



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELL'INGEGNERIA

CICLO XXIV

COORDINATORE Prof. Stefano Trillo

Progetto ed ingegnerizzazione di prodotti industriali estrusi a base cementizia
rinforzati con microfibre polimeriche

Settore Scientifico Disciplinare ICAR/08

Dottorando

Dott. Bernini Alessandro

Tutori

Prof. Tralli Antonio

Prof. Tullini Nerio

Anni 2009/2011

Indice analitico.....	1
Sommario	3
1 Evoluzione delle tipologie costruttive dei tetti a falda inclinata.....	9
1.1. Struttura portante e suoi materiali.....	13
1.2. Elementi di copertura	16
1.3. La tecnologia comunemente utilizzata: “pressa a cordone”	24
1.4. Stato dell’arte nell’impiego di prodotti fibrorinforzati nelle coperture civili	27
1.5. Perché le tegole fibrorinforzate	30
2 Stato dell’arte nello studio di materiali fibrorinforzati Engineered Cementitious Composites “ECC”	33
2.1. Dalle applicazioni teoriche alla commercializzazione.....	33
2.2. Micromeccanica	36
2.3. Resistenza e duttilità	40
2.4. Principali caratteristiche del comportamento di materiali rinforzati ECC.....	41
2.5. Costo di materiali ECC	46
2.6. La rete tecnologica ECC.....	47
3 Prove di laboratorio.....	49
3.1. Il processo di estrusione.....	50
3.2. Materiali impiegati e preparazione dei provini	58
3.3. Metodologia di test.....	65
3.4. Individuazione della fibra di rinforzo ottimale	69

3.4.1. Osservazioni e conclusioni	78
3.5. Campagna sperimentale	84
4 Modello semplificato.....	93
4.1. Normativa di riferimento	93
4.2. Modelli interpretativi.....	95
5 Ingegnerizzazione	101
5.1. Valutazione preliminare della qualità del manufatto	102
5.2. Interventi inerenti la meccanica dell'estrusore.....	106
5.3. Interventi inerenti i materiali componenti la miscela	111
5.4. Perfezionamento del prodotto estruso.....	116
5.5. Conclusioni.....	124
Bibliografia.....	127
Indice analitico.....	131
Indice delle figure	133
Dichiarazione di conformità	141

Come ben noto il tetto influisce in modo decisivo sul comportamento della struttura in muratura; esso dovrebbe essere: leggero, ben collegato ai maschi murari sottostanti e non eccessivamente rigido.

Spesso durante le ristrutturazioni i muri non sono stati adeguatamente consolidati e i tetti lignei sono stati sostituiti da pesanti tetti in latero - cemento o in c.a. provocando in tal modo, a causa dell'aumento di peso, il collasso dell'intera struttura sotto l'azione sismica.

Dall'analisi delle coperture degli edifici danneggiati dal terremoto dell'Aquila è emerso che la qualità della struttura portante e il peso gravante su di essa sono elementi di fondamentale importanza per la loro stabilità. Nelle sottostanti figure vengono riportati alcuni esempi di collasso strutturale della copertura avvenuti durante il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009.



Figura 1 – Esempi di collasso strutturale della struttura di copertura di edifici in muratura avvenuti durante il terremoto dell'Aquila il 6 aprile 2009

Come riportato nella sottostante Tabella 1 una copertura in lastre o coppi standard pesa mediamente tra i 30 e i 60 kg/mq. Nel caso di coperture lignee tale valore corrisponde a gran parte del carico permanente agente complessivamente. Il

maggior svantaggio che deriva dall'impiego di piccoli elementi di copertura è quindi costituito dall'elevato peso per unità di superficie che questi apportano alla struttura.

Tabella 1 – Pesi e dimensioni per varie tipologie di tegole piane e ondulate in argilla e calcestruzzo

Materiale Argilla						
Tegola	Dimensioni [cm]		Peso Kg		Peso Kg/mq	
	da	a	da	a	da	a
piana	14x28	18x38	1,8	2,4	50	45
ondulata	11x41	25x42	1,6	4	30	50

Materiale Calcestruzzo						
Tegola	Dimensioni		Peso Kg		Peso Kg/mq	
	da	a	da	a	da	a
piana	33x42	-	5	6	40	70
ondulata	33x42	33x56	4	7	40	60

L'interesse sempre maggiore per l'impiego di materiali fibrorinforzati, i recenti sviluppi tecnico scientifici relativi all'uso di microfibre di tipo non metallico e la necessità di sviluppare manufatti, per impiego edile, di minor peso, rappresentano le motivazioni per affrontare il problema dello sviluppo di prodotti fibrorinforzati in un contesto industriale per applicazioni in edilizia.

Le più moderne tecnologie in campo industriale ad oggi consentono di realizzare prodotti in fibrocemento di grandi dimensioni per mezzo del processo Hatschek. Tali manufatti fibrorinforzati modulari di grandi dimensioni garantiscono bassi costi di installazione e un basso apporto di carichi alla copertura (Tabella 2), pur possedendo ottimi requisiti di praticabilità, durabilità e isolamento da agenti atmosferici. Unico neo del processo di realizzazione dei manufatti consiste nella scarsa flessibilità dell'impianto in termini di variabilità dimensionale, forme ottenibili e trattamenti estetici superficiali.

Tabella 2 – Pesi e dimensioni per varie tipologie di tegole piane e ondulate in argilla e calcestruzzo

Materiale Fibrocemento						
Pann. ondolato	Dimensioni [cm]		Peso Kg		Peso Kg/mq	
	da	a	da	a	da	a
	62,5x110	250x100	7	35	10	14

L'eliminazione dal mercato europeo della fibra di amianto è iniziata negli anni '70, ed oggi sta avvenendo anche nei paesi in via di sviluppo. Questo impone ai grandi produttori di pannelli in fibrocemento la conversione degli impianti esistenti, basati sull'impiego di amianto, ad un processo industriale basato su fibre o composti non dannosi per l'organismo.



Gli elevati costi di conversione degli impianti ormai obsoleti, uniti alla scarsa flessibilità, stanno inducendo i maggiori fornitori di fibre di rinforzo a promuovere il prodotto per sistemi industriali basati sull'estrusione di tegole fibrorinforzate.

Scopo di questa tesi è studiare il comportamento meccanico e le fasi di realizzazione di tegole in materiale cementizio rinforzato con microfibre di tipo polimerico.

La necessità di sviluppare nuovi sistemi industriali basati sull'estrusione di manufatti fibrorinforzati a base cementizia ha trasformato l'iniziale rapporto fornitore – cliente instauratosi nel 2008 tra Kuraray Co. Japan e Vortex Hydra s.r.l., in un rapporto di mutua collaborazione atto allo sviluppo di tecnologie innovative di estrusione con fibre polimeriche di tipo PVA (Polivinilalcohol). Scopo di tale accordo è inoltre il raggiungimento di obiettivi commerciali quali la vendita e promozione di un prodotto finale estruso di qualità estetica ottimale e dal peso estremamente ridotto.

Un'ottima alternativa al fibrocemento, che ad oggi gode di una porzione di mercato estremamente estesa, è costituita dai materiali fibrorinforzati ad alte prestazioni: ECC.

Nella letteratura tecnica le malte rinforzate con fibre polimeriche corte sono indicate con l'acronimo ECC (*Engineered Cementitious Composites*) se presentano un comportamento tipo *Strain Hardening*, con il quale si indica una curva carico spostamento di tipo incrudente e sufficientemente duttile. La sperimentazione riportata nella letteratura tecnica ha messo in evidenza un comportamento di tipo multifessurativo che consente di raggiungere elevati livelli di deformazione.

Il materiale studiato in laboratorio e realizzato con procedure ad hoc, di fatto, si rivela molto diverso dal materiale comunemente impiegato in processi di tipo industriale. In primo luogo un processo industriale richiede l'utilizzo di sistemi di mescolazione completamente diversi e utilizza, in genere, un processo di estrusione che nel caso delle tegole o delle piastre presenta due dimensioni nettamente preponderanti sulla terza. Tutto ciò comporta le necessità di impiegare inerti con una distribuzione granulometrica diversa da quella studiata nella letteratura tecnica, utilizzando setacci sino al diametro di 3 mm, e rapporti acqua-cemento relativamente bassi.

Partendo dagli studi effettuati sui materiali ECC, si è cercato di raggiungere un comportamento analogo, in un processo di produzione industriale per la realizzazione di manufatti in malta cementizia di spessore sottile, quali tegole, piastrelle, ecc, utilizzando un processo di estrusione e rapporti sabbia-cemento di alcune volte superiori a quelli riportati nella letteratura tecnica.

Questo lavoro può essere suddiviso in tre parti ben distinte; la prima parte tratta delle tipologie di coperture inclinate e di conseguenza di manufatti che su di esse possono essere installati, la seconda parte è prevalentemente di tipo tecnologico. In essa vengono brevemente elencate le modalità di realizzazione dei manufatti in cemento oggetto della tesi di dottorato. La terza ed ultima parte raccoglie invece i tre anni di ricerca effettuati in laboratorio ed in Vortex Hydra s.r.l. per lo studio di materiali ECC in applicazioni di tipo industriale con la conseguente formulazione di modelli costitutivi semplificati.

In particolare il capitolo iniziale si dedica alle tipologie più comuni di copertura civile di tipo inclinato, in quanto esse, a differenza delle coperture di tipo piano, usualmente sono destinate ad essere ricoperte da manufatti composti di differenti materiali. I materiali da costruzione impiegabili a livello industriale per la realizzazione dei

manufatti di copertura costituiscono infatti la parte iniziale del capitolo. La scelta di questi può variare in funzione delle scelte architettoniche, dalla tradizione costruttiva e pure dalla reperibilità locale. In secondo luogo vengono esposte le diverse sottostrutture portanti di copertura con particolare interesse, ancora una volta, alla distinzione dei diversi materiali da costruzione e al differente carico permanente che questi comportano. Vengono presentate in dettaglio le tipologie di elementi di copertura in relazione alle tecnologie costruttive adottate, ai pesi permanenti che essi comportano, ai materiali ed alle diverse applicazioni civili anche in funzione delle condizioni climatiche. Inoltre vengono analizzati i diversi valori di peso permanente per unità di superficie che i diversi sistemi apportano alla sottostruttura portante in modo tale da poterne effettuare un confronto diretto.

La parte terminale del primo capitolo è invece dedicata allo stato dell'arte nella produzione di elementi di copertura realizzati con materiali fibrorinforzati a base cementizia. In questa sezione vengono discusse le attuali tecnologie impiegate nella realizzazione di elementi di copertura di diverse dimensioni, e si espongono le principali motivazioni per cui si ritiene importante approfondire lo studio di tecnologie innovative di estrusione di manufatti a base cementizia con l'aggiunta di microfibre di rinforzo di tipo polimerico.

L'anello di congiunzione tra il prodotto industriale e la tecnologia di realizzazione dello stesso consiste nel materiale impiegato nel processo. Lo stato dell'arte nella produzione di elementi di copertura, che si riporta nel primo capitolo, dimostra che attualmente sul mercato non sono disponibili tecnologie di estrusione in grado di produrre manufatti a base cementizia rinforzata con microfibre di tipo polimerico. I vantaggi che ne conseguirebbero sono ampiamente discussi, e principalmente consistono nell'alta produttività dei suddetti sistemi, e nella possibilità di abbattere i costi di produzione; punto chiave per facilitare l'introduzione nel mercato di un manufatto di copertura estremamente leggero e resistente. Per questo motivo il capitolo secondo è interamente dedicato allo stato dell'arte nello studio di materiali ECC.

