronto tra dati teorici e sperimentali. Infine, è stata effettuata un'analisi parametrica in cui si è determinato il grado di influenza della variazione di singoli parametri cardine tra cui la rigidità delle fibre, il numero degli strati di rinforzo, il rapporto volumetrico delle fibre, la pressione laterale di confinamento efficace, la resistenza del materiale non confinato e le proprietà meccaniche delle matrici di rinforzo.

Per il confinamento di colonne in calcestruzzo mediante sistemi *FRP*, sono stati analizzati i seguenti modelli analitici: *Spoelstra and Monti (1999)*, *Campione and Miraglia (2003)* e *la Circolare CNR DT 200-R1 (2013)*.

Nella trattazione delle colonne in muratura confinate con *FRP*, vengono considerati i seguenti modelli analitici: *la Circolare CNR DT 200-R1 (2013)*, il modello di *Di Ludovico et al. (2010)* e quello di *Krevaikas and Triantfillou (2005)*.

Invece, nel caso di applicazione di sistemi *FRCM* su colonne in calcestruzzo, vengono utilizzati i seguenti modelli analitici: *la Normativa ACI 549-4R (2013)*, il modello di *Colajanni et al. (2014)* e *la Circolare CNR DT215 (2018)*.

Nell'applicazione di sistemi *FRCM* su colonne in muratura, invece, sono stati adottati i seguenti modelli: *la Circolare CNR DT215 (2018)*, il modello di *Balsamo et al. (2018)* e *la Normativa ACI 549-6R (2020)*.

Per consentire la comparazione prestazione tra le due tipologie di rinforzo e tra le risposte dei due materiali costituenti le colonne esaminate, un'operazione fondamentale risulta essere la scelta del modello più accurato, nella valutazione della resistenza cilindrica e della deformazione ultima del provino confinato, per ognuna delle 4 casistiche di confinamento trattate.

Per il confinamento mediante i sistemi *FRP*, i modelli più accurati risultano essere quello di *Spoelstra and Monti (1999)* per le colonne in calcestruzzo e *la Circolare CNR DT200-R1 (2013)* per quelle in muratura.

Per la trattazione di colonne rinforzate mediante sistemi *FRCM*, si ha *la Circolare CNR DT215-R1 (2018)* per colonne in calcestruzzo e *la Normativa ACI 549-6R (2020)* per quelle in muratura.

Grazie ai risultati ottenuti dall'analisi parametrica, è stato possibile effettuare alcune osservazioni relative alla scelta della migliore strategia di intervento da adottare a seconda del livello di confinamento che è necessario conseguire nell'ambito del progetto di riabilitazione strutturale e a seconda del materiale che necessita di essere rinforzato, ovvero la colonna muraria o la colonna in calcestruzzo.

Per le colonne realizzate in calcestruzzo, al variare della rigidità del rinforzo, il sistema *FRP* fornisce incrementi di resistenza maggiori rispetto a quelli ottenuti con l'applicazione di *FRCM*. Ciò avviene in maniera significativa già a partire da valori di E_f pari a *18 GPa*, raggiungendo un massimo discostamento tra i risultati delle resistenze confinate, pari al 44%, in corrispondenza di una rigidità dei rinforzi pari a *270 GPa*.

Un risultato simile si ottiene anche al variare del numero di strati di rinforzo applicati: i sistemi *FRP* restituiscono una resistenza confinata maggiore rispetto a quella ottenuta mediante *FRCM*, raggiungendo un picco di circa 3 volte in corrispondenza dell'inserimento teorico di 5 strati di rinforzo.

Facendo variare il rapporto volumetrico delle fibre, il miglioramento prestazionale più significativo si consegue mediante l'applicazione di *FRP*, che, con un valore di ρ_f pari al 15%, fornisce un incremento di resistenza di 4 volte superiore a quella del campione non confinato.