ECC (*Engineered Cementitious Composites*) è una classe di compositi a base cementizia ad elevata duttilità utilizzabili per impieghi industriali; impieghi in cui il controllo dei costi gioca un ruolo di rilevante importanza. Successivamente alla sua introduzione, avvenuta dieci anni fa, il materiale è stato oggetto a diversi sviluppi sia dal punto di vista delle proprietà meccaniche sia dal punto di vista delle applicazioni in edilizia.

Nel secondo capitolo vengono riportati gli elementi necessari a comprenderne la progettazione e le applicazioni commerciali. In particolare viene data molta importanza al ruolo compiuto dalla micromeccanica del materiale nella progettazione e ottimizzazione della miscela. Verranno inoltre compiute riflessioni sulla duttilità del materiale, sulle caratteristiche della prestazione di materiali ECC e R/ECC (Reinforced ECC) e importanti considerazioni sui costi dei medesimi. In aggiunta sono indicate le possibili applicazioni di materiali ECC in campo strutturale e le possibili ulteriori direzioni di ricerca.

Il terzo capitolo è dedicato alle prove di laboratorio effettuate nel corso degli anni 2009 e 2010; documentate nelle pubblicazioni [1] e [2]. Scopo del primo anno di studi è stato quello di individuare la tipologia più adatta di microfibre dal punto di vista della composizione chimica, della dimensione e della quantità in frazione di volume sulla



miscela impiegata. Obiettivo principale di questa prima fase della ricerca è valutare il miglior compromesso in termini di quantità dei componenti la miscela e tipologia di fibre di rinforzo per realizzare con processi industrializzati questo tipo di elementi non strutturali fibrorinforzati. A seguito delle prove preliminari, una volta definito il comportamento dei diversi campioni testati, si sono eseguite ulteriori prove mirate ad una gamma ristretta di miscele e combinazioni di materiali al fine di elaborare un modello matematico utile alla rappresentazione del comportamento a rottura degli elementi sottoposti a flessione.

L'estesa campagna prove preliminare svolta nel primo anno di ricerca ha reso di fatto possibile la valutazione delle miscele, fibrorinforzate con fibre polimeriche, in grado di fornire le migliori prestazioni nella realizzazione di prodotti estrusi tramite processi di tipo industriale. La campagna di prove viene completata, nella seconda fase, con ulteriori prove di flessione e con prove di compressione e trazione diretta, facendo riferimento, ove possibile, alle normative in vigore.

Scopo ulteriore della ricerca, come ampiamente discusso nel quarto capitolo, è inoltre verificare se l'approccio proposto dalla CNR DT 204 proposta per calcestruzzi fibrorinforzati con fibre metalliche e gettati in opera, è ancora utilizzabile per elementi ottenuti mediante processi industriali e rinforzati con fibre polimeriche. A tal fine i modelli semplificati proposti nella letteratura tecnica vengono utilizzati per simulare i risultati della prova di flessione e risultano dare indicazioni attendibili sul comportamento di manufatti allo Stato Limite Ultimo.

I test descritti nei precedenti capitoli mostrano come siano necessari bassi valori del rapporto s/c per incrementare il momento ultimo e ottenere una significativa duttilità. Si può pertanto concludere che per incrementare la duttilità del materiale e il valore del momento ultimo, sono necessari elevati quantitativi di cemento e inerti prevalentemente fini. Dal punto di vista industriale un buon prodotto da costruzione deve tenere conto dei costi di produzione e delle eventuali interazioni del nuovo materiale all'interno del processo produttivo.

Nel quinto ed ultimo capitolo si prendono in esame gli aspetti sopraccitati considerandoli come costituenti principali della fase di *ingegnerizzazione*.

Con il termine *ingegnerizzazione* vengono di fatto raccolte in questo ultimo capitolo tutte le modifiche necessarie al fine di rendere il materiale processabile, ossia passare da uno studio di laboratorio ad una applicazione industriale sostenibile e finalizzata alla produzione in serie di manufatti.

EVOLUZIONE DELLE TIPOLOGIE COSTRUTTIVE DEI TETTI A FALDA INCLINATA

Lo scopo fondamentale di questo primo capitolo è quello di esaminare le tipologie più comuni di copertura civile di tipo inclinato.

Vengono inizialmente trattati i possibili materiali costituenti gli elementi di copertura in relazione alle diverse tradizioni architettoniche, alle differenti condizioni climatiche a cui sono sottoposte le costruzioni e alla disponibilità degli stessi sul territorio.

In secondo luogo sono espone le diverse sottostrutture portanti di copertura con particolare interesse, ancora una volta, alla distinzione dei diversi materiali da costruzione e al differente carico permanente che questi comportano. Fattore, questo, di fondamentale importanza per la determinazione della quota parte di carico competente ai soli elementi di copertura.

Vengono discusse inoltre le tipologie di elementi di copertura in relazione alle tecnologie costruttive adottate, ai pesi permanenti che essi comportano, ai materiali ed alle diverse applicazioni civili anche in funzione delle condizioni climatiche. In questa sezione si espongono i diversi valori di peso permanente per unità di superficie che i diversi sistemi apportano alla sottostruttura portante in modo tale da poterne effettuare un confronto diretto.

La parte terminale del capitolo si dedica allo stato dell'arte nella produzione di elementi di copertura in materiali fibrorinforzati a base cementizia. In questa sezione verranno discusse le attuali tecnologie impiegate nella realizzazione di elementi di copertura di diverse dimensioni, e si espongono le principali motivazioni per cui si ritiene importante approfondire lo studio di tecnologie innovative di estrusione di manufatti a base cementizia con l'aggiunta di fibre di rinforzo di tipo polimerico.

Sebbene per secoli, anzi per millenni, le tecniche per la copertura dei tetti subirono solo poche variazioni, la rivoluzione industriale portò tutta una serie di innovazioni anche in questo campo.

Uno sguardo retrospettivo agli sviluppi dell'Ottocento mostra che tutte le principali innovazioni si verificarono in due periodi circoscritti, tra il 1825- 1860 e il 1880-1900. Si può affermare che l'odierna tecnica del tetto inclinato si basa in gran parte su queste scoperte e che ha fatto progressi solo nell'automazione dei processi di produzione.

Di particolare interesse sono state le evoluzioni nel campo dei **materiali** impiegati nel processo di costruzione. Nei paragrafi seguenti si citano i principali materiali impiegabili nel processo produttivo del tetto ad esclusione delle tecniche meno diffuse che comprendono l'impiego di materiali quali vetro, lamiera metalliche e manti erbosi.

La copertura dei tetti in **pietra stratificata**, già utilizzata ai tempi dei romani, è stata riscoperta soltanto nel secolo XI in Francia. Mentre granito, gneiss, calcare o arenaria ebbero soltanto un'importanza locale, gli argilloscisti come l'ardesia vennero utilizzati in gran parte dell'Europa (Germania, Inghilterra, Francia, Austria e Ungheria). Con l'avvento della macchina a vapore, poi, si poté perfezionare soprattutto l'estrazione dal sottosuolo, senza dimenticare però che anche il faticoso lavoro di spaccatura e rifinitura dell'ardesia trasse vantaggio dalla forza della macchina. La svolta decisiva si determinò a partire dal 1844 con l'introduzione della copertura sagomata. Da quel momento le lastre potevano essere ricavate con l'aiuto di sagome nei diversi luoghi di estrazione in officine riparate. L'intercambiabilità, la buona situazione dell'offerta, le vie di trasporto migliorate e le nuove ferrovie portarono, a partire dal 1871, a un largo uso dell'ardesia, che si esaurì solo con la prima guerra mondiale.

Al termine del diciannovesimo secolo la supremazia delle coperture piane, la carenza di materia prima e i metodi di lavorazione irrazionali hanno portato al declino dell'industria dell'ardesia. Da allora in Spagna e in altri paesi sono state trovate nuove fonti alternative di materie prime ed è stata ulteriormente razionalizzata la lavorazione. Questo, insieme alla rinnovata richiesta di tetti inclinati, diede nuovo impulso all'impiego dell'ardesia nelle coperture. Questa soluzione è resa particolarmente interessante per merito della resistenza del materiale agli agenti inquinanti contenuti nell'aria e del suo basso costo in termini di energia primaria per la produzione, sebbene i costi di messa in opera rimangano alti.

La copertura dei tetti con **mattoni cotti** (tegole in argilla), in uso da quattromila anni, rappresentava all'inizio dell'Ottocento la tecnica più diffusa; grazie a fasi di lavorazione ben separate (preparazione, sagomatura e cottura), essa costituiva una buona premessa per il passaggio ad una produzione industriale. Già dall'inizio dell'Ottocento si lavorava con continuità all'industrializzazione della produzione di tegole. Lo sviluppo raggiungeva la sua prima tappa nel 1854 con una macchina per tegole ideata da *Cari Schlickeysen* a Berlino. Questa macchina, che per la sua forma caratteristica veniva chiamata anche pressa per estrudere (Figura 1.), riuniva insieme la lavorazione della terracotta, la sagomatura e il taglio.

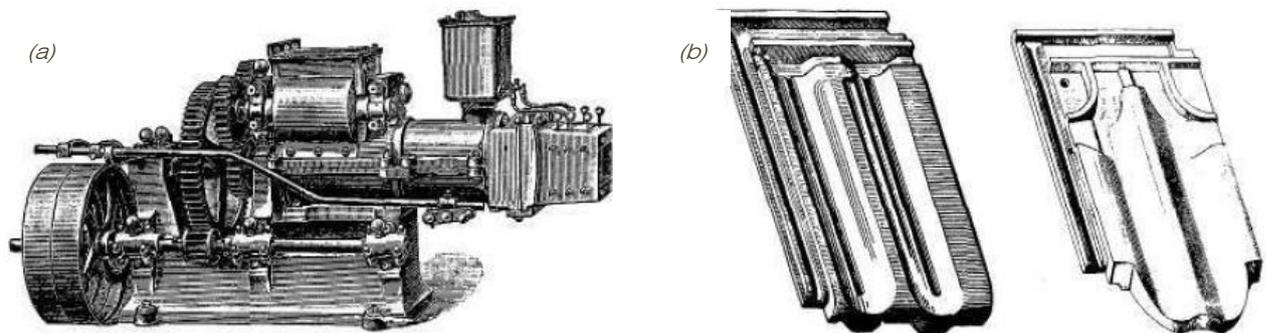


Figura 1.1 – (a) Pressa per mattoni di Schlickeysen, (b) Marsigliese e coppo di Ludowici, 1881 e 1882

Il successivo sviluppo portò alla realizzazione della pressa a secco, che creava migliori presupposti per il processo di cottura e permetteva di ottenere prodotti più precisi. In seguito, quando la sempre più raffinata sagomatura della tegola suggerì la necessità di presse per formatura, *Wilhelm Ludowici di Jockgrim*, con l'invenzione della pressa a tavolo rotante nel 1881, poté trasferire la velocità di lavorazione anche alle tegole sagomate, creando così le condizioni per ottenere un materiale di copertura economicamente conveniente.

L'evoluzione della produzione delle tegole ha portato a realizzare continui miglioramenti. Sono state meccanizzate ed automatizzate sia l'estrazione delle materie prime sia la loro lavorazione, con particolare attenzione allo sviluppo di diversi profili. I limiti principali del processo di realizzazione di manufatti in argilla consistono nella forte sensibilità del processo di produzione alla variazione della tipologia di materiali impiegati, che induce spesso grandi variazioni della qualità del prodotto finale, e nei processi di combustione, i quali richiedono elevate quantità di energia da fornire in modo continuo. Dal punto di vista ecologico, invece, la tegola in argilla è tra i materiali più raccomandabili. Il fabbisogno di materia prima può essere coperto dalle risorse interne e il consumo di energia rientra nella media dei materiali per coperture dei tetti. La tegola, che può essere riutilizzata sotto forma di scaglie, ha una durata media di 80-100 anni. Sebbene questa copertura, a causa degli alti costi di posa, non sia tra le più economiche, si prevede che continuerà a essere utilizzata anche in futuro.

Già prima della produzione industriale del **cemento** "artificiale" l'imprenditore *Adolph Kroher* della Germania del sud (*Staudach am Chiemsee*) costruì intorno al 1844 le cosiddette tegole *Staudach*. Da questo cemento "naturale" a presa rapida egli otteneva due forme: una a losanga da lui definita "inclinata" e una "a forma di S", che noi oggi chiamiamo coppo. Queste tegole avevano pregevoli caratteristiche: lo scarso assorbimento dell'acqua e la relativa resistenza al ghiaccio che insieme rendevano possibili minori inclinazioni. Erano inoltre caratterizzate da una grande flessibilità nelle operazioni di montaggio ed erano soprattutto economicamente convenienti. *Peter Jørgensen di Haseldorf* nel 1882 depositò numerosi brevetti per presse e apparecchiature in grado di produrre una tegola trapezoidale che presentava un cordone doppio tutt'intorno, il quale garantiva un'elevata protezione dalla pioggia. Dopo i riconoscimenti ufficiali a Vienna (1873) e Norimberga (1882), con la produzione industriale il nuovo materiale trovò una rapida diffusione nel campo della copertura dei tetti. Già nel 1899 esistevano in Germania nove produttori di tegole *Cement*, con una vasta scelta di forme differenti.

Nel 1925 furono esportati macchinari per la realizzazione di lastre per tetti dalla Danimarca all'Inghilterra, dove nel 1936 una sola ditta smerciò 203 milioni di tegole con garanzia cinquantennale. La grande spinta produttiva nell'immediato dopoguerra portò alla richiesta di materiale per copertura meno costoso. L'automazione dei processi d'estrusione, parzialmente sviluppata in Austria e importata dall'Inghilterra, è oggi avanzata quanto quella della produzione delle tegole in argilla. Le risorse di cemento e sabbia sono disponibili quasi illimitatamente sul territorio nazionale e possono essere ricavate senza problemi. L'inquinamento derivante dalla produzione di cemento può essere impedito adottando le opportune misure di depurazione mentre il consumo di energia primaria per le lastre in calcestruzzo è persino inferiore a quello per i laterizi. Le tecniche e i tipi di sagomatura non sono meno impegnativi di quelli delle tegole in argilla, anzi la precisione nella realizzazione può essere maggiore. Usato per il tetto, questo materiale risponde a tutte le esigenze di un "abitare sano"; si può pertanto affermare che la copertura con lastre (o tegole) in calcestruzzo costituisca una buona alternativa al tetto in tegole di laterizio.

L'*asfoestos*, parola con cui i greci definivano l'eterno, l'immortale, veniva filato e tessuto già in epoche remote. Toccò all'austriaco Ludwig Hatschek, dopo una serie di esperimenti durati sette anni, il compito, economicamente vantaggioso, di unire questo materiale al cemento e di presentarne il brevetto nel 1900. Le sue tegole di piccolo formato erano convenienti e quasi illimitatamente resistenti a calore, freddo, umidità e fuoco. Il peso modesto rendeva possibile la realizzazione di piastre di grande formato e quindi semplici ed economiche strutture portanti dei tetti. Queste caratteristiche contribuirono alla rapida diffusione di questo materiale per tetti sotto forma di scandole o piastre ondulate.

Il fibrocemento oggi disponibile sul mercato è privo di amianto. Fin dal suo impiego nei materiali da costruzione, la produzione di amianto è aumentata progressivamente. La piccolissima fibra di amianto, 1300 volte più sottile del capello umano, può penetrare nei polmoni, provocando a lungo andare il tumore polmonare. Per quanto questo fatto fosse noto già dal 1936, soltanto negli anni sessanta e settanta si manifestò in tutta la sua drammaticità. Da allora si cominciarono a cercare materiali alternativi. Dal 1982 le fibre di amianto sono state sostituite con *Dolanit* e *Kuralon* (fibre artificiali a base di poliacrilonitrili PAN e alcool polivinilico PVA). Queste nuove fibre sono molto più spesse e pertanto non penetrano nei polmoni. I risultati delle prove sul comportamento meccanico e chimico del nuovo materiale hanno condotto a valori favorevoli quanto quelli del vecchio materiale. Dal 1982 i nuovi prodotti vengono usati su vasta scala senza problemi e l'esperienza fatta sinora lascia prevedere buoni risultati anche per il futuro. È così nuovamente disponibile senza limitazioni un materiale resistente e che offre una buona lavorabilità.

Si può concludere affermando che a causa degli elevati costi di manodopera, già nella seconda metà dell'800, anche nel settore della produzione di manufatti in cemento per coperture è avvenuta un'ampia meccanizzazione e automatizzazione. La qualità dei materiali utilizzati è stata nettamente migliorata, la sagomatura e le connessioni sono state anch'esse perfezionate e rese più sicure, il che consente di avere attualmente a disposizione una ricca scelta di materiali e forme. Per quanto riguarda la tecnica e la posa poco è mutato e pertanto i piccoli componenti costruttivi richiedono un montaggio manuale molto costoso. La tendenza odierna di fatto è diretta verso la produzione di elementi di copertura di grandi dimensioni. Il vantaggio



che si può trarre dalla produzione e posa di elementi di grandi dimensioni è duplice: in primo luogo la diminuzione del costo della manodopera che sempre più si sta rivelando essere una componente preponderante anche nei paesi in via di sviluppo, ed in secondo luogo, come nel caso di coperture per tegole, la diminuzione dei carichi per unità di superficie con conseguente ulteriore calo dei costi per le strutture portanti.

1.1. STRUTTURA PORTANTE E SUOI MATERIALI

Il sistema tetto nel suo complesso può essere suddiviso in struttura portante e manto di copertura.

I materiali impiegabili per le strutture portanti delle coperture sono fondamentalmente tre:

- legno
- acciaio
- calcestruzzo

La qualità essenziale del **legno** è rappresentata dalla sua elevata resistenza in rapporto al peso proprio. La possibilità di eseguire semplici lavorazioni artigianali si adatta bene alla numerosa quantità di raccordi presenti nelle strutture portanti. A ciò si aggiunga la semplicità di montaggio direttamente in cantiere, montaggio che può essere eseguito senza dover utilizzare elementi pesanti o di eccessive dimensioni. Per quanto riguarda l'isolamento termico, grazie alla scarsa conducibilità termica non si creano rilevanti ponti termici. Ciò permette l'inserimento dell'isolamento termico all'interno delle sottostrutture. Inoltre, in virtù sempre della scarsa conducibilità di questo materiale, le costruzioni possiedono una discreta resistenza al fuoco. In quanto elemento naturale, però, il legno è esposto all'attacco di funghi, batteri e insetti. Dato che principalmente viene aggredito il legno umido e non ben aerato, la migliore protezione consiste quindi nel tenere conto delle condizioni climatiche. Per i tetti si usa normalmente soltanto legno impregnato che offre una protezione di base contro l'infestazione da parassiti. Cambiamenti di umidità ambientale si ripercuotono sulla stabilità della forma degli elementi.

Le strutture portanti in **acciaio** per tetti sono utilizzate nelle costruzioni in cui occorre coprire grandi luci. Gli elementi costruttivi in acciaio arrivano già finiti in cantiere ed in genere non sono possibili modifiche sostanziali durante il montaggio. L'acciaio è impiegato per connessioni e giunzioni anche in associazione con altri materiali, principalmente nelle costruzioni in legno. La buona conducibilità termica fa sì, purtroppo, che in caso d'incendio tutta la struttura portante metallica si riscaldi velocemente e perda la propria resistenza oltre i 400 °C. Patinature o vernici preservano le parti in acciaio per un tempo limitato. Rivestimenti o riporti di metallo proteggono l'acciaio dalla corrosione e ciò si rivela necessario all'aria aperta e in caso di elevata umidità nei locali interni per impedire formazione di ruggine.

Il **calcestruzzo** viene impiegato nei tetti inclinati prevalentemente come prodotto finito e solo in casi speciali come calcestruzzo gettato in opera. Ciò è dovuto all'elevato dispendio di manodopera per la costipazione nella realizzazione di costruzioni inclinate in calcestruzzo gettato in opera con il vantaggio però di poter realizzare configurazioni libere da angoli o pieghe, ad esempio nel caso di costruzioni a

membrana o a guscio. È possibile controllare la produzione e la composizione del calcestruzzo in modo tale da ottenere una conducibilità termica rispondente ai requisiti di isolamento di un tetto di normali dimensioni. Nelle costruzioni in calcestruzzo le esigenze relative alla protezione antincendio vengono soddisfatte senza ulteriori misure particolari, ricoprendo semplicemente l'armatura d'acciaio con uno strato sufficiente di questo materiale.

Sono invece principalmente tre le tipologie di strutture portanti realizzabili con le tipologie materiali sopra descritte:

- struttura a capriata semplice;
- struttura ad arcarecci;
- struttura massiccia in calcestruzzo;

La struttura del **tetto a capriata semplice** (Figura 1.2-a) consiste unicamente di puntoni che assolvono il compito di travi portanti trasferendo il loro carico solo alle estremità delle parti portanti annesse dell'edificio. Il sistema statico è costituito da due travi (puntoni) che sono inclinate e collegate tra loro a coppie in modo articolato al colmo e giacenti in un piano. Gli altri due appoggi (piedi) devono essere mantenuti liberi di ruotare. Risulta così un sistema a tre cerniere staticamente determinato, sul quale possono essere distribuite tutte le sollecitazioni.