Al variare della pressione efficace di confinamento, si nota che le due tipologie di rinforzo restituiscono delle resistenze molto simili fino ad un'entità di $f_{l,eff}$ pari al 75% della resistenza a compressione iniziale del provino. Per valori maggiori di $f_{l,eff}$, invece, il confinamento tramite *FRP* fornisce una crescita prestazionale del campione che risulta essere molto limitata. Al contrario, l'applicazione del *FRCM*, restituisce un'ulteriore crescita del rapporto tra resistenza confinata e non confinata con un valore medio di accrescimento pari a 3,6 volte per pressione laterale uguale a f_{c0} , e con un valore di circa 5 volte quando $f_{l,eff}$ è pari a $2 f_{c0}$.

Infine, al variare della resistenza cilindrica dei campioni non confinati, si nota che i due sistemi di rinforzo risultano essere maggiormente performanti nei provini di scarsa resistenza. Inoltre, all'aumentare della resistenza iniziale in una colonna realizzata in calcestruzzo, il confinamento mediante *FRP* tende a fornire degli incrementi di resistenza più alti rispetto a quelli forniti dal sistema *FRCM* e, inoltre, entrambi i confinamenti tendono ad essere sempre meno efficaci all'aumentare della resistenza iniziale del materiale.

Nella trattazione delle colonne in muratura, gli *FRP* e gli *FRCM* vanno a fornire dei miglioramenti prestazionali del materiale che risultano essere molto prossimi con la presenza di una rigidezza delle fibre fino a 18 GPa. Per valori maggiori, invece, il sistema *FRP* risulta essere più efficace, come visto precedentemente nel caso del calcestruzzo ma con un minore distacco tra le due tecniche di rinforzo, pari al 30% nel caso di E_f pari a 270 GPa.

Testando la muratura con un differente numero di strati di rinforzo applicati, si nota che i sistemi *FRP* risultano essere più performanti rispetto ai sistemi *FRCM* fino all'applicazione di 3 strati. Interessante notare però che, all'aumentare di n_f , il discostamento dei risultati tende a ridursi, fino all'applicazione di 4 strati dove le resistenze risultano essere molto prossime. Immaginando, invece, l'inserimento teorico di 5 strati di rinforzo, i sistemi *FRCM* risultano essere più prestazionali. Con il confinamento tramite *FRP*, si ha un incremento medio pari a 1,70 volte, mentre con gli *FRCM* si registra una crescita media pari a 1,60 volte. Questo fa concludere che, in funzione del numero di strati di rinforzo applicati, il modello più performante può variare: fino a 3 strati risulta essere l'applicazione di sistemi *FRP*, per 4 entrambi forniscono stesse prestazioni, mentre per 5 strati il sistema che fornisce maggiore resistenza all'elemento in muratura è quello in *FRCM*.

Invece, valutando la risposta meccanica del materiale per differenti valori del rapporto volumetrico di fibra, si nota che l'applicazione di *FRCM*, fornisce degli incrementi di resistenza limitati rispetto all'altro sistema. Gli *FRP*, forniscono dei valori nettamente più elevati, con uno scarto che diventa sempre più evidente all'aumentare della ρ_f .

Applicando sui provini una pressione efficace di confinamento crescente, si nota che l'applicazione di *FRP* tende a fornire una resistenza a compressione confinata più alta rispetto a quella fornita dall'inserimento di *FRCM*.

Infine al variare della resistenza iniziale non confinata delle colonne in muratura, si evidenzia il fatto che le due tipologie di rinforzo forniscono incrementi di resistenza sempre più ridotti all'aumentare di f_{m0} . Interessante notare che i sistemi *FRP* vanno a restituire degli incrementi quasi raddoppiati rispetto a quelli forniti dall'altro rinforzo.

Per fissata tipologia di confinamento, è possibile infine presentare alcune osservazioni di sintesi sulle prestazioni esibite da colonne in muratura o in calcestruzzo rinforzate.