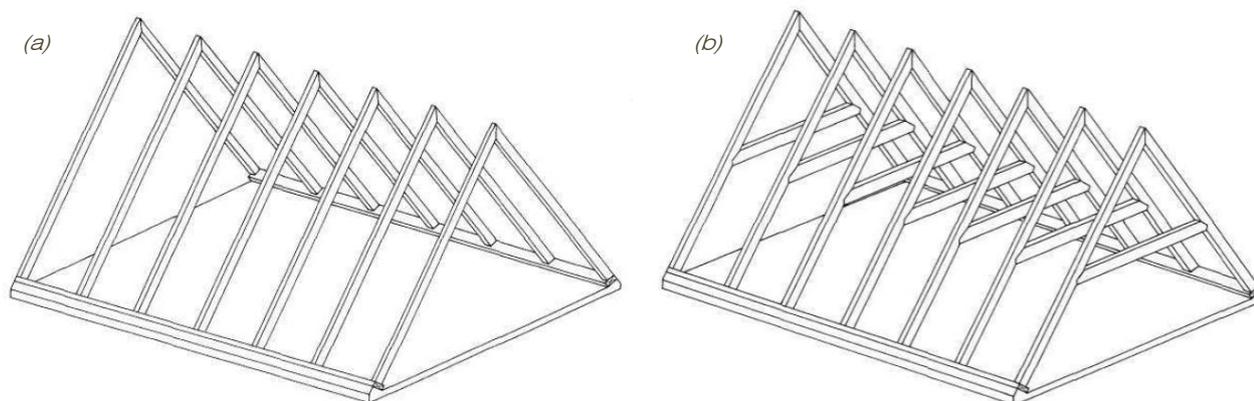


Figura 1.2 – (a) Struttura portante a capriata, (b) con aggiunta di controcatena

La principale limitazione a cui è soggetta questa tipologia di strutture consiste nella difficoltà di coprire grandi luci. Una buona soluzione spesso impiegata consiste nell'inserimento di una controcatena in grado di limitare la luce libera di inflessione dei puntoni (Figura 1.2-b).

Nel **tetto ad arcarecci** (Figura 1.3-a), invece, i puntoni inclinati sono supportati da travi portanti orizzontali, poste perpendicolarmente alla luce degli stessi. Questo sistema portante, mediante gli ulteriori sostegni verticali dei puntoni, permette luci maggiori rispetto al tetto a capriata semplice. L'azione continua dei puntoni carichi, staticamente indeterminati, consente un migliore sfruttamento della struttura riducendo così deformazioni e flessioni. L'appoggio degli arcarecci può essere scelto a piacere in funzione della sua capacità di portata ed essere adattato alle varie esigenze. Gli arcarecci possono essere disposti appoggiati ai muri nel sottotetto o su

sostegni del soffitto sottostante; i carichi vengono così immessi direttamente sull'appoggio.

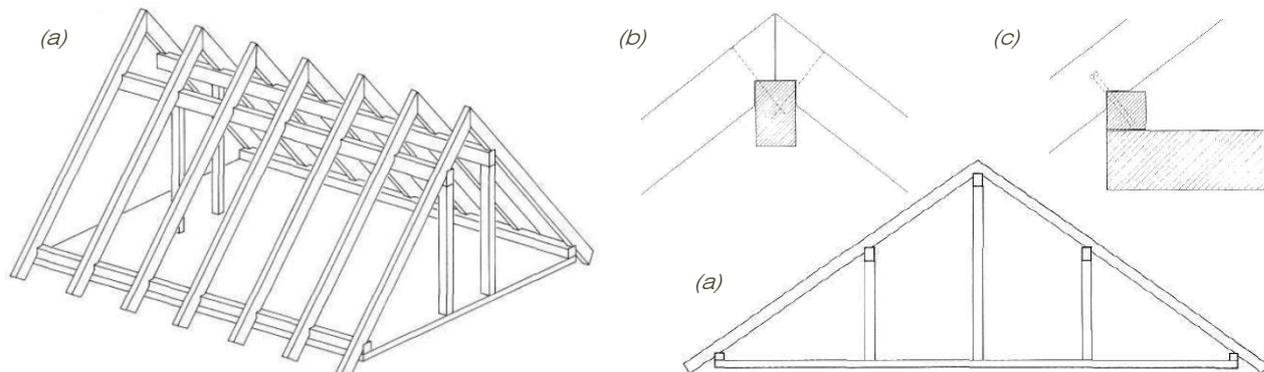


Figura 1.3 – (a) Struttura portante ad arcarecci, (b) particolare del nodo di connessione dei puntoni, (c) particolare dell'appoggio dei puntoni alla sottostruttura

Rispetto alle strutture portanti formate a traliccio da elementi astiformi, il **tetto massiccio** consiste di una superficie piana chiusa (Figura 1.4-a). Grazie al maggior peso proprio si ottengono vantaggi dal punto di vista fisico-termico. Generalmente, queste costruzioni consistono di lastre in cemento armato poroso, fissate parallelamente al colmo tra pareti trasversali. La luce massima e quindi la distanza tra le pareti trasversali, in base al carico della neve, allo spessore delle piastre e alla qualità del calcestruzzo poroso è compresa tra 3,00 e 6,00 m. È possibile realizzare sporgenze del tetto sui muri trasversali, ma solo come sbalzi al disopra del frontone.

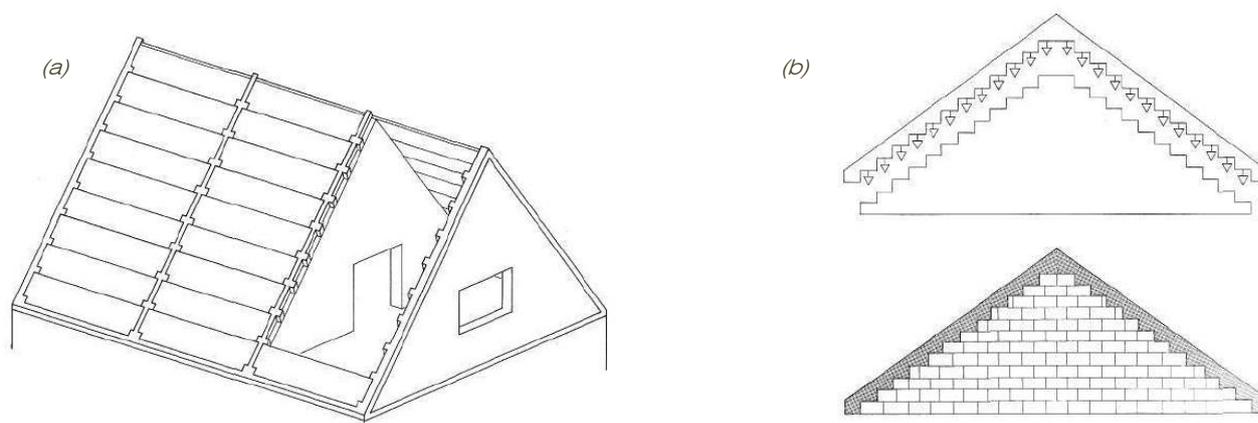


Figura 1.4 – (a) Struttura portante massiccia, (b) particolare dello schema statico per il trasferimento dei carichi

L'impiego delle diverse strutture portanti per le coperture civili è spesso dettato dalla tradizione architettonica di un paese ed è spesso vincolato dalla disponibilità dei materiali sul territorio. In aggiunta, l'evoluzione dei regolamenti in campo edilizio, specialmente in zone ad alta attività sismica, sta ulteriormente contribuendo a modificare gli aspetti progettuali delle costruzioni sia in campo civile sia in campo industriale. A fini riassuntivi nella seguente Tabella 1.3 si dispone un riassunto delle strutture portanti analizzate.

È inoltre necessario specificare che nel documento in oggetto verranno principalmente trattate coperture civili con differenti strutture portanti in cui il manto di copertura sarà costituito da tegole o lastre.

Tabella 1.3 – Sommario delle tipologie di strutture portanti utilizzate comunemente in edilizia



1.2. ELEMENTI DI COPERTURA

Tutti i carichi esterni che agiscono sul tetto devono essere assorbiti in primo luogo dal manto di copertura. In questo modo, la copertura svolge le funzioni portanti, suddivisibili sostanzialmente in due tipi di assorbimento del carico:

- coperture che trasferiscono i carichi direttamente alla sottostruttura piana o solo a una porzione di essa, come ad esempio coperture metalliche a bande;
- coperture che riportano i carichi esterni sulle travi lineari di supporto, come lamiera grecata o tegole.

Normalmente le coperture definiscono le dimensioni delle sottostrutture: le misure di tegole e pietre determinano la distanza tra i listelli; le lamiere determinano quella tra le terzere.

Il primo strato del tetto ha come compito fondamentale la protezione da rovesci di tutti i tipi. Per assicurare tale protezione le possibilità sono due: l'acqua può venir deviata dall'edificio il più rapidamente possibile oppure essere fermata e poi condotta nel punto adatto. Il primo sistema è proprio del tetto inclinato, il secondo del tetto piano.

Dal momento che gli elementi a disposizione per il rivestimento del tetto sono di una grandezza data, l'arte del rivestimento consiste nel saper selezionare le parti in modo che la loro disposizione possa assecondare il principio del deflusso dell'acqua. Il compito della copertura applicata al tetto inclinato consiste nel proteggere la struttura sottostante dall'acqua non di rendere la sottostruttura impermeabile.

Il **rivestimento a superficie piana** (Figura 1.5-a) prevede che le tegole si sovrappongono le une alle altre finché tutta l'acqua piovana, passata lungo le fessure longitudinali, non venga convogliata dall'alto verso il basso e dall'interno verso l'esterno. Tutte le tegole funzionano in questo modo e così, ad esempio, le scandole, le lastre d'ardesia e gli embrici; anche l'incanniccato e i rivestimenti di paglia

assecondano questo principio. Lo svantaggio è determinato dal fatto che le tegole necessitano di diverse sovrapposizioni e di una pendenza elevata.

Nel **rivestimento a coppi** (o **tegole** in Figura 1.5-b), già in culture molto antiche, si è evitato lo svantaggio dell'eccessiva sovrapposizione, modellando gli elementi in modo da presentare le fessure longitudinali rialzate ai lati e coperte da un rivestimento supplementare. Nel corso del tempo questi modelli sono stati via via differenziati, sino ad arrivare agli odierni coppi. Questo processo di differenziazione ha riguardato anche le fessure trasversali.

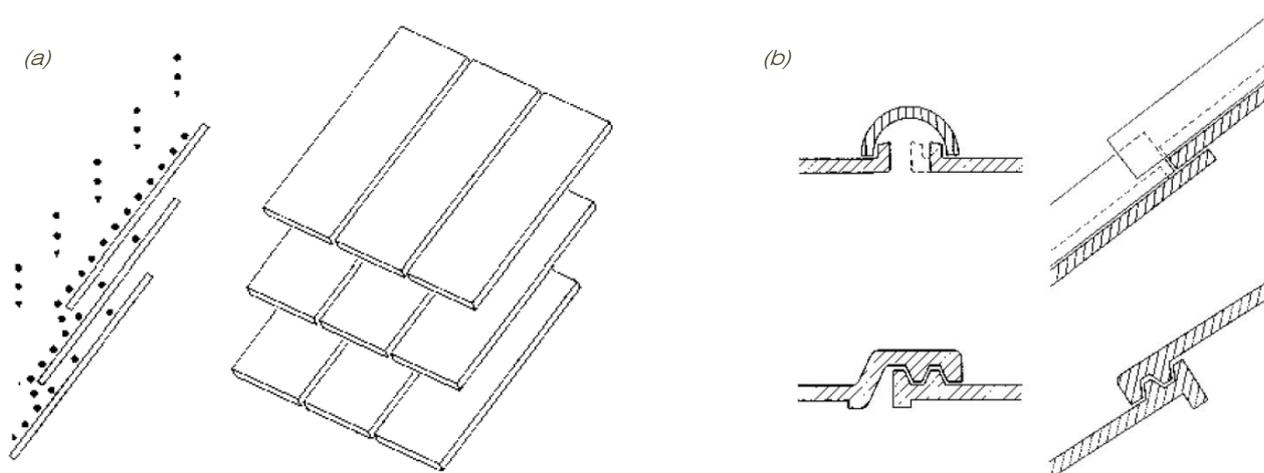


Figura 1.5 – (a) Principio del rivestimento a superficie piana, (b) principio del rivestimento con impiego di coppi o tegole

Nella prima delle due tipologie di rivestimento rientrano le coperture di ardesia, granulato di ardesia e lastre piane di fibrocemento¹.

La forma delle lastre in genere è definita dai differenti mercati presenti nei diversi paesi e può essere: a lastre rettangolari o quadrate (Figura 1.6-a), ad angolo acuto (b), ad arco (c) o a squame (d). La loro diffusione nei diversi paesi è invece spesso determinata dalla piovosità dei territori, dalla reperibilità dei materiali da costruzione e dalla tradizione architettonica.

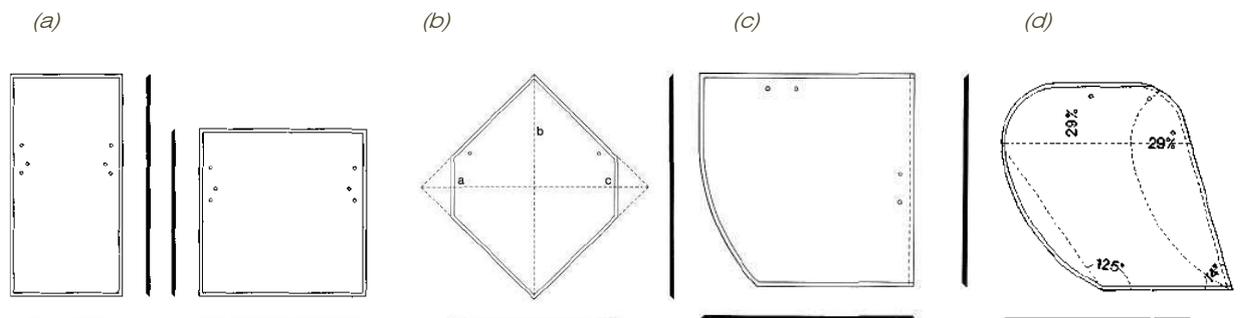


Figura 1.6 – (a) Lastre quadrate e rettangolari, (b) lastre ad angolo acuto, (c) lastre ad arco, (d) lastre a squame

¹ È necessario precisare che si aggiungerebbero alla medesima categoria anche le coperture in scandole di legno, in cannicciato, ad embrici ed in paglia, ma nell'ambito di questo lavoro si prenderanno in esame solo le tipologie di copertura più diffuse in ambito civile e che impiegano materiali base da costruzione come il calcestruzzo, l'argilla e i materiali lapidei.

Gli elementi piani di copertura, sia a base lapidea sia a base di fibrocemento sono per esempio molto diffusi nelle costruzioni dell'Europa del nord, e dell'America del nord. Luoghi in cui l'elevata piovosità spesso comporta falde ad elevata pendenza.

Per ognuno dei materiali impiegati, e a seconda della forma dell'elemento di copertura, è possibile definire un numero di elementi medio necessario per un'esecuzione a regola d'arte e conseguentemente un peso medio dello strato di copertura.

- Copertura doppia rettangolare: $10.000/[(H - SV)/2 \times B] = x$ [pezzo/mq];
- Copertura a lastre ad angolo acuto: $10.000/(((L - A - Sg) \times B)/2) = x$ [pezzo/mq];
- Copertura con lastre ad arco o squame: variabile da 22,7 a 34,6 [pezzi/mq];

Si definiscono di seguito: H altezza della pietra; SV sovrapposizione doppia in altezza; B larghezza della pietra; L lunghezza diagonale della pietra; A lunghezza del taglio; Sg sporgenza a goccia;

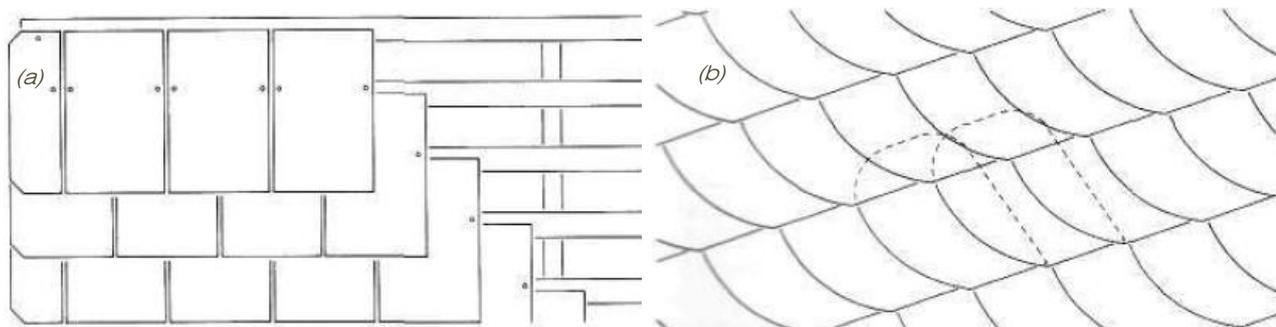


Figura 1.7 – Esempio di copertura doppia (a) Lastre quadrate e rettangolari, (b) lastre a squame

In Tabella 1.4 e Tabella 1.5 si illustrano i pesi per le diverse tipologie di lastre anche al variare del materiale costituente. Si nota che a parità di dimensioni le lastre in fibrocemento sono più leggere delle comuni lastre di ardesia. Le celle vuote indicano l'impossibilità di ottenere con l'uno o l'altro materiale la dimensione specificata.

Tabella 1.4 – Pesì ogni mille elementi di lastre di diverse forme prodotte in ardesia

Materiale Ardesia						
Lastra	Dimensioni [cm]		Peso ogni 1000 pz		Peso Kg/mq	
	da	a	da	a	da	a
quadrata	60x30	22x15	2410	480	31	40
angolo	56x56	26x18	1475	510	23	44
arco	40x40	25x25	-	860	30	-
squame	42x32	18x15	2000	320	11	45

Tabella 1.5 – Pesì ogni mille elementi di lastre di diverse forme prodotte in fibrocemento

Materiale Fibrocemento						
Lastra	Dimensioni		Peso ogni 1000		Peso Kg/mq	
	da	a	da	a	da	a
quadrata	60x30	22x15	1530	380	20	32
angolo	56x56	26x18	1360	-	21	-
arco	40x40	25x25	1340	510	17	29
squame	42x32	18x15	-	-	-	-

Rientrano invece nella seconda tipologia le **tegole** realizzate in terra cotta (o coppi) o calcestruzzo. Queste ultime soprattutto diffuse in gran parte dell'Europa centrale e meridionale, Americhe, Asia e Africa meridionale.

Nel seguito vengono trattate principalmente tegole in calcestruzzo. Il processo industriale di estrusione (pressa a cordone) che permette di realizzare questi prodotti, a differenza del processo per la produzione di tegole in argilla, consente infatti l'introduzione di fibre di rinforzo nella fase di preparazione dei materiali. Non sarebbe altrimenti possibile inserire fibre polimeriche di rinforzo in un processo che prevede fasi di cottura ad alta temperatura come avviene per le tegole in argilla.

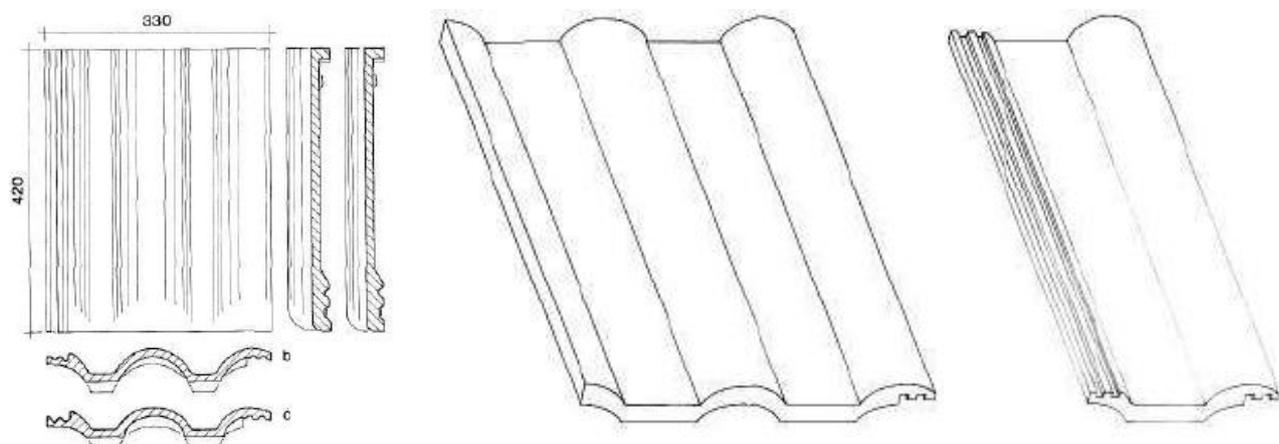


Figura 1.8 – Esempio di tegole in calcestruzzo a doppia conca

Esistono svariate tipologie di tegole in calcestruzzo in commercio. A seconda dei paesi, e delle condizioni meteorologiche, si sono sviluppati diversi profili: piani, a una conca e a due conche (Figura 1.8). Sulle tegole in calcestruzzo è possibile applicare ad oggi diversi trattamenti superficiali e colorazioni di vario genere. La tipologia del trattamento superficiale, come anche il colore, sono spesso definiti dal paese in cui queste vengono commercializzate. Differenti condizioni climatiche, differenti culture e diverse tecnologie costruttive determinano dunque i colori, la forma e ruvidità della superficie del prodotto (Figura 1.9).

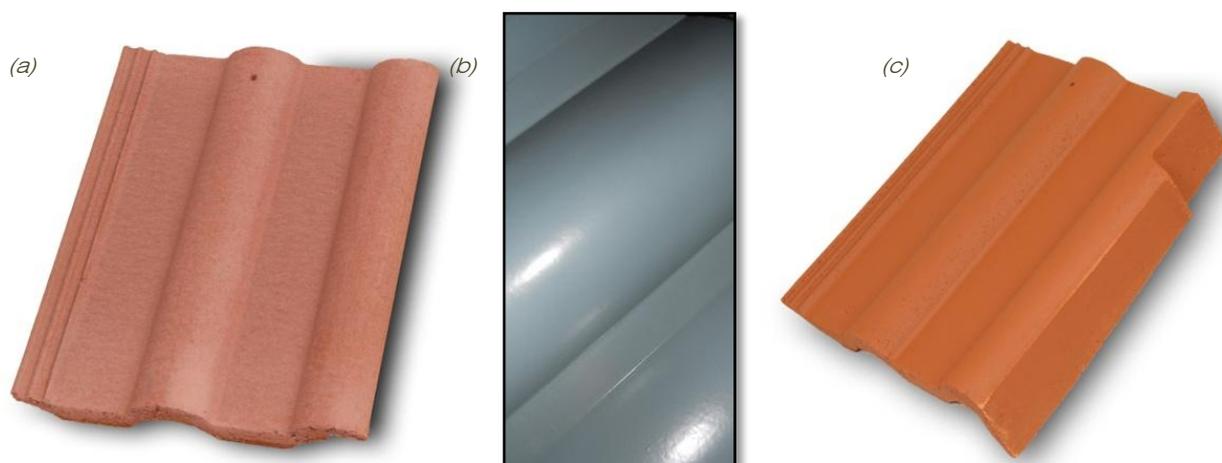


Figura 1.9 – Esempio di tegole sagomate a Doppia Romana (a) e (c) ed esempio di finitura superficiale liscia per applicazioni in paesi del Sud Est Asiatico (b)

In alcuni modelli si offre una superficie ruvida a granuli, ottenuta con l'aggiunta di granulato sinterizzato a colori nella pasta di cemento; questo tipo di lastre viene impiegato per lo più in località montane, perché la loro superficie ruvida rende più salda la presa della neve. Tuttavia si sporcano più facilmente delle coperture a superficie liscia. Nei paesi del sud est asiatico invece si prediligono tegole da colori forti e manufatti aventi superficie lucida.