Il confinamento tramite *FRP*, garantisce alle due tipologie di colonne dei miglioramenti prestazionali molto simili, per applicazione di rinforzi con rigidezza fino a 90 GPa, mentre per rigidezze maggiori, sono le colonne in calcestruzzo a beneficiare maggiormente degli effetti del rinforzo.

Generalmente, si osserva che, qualunque sia il numero di rinforzo (compresi tra 0-5), le colonne in calcestruzzo conseguono incrementi di resistenza superiori. Tuttavia, con l'applicazione di un solo strato di rinforzo, il sistema *FRP*, fornisce un miglioramento confrontabile per entrambi i materiali. Invece, all'applicazione di due o più strati, i valori medi di incremento risultano essere pari a 2,28 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,70 volte per le colonne in muratura.

Sia colonne in calcestruzzo che quelle in muratura risentono di benefici sufficientemente confrontabile all'aumentare del rapporto volumetrico delle fibre ma con la precisazione che all'aumentare di ρ_f , lo scarto tende ad accentuarsi fino a raggiungere un valore costante, di circa il 30%, in corrispondenza di ρ_f pari a 0,8%.

Al variare della pressione efficace di confinamento laterale, invece, si registra una crescita non lineare della resistenza di campioni confinati molto simile sia nel calcestruzzo che nella muratura, con valori leggermente inferiori nel secondo caso. Mediamente, infatti, per variazioni della pressione laterale di confinamento compresi tra 0 e 2,25 volte la resistenza non confinata del materiale, si registrano valori medi di incremento di resistenza confinata di 3,21 volte per le colonne in calcestruzzo e 2,73 volte per le colonne in muratura.

Infine, per un confinamento mediante *FRP* su provini con differente resistenza iniziale, si nota una risposta completamente differente da parte delle due tipologie di colonne. Infatti le colonne in calcestruzzo, all'aumentare di f_{c0} , presentano incrementi di resistenza che si abbassano sempre di più; invece, sulle colonne in muratura, dopo un iniziale abbattimento dei valori, si registra un successivo trend costante che fornisce incrementi di resistenza di circa 2 volte rispetto alle resistenze delle colonne non confinate.

Esaminando infine, il caso di confinamento mediante *FRCM*, si possono trarre le seguenti conclusioni di sintesi.

La variazione della rigidezza delle fibre influenza molto poco il livello di incremento di resistenza quando il sistema di rinforzo è applicato ad una colonna in calcestruzzo o in muratura.

L'efficacia di incremento è invece più sensibile alla variazione del numero di strati di rinforzo, mostrando che, con un numero di strati superiore a 3, si ha una netta differenza a favore delle colonne murarie. I valori medi di incremento risultano essere pertanto abbastanza differenti, ossia 1,34 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,60 volte per le colonne in muratura.

Considerando, invece, un confinamento con valori crescenti di rapporto volumetrico delle fibre, si nota che muratura e calcestruzzo presentano valori medi pari a 1,10 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,29 volte per le colonne in muratura. Quindi, all'aumentare del rapporto volumetrico delle fibre, la colonna realizzata in muratura beneficia maggiormente degli effetti del confinamento.

Considerando invece una pressione efficace di confinamento variabile, si osserva che i valori di incremento della resistenza conseguibili nelle due tipologie di colonna tendono ad essere distanti, con uno scarto crescente con l'incremento della pressione di confinamento. Si osserva infatti che i valori medi di incremento della resistenza cilindrica sono pari a 3,62 volte per le colonne in calcestruzzo e 1,32 volte per le colonne in muratura.

Infine, considerando diversi valori di resistenza dei campioni non confinati, si nota, che all'aumentare di f_{c0} o f_{m0} , entrambi i tipi di colonna presentano dei valori di incremento di resistenza che si abbassano fino a raggiungere dei valori costanti poco distanti dall'unità quando $f_{c0} = f_{m0} = 25 \text{ MPa}$. Inoltre, le colonne in muratura presentano un incremento iniziale di resistenza inferiore rispetto alle colonne in calcestruzzo di analoga resistenza in assenza di confinamento.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Silva, MA, & Rodrigues, CC (2006). Effetti dimensionali e di rigidità relativa sulla rottura per compressione di colonne in calcestruzzo avvolte con vetroresina FRP. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (3), 334-342.
2. Campione, G., La Mendola, L., Monaco, A., Valenza, A., & Fiore, V. (2015). Comportamento a compressione di cilindri in calcestruzzo avvolti esternamente con fibre di basalto. *Compositi Parte B: Ingegneria*, 69, 576-586.
3. Donnini, J., Spagnuolo, S., & Corinaldesi, V. (2019). Confronto tra l'uso di FRP, FRCM e HPM per il confinamento del calcestruzzo. *Compositi Parte B: Ingegneria*, 160, 586-594.
4. Sneed, LH, Carloni, C., Baietti, G., & Fraioli, G. (2017). Confinamento di colonne in muratura di laterizio con SRG. In *Key Engineering Materials* (Vol. 747, pp. 350-357). Trans Tech Publications Ltd.
5. Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2020). Confinement of masonry columns with textile-reinforced mortar jackets. *Construction and Building Materials*, 258, 120343.
6. Theofanis, K. D. (2015, December). Textile reinforced mortar system as a means for confinement of masonry structures. In *Proc. In: the 12th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-12) & the 5th Asia-Pacific Conference on Fiber Reinforced Polymers in Structures (APFIS-2015) Joint Conference* (Vol. 14, p. 16).
7. Trapko, T. (2014). Elementi in calcestruzzo confinato con compositi PBO-FRCM. *Materiali da costruzione e da costruzione*, 73, 332-338.
8. Colajanni, P., De Domenico, F., Recupero, A., & Spinella, N. (2014). Colonne in calcestruzzo confinate con malte cementizie fibrorinforzate: sperimentazione e modellazione. *Materiali da costruzione e da costruzione*, 52, 375-384.
9. Donnini, J., Spagnuolo, S., & Corinaldesi, V. (2019). Confronto tra l'uso di FRP, FRCM e HPM per il confinamento del calcestruzzo. *Compositi Parte B: Ingegneria*, 160, 586-594.
10. Cascardi, A., Micelli, F., & Aiello, MA (2018). Colonne in muratura confinate in FRCM: indagine sperimentale sull'effetto delle proprietà della matrice inorganica. *Materiali da costruzione e da costruzione*, 186, 811-825.
11. Carloni, C., Mazzotti, C., Savoia, M., & Subramaniam, K. V. (2015). Confinement of masonry columns with PBO FRCM composites. In *Key Engineering Materials* (Vol. 624, pp. 644-651). Trans Tech Publications Ltd.
12. Fossetti, M., & Minafò, G. (2017). Comparative experimental analysis on the compressive behaviour of masonry columns strengthened by FRP, BFRCM or steel wires. *Composites Part B: Engineering*, 112, 112-124.
13. Campione, G., & Miraglia, N. (2003). Resistenza e capacità di deformazione degli elementi di compressione del calcestruzzo rinforzato con FRP. *Compositi di cemento e calcestruzzo*, 25 (1), 31-41.
14. Circolare CNR DT 200 R1 (2013)-Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie
15. Spoelstra, MR, & Monti, G. (1999). Modello in calcestruzzo confinato in FRP. *Journal of compositi per la costruzione*, 3 (3), 143-150.
16. Di Ludovico, M., Prota, A., & Manfredi, G. (2010). Riqualificazione strutturale utilizzando fibre di basalto per il confinamento del calcestruzzo. *Journal of compositi per la costruzione*, 14 (5), 541-552.
17. Kreaikas, TD, & Triantafyllou, TC (2005). Confinamento murario con polimeri fibrorinforzati. *Journal of Composites for Construction*, 9 (2), 128-135;
18. ACI 549.4R-13 Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures
19. Circolare CNR DT 215 -2018- Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a matrice inorganica;
20. Colajanni, P., De Domenico, F., Recupero, A., & Spinella, N. (2014). Colonne in calcestruzzo confinate con malte cementizie fibrorinforzate: sperimentazione e modellazione. *Materiali da costruzione e da costruzione*, 52, 375-384.
21. Normativa ACI 549-6R (2020)-Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel-Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures;
22. Balsamo, A., Cascardi, A., Di Ludovico, M., Aiello, MA, & Morandini, G. (2018). Studio analitico sull'efficacia del confinamento FRCM di colonne in muratura. *Patologia delle costruzioni, tecnologia della riabilitazione e gestione del patrimonio*, 1-9.