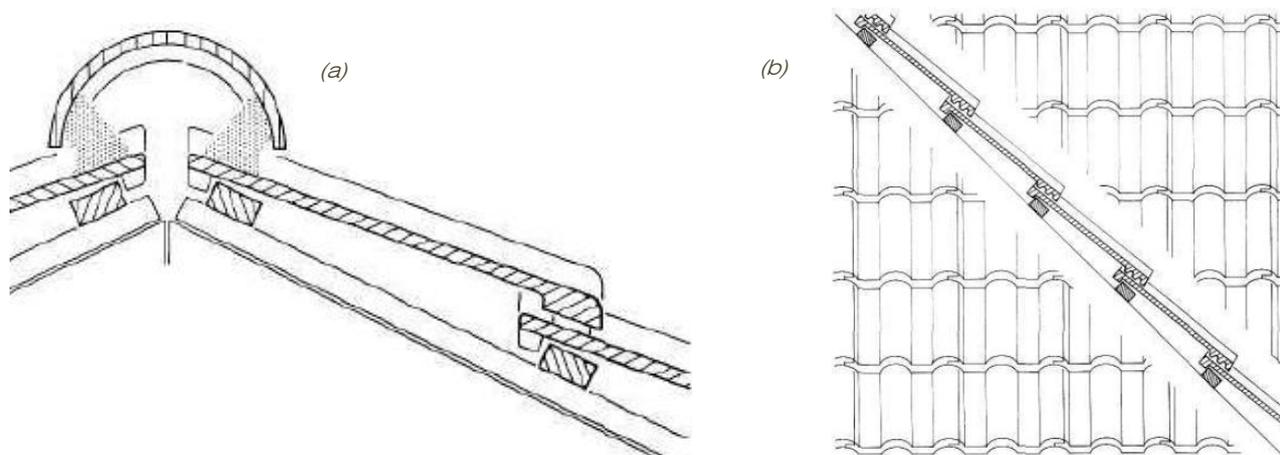


Figura 1.10 – Esempio di disposizione di tegole sulla sottostruttura, (a) nella zona di colmo, (b) in pianta e sui travetti

A differenza di quanto avviene però per la tegola in argilla, il processo industriale che porta all'estrusione di tegole in calcestruzzo per mezzo del principio della pressa a cordone, pone delle condizioni di standardizzazione delle dimensioni del prodotto finale. Ad esclusione infatti della lunghezza di taglio, la larghezza è pressoché fissata e pari a 330 mm². In aggiunta, predisponendo mediamente una sovrapposizione di circa 70 mm tra una tegola e la sottostante si ottiene una copertura superficiale del prodotto pari a circa 10 pezzi/mq. Conseguentemente il carico per unità di superficie

² Tale larghezza è da considerarsi una misura standard per la produzione delle tegole in calcestruzzo ma non l'unica possibile. Esistono infatti in commercio prodotti di larghezza e lunghezza maggiore. Misure maggiorate sono spesso necessarie per adattare i manufatti alle differenti sottostrutture di copertura.

sarà direttamente imputabile al peso dell'elemento stesso e variabile dai 40 Kg/mq ai 60 Kg/mq.

Tabella 1.6 – Pesì e dimensioni per varie tipologie di tegole piane e ondulate in argilla e calcestruzzo

Materiale Argilla						
Tegola	Dimensioni [cm]		Peso Kg		Peso Kg/mq	
	da	a	da	a	da	a
piana	14x28	18x38	1,8	2,4	50	45
ondulata	11x41	25x42	1,6	4	30	50

Materiale Calcestruzzo						
Lastra	Dimensioni		Peso Kg		Peso Kg/mq	
	da	a	da	a	da	a
piana	33x42	-	5	6	40	70
ondulata	33x42	33x56	4	7	40	60

Come illustrato nelle immagini sottostanti entrambe le tecniche possono essere impiegate per una vasta gamma di inclinazioni di falda generalmente compresa tra i 90° e 22°. Al di sotto dei 22° si rischierebbero infiltrazioni di acqua tali da compromettere il sistema di copertura.

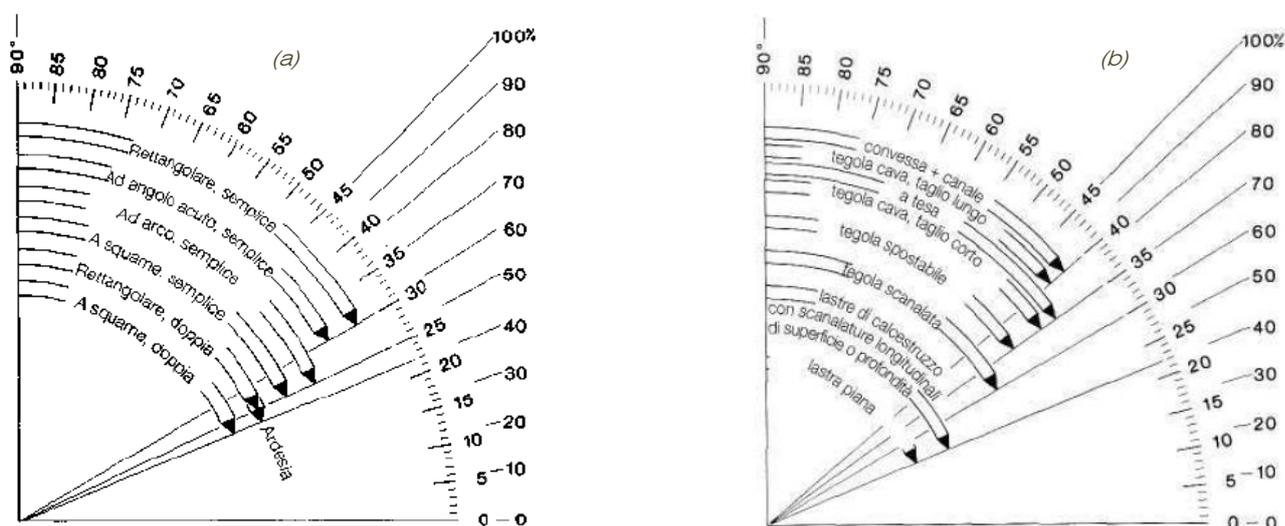


Figura 1.11 – Diverse inclinazioni del tetto possibili con i sistemi di copertura a tegole, (a) per sistemi di copertura di tipo a superficie piana, (b) per sistemi di copertura a tegole o coppi piani o ondulati

Tra i rivestimenti a coppi di moderna generazione si trova certamente la copertura in **pannelli ondulati in fibrocemento**. Il materiale è lo stesso impiegato per la realizzazione degli elementi di copertura piana; le differenze riguardano la forma, le dimensioni e la colorazione.

Lo sviluppo industriale della tecnica costruttiva appartiene al nord Europa luogo in cui ebbe origine l'ormai centenario brevetto.

Ad oggi il mercato che compete a questo prodotto è da imputarsi maggiormente al risanamento delle vecchie lastre che contengono amianto e a paesi in via di sviluppo come il sud est asiatico in cui il risparmio sui materiali edili ha preso, specialmente in passato, il sopravvento sulle qualità architettoniche delle costruzioni.

Questo genere di lastre è fortemente deformabile e discretamente resistente ai comuni carichi agenti sulla copertura.

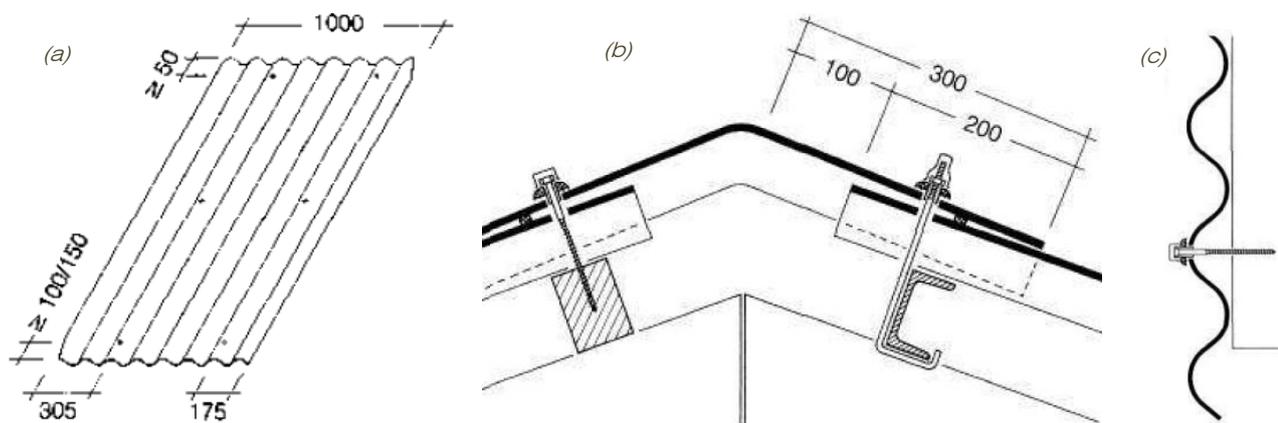


Figura 1.12 – (a) esempio di lastra ondulata in fibrocemento, (b) particolare costruttivo per ancoraggio delle lastre nella zona di colmo, (c) sporgenza delle lastre nella zona di gronda del tetto

A differenza delle tradizionali coperture con elementi di piccole dimensioni tramite la copertura a lastre ondulate è possibile raggiungere inclinazioni fino a 10°. In Tabella 1.7 si può osservare l'indubbio vantaggio che si può trarre dal punto di vista della diminuzione dei carichi permanenti impiegando lastre in fibrocemento.

Tabella 1.7 – Pesi e dimensioni per varie tipologie di tegole piane e ondulate in argilla e calcestruzzo

Materiale Fibrocemento						
Pann.	Dimensioni [cm]		Peso Kg		Peso Kg/mq	
	da	a	da	a	da	a
ondulato	62,5x110	250x100	7	35	10	14

Nella seguente Tabella 1.8 e nelle successive figure (Figura 1.13 e Figura 1.14) si riportano brevi schemi riassuntivi di quanto fino ad ora esposto.

Tabella 1.8 – Tipologie di elementi di copertura utilizzate comunemente in edilizia per applicazioni in tetti inclinati



Nelle figure vengono inoltre esposte tipologie di elementi di copertura non espressamente trattate in questo documento, come ad esempio steli, lastre piatte, lamine e teli.