23. Samaan, M., Mirmiran, A., & Shahawy, M. (1998). Modello di calcestruzzo confinato da compositi in fibra. *Giornale di ingegneria strutturale* , 124 (9), 1025-1031.
24. Lam, L., & Teng, JG (2003). Modello sforzo-deformazione orientato alla progettazione per calcestruzzo confinato con FRP. *Materiali da costruzione e da costruzione* , 17 (6-7), 471-489.
25. Teng, JG, Jiang, T., Lam, L. e Luo, YZ (2009). Affinamento di un modello tenso-deformativo orientato alla progettazione per calcestruzzo confinato con FRP. *Journal of Composites for Construction* , 13 (4), 269-278.
26. Teng, J., Huang, YL, Lam, L. e Ye, LP (2007). Modello teorico per calcestruzzo fibrorinforzato confinato con polimeri. *Journal of compositi per la costruzione* , 11 (2), 201-210.
27. Youssef, MN, Feng, MQ e Mosallam, AS (2007). Modello sforzo-deformazione per calcestruzzo confinato da compositi FRP. *Compositi Parte B: Ingegneria* , 38 (5-6), 614-628.
28. Wu, YF e Wang, LM (2009). Modello di resistenza unificata per pilastri in calcestruzzo quadrati e circolari confinati da camicia esterna. *Giornale di ingegneria strutturale* , 135 (3), 253-261.
29. Teng, JG, Jiang, T., Lam, L. e Luo, YZ (2009). Affinamento di un modello tenso-deformativo orientato alla progettazione per calcestruzzo confinato con FRP. *Journal of Composites for Construction* , 13 (4), 269-278.
30. Wu, YF e Zhou, YW (2010). Modello di resistenza unificato basato sul criterio di rottura di Hoek-Brown per colonne in calcestruzzo circolari e quadrate confinate con FRP. *Journal of Composites for Construction* , 14 (2), 175-184.
31. Realfonzo, R., & Napoli, A. (2011). Calcestruzzo confinato da sistemi FRP: efficienza di confinamento e modelli di resistenza di progetto. *Compositi Parte B: Ingegneria* , 42 (4), 736-755.
32. De Lorenzis, L., & Tepfers, R. (2003). Studio comparativo di modelli sul confinamento di cilindri in calcestruzzo con compositi polimerici fibrorinforzati. *Journal of Composites for Construction* , 7 (3), 219-237.
33. Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., Echary, HE, Mastrapa, JC, & Pico, O. (1998). Effetto dei parametri della colonna su calcestruzzo confinato con FRP. *Journal of Composites per la costruzione* , 2 (4), 175-185.
34. Karam, G., & Tabbara, M. (2005). Efficacia di confinamento in colonne rettangolari in calcestruzzo con involucri polimerici fibrorinforzati. *Journal of compositi per la costruzione* , 9 (5), 388-396.
35. Abdelrahman, K., & El-Hacha, R. (2012). Comportamento di colonne in calcestruzzo di grandi dimensioni avvolte con fogli CFRP e SFRP. *Journal of compositi per la costruzione* , 16 (4), 430-439.
36. Abbasnia, R., Ahmadi, R., & Ziaadiny, H. (2012). Effetto del livello di confinamento, delle proporzioni e della resistenza del calcestruzzo sul comportamento ciclico sforzo-deformazione dei prismi in calcestruzzo confinato con FRP. *Compositi Parte B: Ingegneria* , 43 (2), 825-831.
37. Fahmy, MF, & Wu, Z. (2010). Valutazione e proposta di modelli di colonne circolari in calcestruzzo confinate con diversi compositi FRP. *Compositi Parte B: Ingegneria* , 41 (3), 199-213.
38. Triantafyllou, TC, & Papanicolaou, CG (2006). Rinforzo a taglio di elementi in cemento armato con guaine in malta tessile armata (TRM). *Materiali e strutture* , 39 (1), 93-103.
39. Trapko, T. (2013). Elementi in calcestruzzo confinato a matrice cementizia fibrorinforzata. *Materiali e design* , 44 , 382-391.
40. Kurtz, S., & Balaguru, P. (2001). Confronto tra matrici inorganiche e organiche per il rinforzo di travi in ca con fogli di carbonio. *Giornale di ingegneria strutturale* , 127 (1), 35-42.
41. Garon, R., Balaguru, PN, & Toutanji, H. (2001). Prestazioni di compositi inorganici polimero-fibra per il consolidamento e il risanamento di travi in calcestruzzo. In *FRPRCS-5: Plastiche rinforzate con fibre per strutture in cemento armato Volume 1: Atti della quinta conferenza internazionale sulle plastiche rinforzate con fibre per strutture in cemento armato*, Cambridge, Regno Unito, 16-18 luglio 2001 (pp. 53-62). Thomas Telford Publishing.
42. Yao, W., Li, J., & Wu, K. (2003). Proprietà meccaniche del calcestruzzo fibrorinforzato ibrido a bassa frazione di volume di fibre. *Cemento e ricerca concreta* , 33 (1), 27-30.
43. Aiello, MA, Micelli, F., & Valente, L. (2009). Confinamento in FRP di colonne quadrate in muratura. *Journal of compositi per la costruzione* , 13 (2), 148-158.
44. Lignola, GP, Angiuli, R., Prota, A., & Aiello, MA (2014). Confinamento in FRP di murature: modellazione analitica. *Materiali e strutture* , 47 (12), 2101-2115.
45. Micelli, F., Angiuli, R., Corvaglia, P., & Aiello, MA (2014). Confinamento passivo e attivato da SMA di colonne circolari in muratura con compositi di basalto e fibre di vetro. *Compositi Parte B: Ingegneria* , 67 , 348-362.
46. Ganduscio, S., & Romano, F. (1997). FEM e soluzioni analitiche per l'instabilità di elementi in muratura non lineari. *Giornale di ingegneria strutturale* , 123 (1), 104-111.
47. Frisch-Fay, R. (1981). Quasi-analytical method for the analysis of a masonry column with a nonlinear stress-strain law. *Int J Masonry Constr* , 2(1), 41-46.
48. Minafò, G., D'Anna, J., Cucchiara, C., Monaco, A., & La Mendola, L. (2017). Legge analitica sforzo-deformazione della muratura confinata in FRP in compressione: revisione della letteratura e disposizioni progettuali. *Compositi Parte B: Ingegneria* , 115 , 160-169.

49. Aiello, MA, Ascione, L., Baratta, A., Bastianini, F., Battista, U., Benedetti, A., ... & Zampa, A. (2014). Guida per la progettazione e realizzazione di sistemi FRP incollati esternamente per il rafforzamento di strutture esistenti.
50. Corradi, M., Grazini, A., & Borri, A. (2007). Confinamento di colonne in muratura di mattoni con materiali CFRP. *Scienza e tecnologia dei compositi* , 67 (9), 1772-1783.