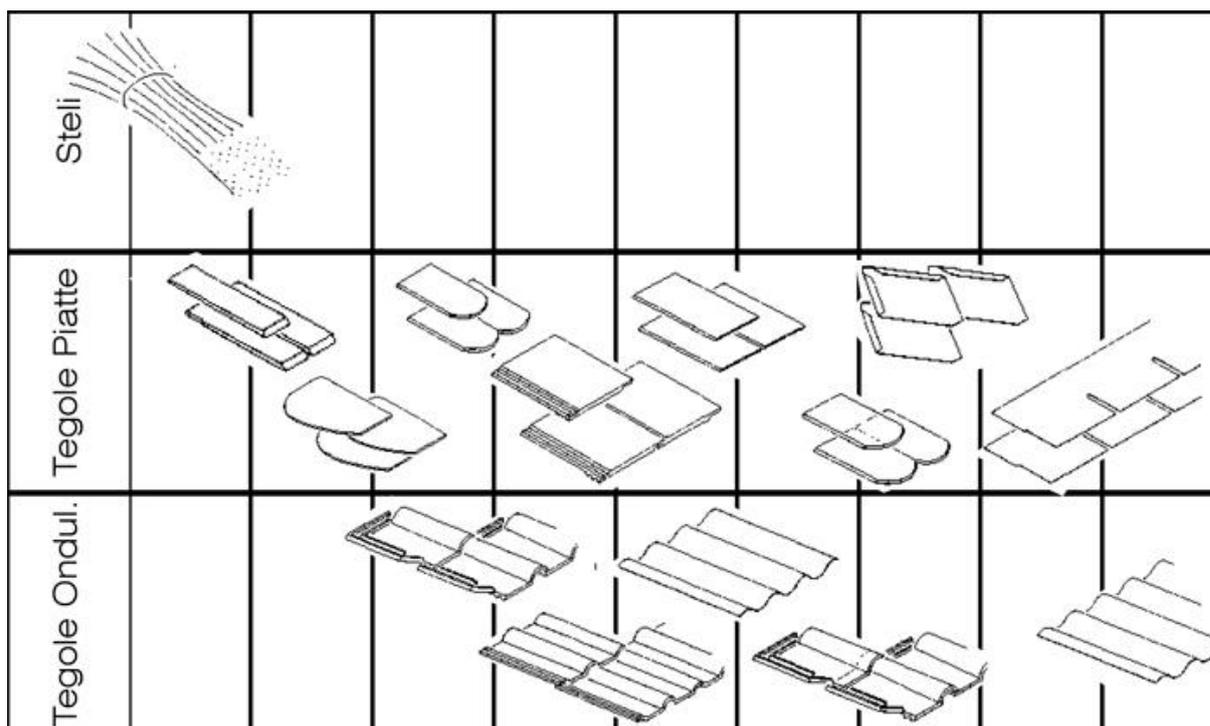


Figura 1.13 – Tipologia di elementi di copertura e loro materiali (parte a)

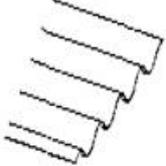
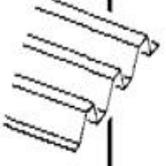
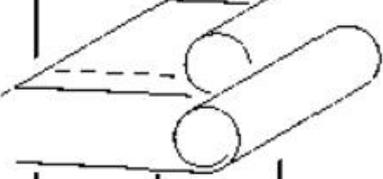
Lastrine Piatte.									
Lastrine ondulate.									
Lamine									
Teli									
	Incannicciata	Legno	Pietra	Mattone	Calcestruzzo	Fibrocemento	Vetro	Metallo	Bitume e Plastica

Figura 1.14 – Tipologia di elementi di copertura e loro materiali (parte b)

1.3. LA TECNOLOGIA COMUNEMENTE UTILIZZATA: “PRESSA A CORDONE”

La tecnologia della pressa a cordone, o più comunemente denominata processo di estrusione (Figura 1.15 e Figura 1.16), si è affermata con vigore a partire dalla seconda metà del 1800. Più di un secolo ormai è trascorso ma il principio di base non è sostanzialmente cambiato, e consiste principalmente nella pressatura di una miscela a base di inerti, cemento ed acqua su di uno stampo in grado di sorreggere il prodotto fino al raggiungimento del livello di indurimento adeguato. La pressatura avviene principalmente mediante un rullo metallico (Figura 1.17-c) in grado di accompagnare la miscela di legante e inerti al di sotto di una sagoma formatrice in

grado di donare alla tegola l'aspetto finale che comunemente si può osservare nei prodotti in commercio.



Figura 1.15 – Estrusori ad azione continua di moderna generazione

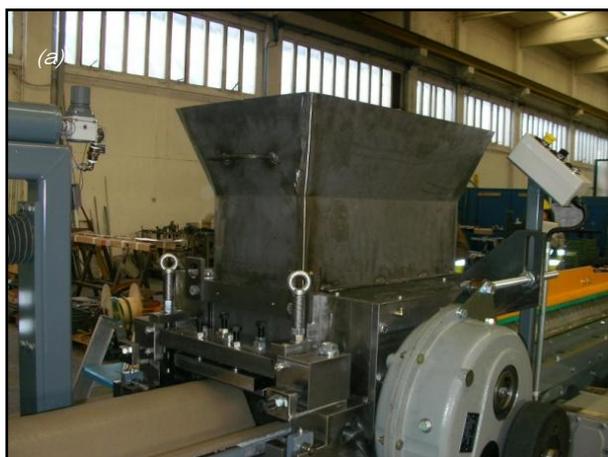


Figura 1.16 – Estrusori ad azione continua di moderna generazione, particolare della testa di estrusione (a) e particolare del motore di azionamento della spinta (b)

La parte meccanicamente attiva nella formazione della tegola in calcestruzzo è denominata *testata* dell'estrusore (Figura 1.17-a, -b). Sotto di essa vengono trascinati gli stampi metallici per mezzo di un sistema a catenaria o idraulico (pressa a cordone ad azione alternativa).

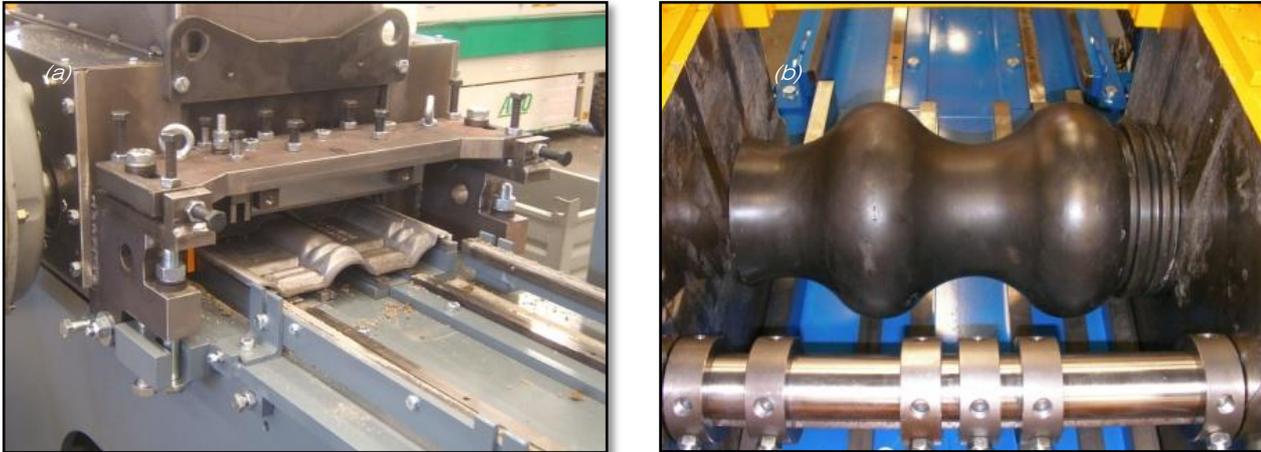


Figura 1.17 – (a) Testata dell'estrusore con stampo metallico di formatura in uscita, (b) particolare del coltello ad azione alternativa successivamente alla fase di formatura e (c) rullo formatore dei manufatti.

In successione, al termine della fase di formatura avviene il taglio del prodotto fresco (Figura 1.18-a, -b). Il taglio viene eseguito per mezzo di lame metalliche ad azione alternativa agenti in sincronia con il sistema di avanzamento degli stampi. Tale fase ha lo scopo di suddividere il *cordone* in tanti segmenti corrispondenti al singolo manufatto



Figura 1.18 – (a) Sistema di taglio automatico per estrusori ad alta capacità produttiva

Estrusione in realtà sarebbe un termine improprio per descrivere un processo che oggettivamente emula una sorta di pressatura continua.

Ad oggi i grandi passi nel campo dell'automazione hanno consentito di velocizzare la produzione di tegole aumentando il rendimento globale dell'impianto e consentendo quindi di abbassarne i costi di funzionamento.

Sebbene l'estrusore costituisca il cuore dell'impianto di produzione tegole esso rimane comunque un elemento di importanza relativamente marginale, specialmente in un contesto in cui tutte le operazioni avvengono automaticamente con la sola supervisione del personale addetto. Per questo motivo l'elevata produttività degli

impianti di moderna generazione non è solo definita dalla capacità della pressa a cordone, ma, in contemporanea da tutti gli elementi che compongono il sistema: betonaggio, linea di trasporto del prodotto fresco, impilaggio, stagionatura, linea di trasporto del prodotto stagionato, sformatura del prodotto, reggiatura e impacchettamento.

Nonostante la fase di taglio sia un aspetto tecnicamente delicato, a causa delle elevate forze d'inerzia in gioco dovute alle forti accelerazioni, si può affermare che negli ultimi dieci anni la massima velocità di estrusione raggiunta si attesti a 150 tegole per minuto (Figura 1.19). Considerando fattori standard di riduzione della produttività nel contesto di impianto si può raggiungere una produzione di oltre 50.000 tegole per turno di 8 ore.

Non si ritiene in questa sede necessario oltremodo approfondire gli aspetti tecnici del funzionamento dell'impianto, in quanto non di fondamentale importanza nell'ambito della tecnologia di estrusione e delle tipologie di materiali impiegati per la produzione di tegole, per i quali peraltro, si rimanda ai successivi capitoli.

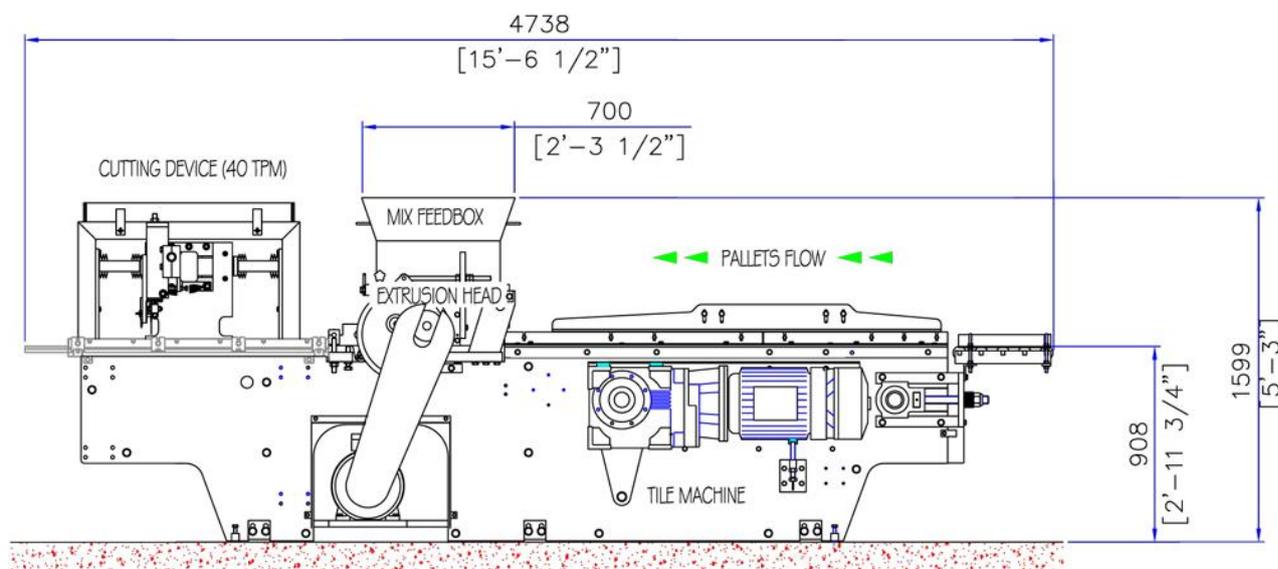


Figura 1.19 - Disegno tecnico con indicate dimensioni di massima di un estrusore a 40 tegole per minuto

È comunque necessario osservare che i costi per la realizzazione di un impianto di grandi dimensioni possono raggiungere i 4 milioni di euro. L'entità dell'investimento perciò implica la stesura di un piano di sostenibilità che necessariamente deve prendere in considerazione le condizioni di mercato attuali e future.

1.4. STATO DELL'ARTE NELL'IMPIEGO DI PRODOTTI FIBRORINFORZATI NELLE COPERTURE CIVILI

La quasi totalità del mercato di prodotti fibrorinforzati impiegati nelle coperture civili è dominata dai pannelli ondulati.

Lo sviluppo e il miglioramento di una tecnologia nata ormai più di un secolo fa ha permesso una drastica diminuzione dei costi ed una conseguente ottimizzazione del prodotto.

Originario dell'Europa del nord il sistema fu inizialmente brevettato da Ludwig Hatschek nel 1890 e impiegava fibre di amianto.

Successivamente si diffuse in tutto il mondo consentendo di realizzare coperture isolanti da agenti atmosferici e allo stesso tempo praticabili abbattendo i costi di installazione. Il mercato di tali prodotti subì una forte flessione qualche decennio fa a causa del divieto di impiego di fibre di amianto nel processo. Se in molti paesi europei si è risolto il problema per mezzo di una conversione di impianto all'impiego di fibre di diverso genere, ad oggi rimangono ancora centinaia di impianti sparsi nel mondo, e concentrati nei paesi in via di sviluppo, che presto dovranno essere convertiti all'impiego di fibre non dannose per l'organismo.

I principali costituenti del fibrocemento sono fibre e cemento; in particolare le sue componenti sono (in percentuali di volume): 40% di legante (cemento Portland), 11 % di materiale additivo (polvere calcarea, fibrocemento in polvere), 2% di fibre (sintetiche organiche; alcool polivinilico, poliacrilonitrile o amianto), 5% di fibre di processo (cellulosa), 12% di acqua, 30% d'aria (pori). Inizialmente venivano usate solo fibre d'amianto (cemento amianto); dal 1990 in Germania la produzione di prodotti per l'edilizia è impostata su fibrocemento completamente privo di amianto, cosa che ancora non avviene in altre nazioni.

Nella pagina seguente in Figura 1.20 viene riportato uno schema riassuntivo del processo industriale impiegato ad oggi per la produzione di pannelli ondulati fibrorinforzati.

Riassumendo i componenti il prodotto finale sono essenzialmente: legante, filler inerti o in grado di interagire con il legante, fibre, acqua e additivi per il controllo della lavorabilità nelle diverse fasi del processo. Il cuore del trattamento è identificabile nella zona in cui avviene la formazione dei film ad alto contenuto di acqua. Dopo una prima fase di proporzionamento dei componenti in cui le materie prime vengono ridotte a una poltiglia liquida in condizioni di grande abbondanza di acqua satura di calcare, queste vengono mescolate ed inseriti all'interno di una vasca. Il tamburo rotante, soggetto internamente ad uno stato di bassa pressione, raccoglie l'emulsione di fibre e legante fino a formare un film di pochi decimi di millimetro.

Ad ogni ciclo, al completamento di ogni giro, il layer sul tamburo aumenta di spessore e nel contempo viene disidratato dell'acqua in eccesso. Al raggiungimento dello spessore ideale la lastra viene scaricata su di un feltro e trasportata ai processi di ulteriore disidratazione, di formatura, stagionatura e finitura. Il pannello ottenuto, al termine della stagionatura, ha ormai raggiunto una rigidità appropriata per le operazioni di impacchettamento e stoccaggio.

Il fibrocemento è, per sua natura, color grigio cemento, ma si ottengono altre colorazioni con uno strato pigmentato distribuito sulla parte superiore del vello durante la lavorazione (prima dell'avvolgimento sui rulli formanti); il fibrocemento può essere anche verniciato successivamente con diversi prodotti disponibili in commercio. Al termine, sulle lastre finite si passa uno strato acrilico che occlude le porosità residue.

Il fibrocemento è resistente ai funghi, ai batteri (aerobi o anaerobi) e alle termiti; depositi d'aria possono costituire (soprattutto sulle lastre non rivestite) un terreno fertile per la crescita di alghe e muschio.

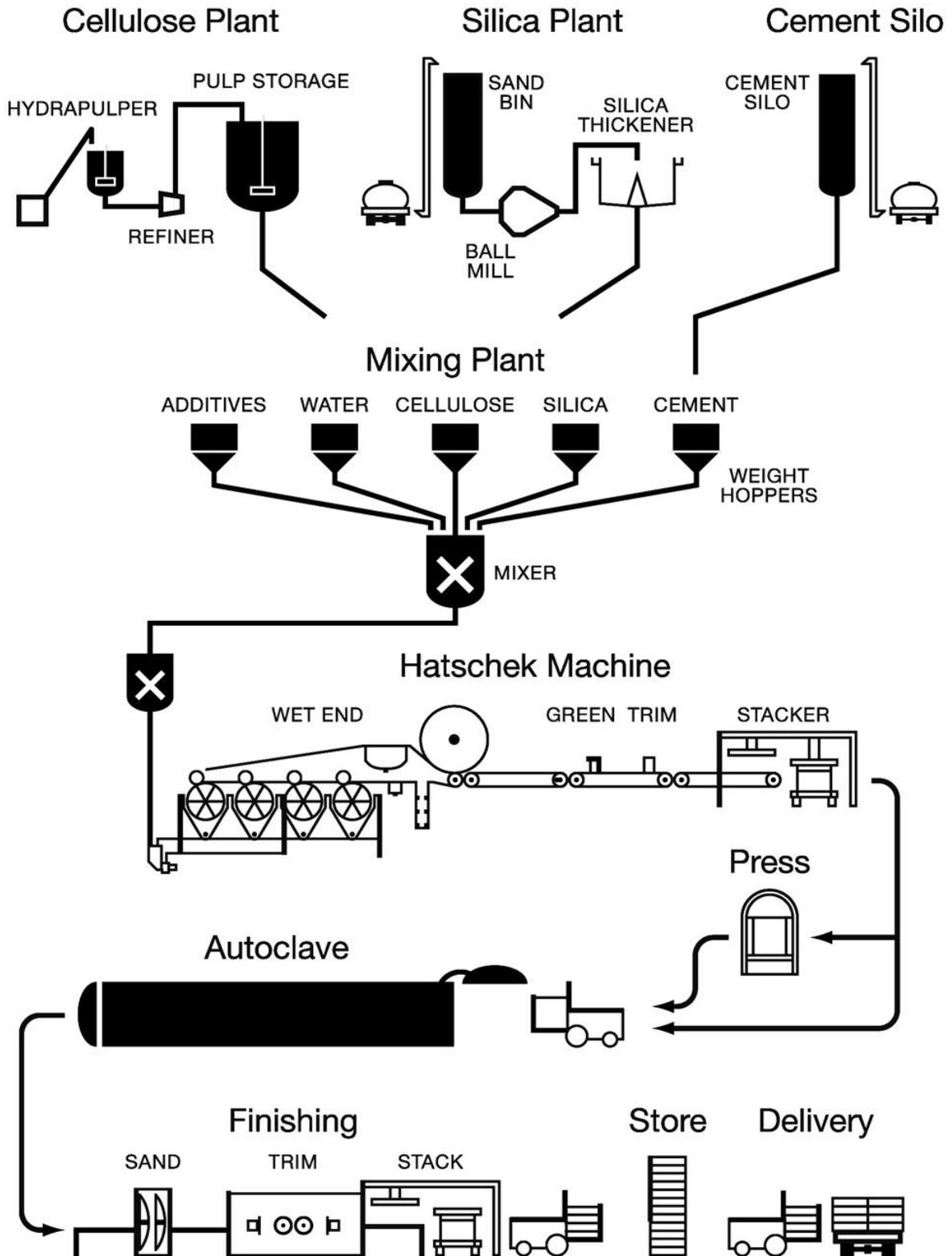


Figura 1.20 – Tecnologia odierna impiegata per la produzione di pannelli ondulati per mezzo del sistema Hatschek

1.5. PERCHÉ LE TEGOLE FIBRORINFORZATE

I vantaggi nell'impiego di sistemi di copertura per mezzo di manufatti di piccole dimensioni possono essere riscontrati sia dal punto di vista dell'installazione sia dal punto di vista del processo industriale. Dal punto di vista dell'installazione la modularità degli elementi semplifica le operazioni di montaggio e promuove una standardizzazione della tipologia di sottostruttura portante delle coperture. Dal punto di vista industriale oggi è possibile realizzare differenti profili nella medesima linea di produzione. Questo implica una ottimizzazione dei costi, sia di installazione sia di progettazione degli impianti di produzione. Al contrario il maggiore svantaggio che deriva dall'impiego di piccoli elementi di copertura è costituito dall'elevato peso per unità di superficie.

Elementi modulari di maggiori dimensioni come i pannelli ondulati fibrorinforzati garantiscono bassi costi di installazione e un minore apporto di carichi alla copertura, pur possedendo buoni requisiti di praticabilità, durabilità e isolamento da agenti atmosferici. Unico neo del processo di realizzazione dei manufatti consiste nella scarsa flessibilità dell'impianto in termini di variabilità dimensionale, forme ottenibili e trattamenti estetici superficiali.

L'elevata pericolosità per l'organismo, derivante dall'impiego di fibre cancerogene quali le fibre di amianto sta inducendo una forte politica di bonifica dei siti contaminati e ad una dovuta conversione a sistemi e tecnologie più sicuri per l'uomo.

Nell'ultimo ventennio ed anche più recentemente si sono sviluppate tecnologie alternative, con l'impiego di fibre di diverso genere, atte alla produzione di pannelli di copertura in assenza di amianto.

Dal punto di vista tecnologico, sfortunatamente, la modifica dei materiali di miscela, come ad esempio gli additivi e le fibre di rinforzo, comporta elevati costi di conversione degli impianti esistenti. L'obsolescenza dei vecchi impianti e la loro scarsa flessibilità stanno inoltre inducendo i maggiori fornitori di fibre di rinforzo ad investire su sistemi industriali basati sull'estrusione di tegole fibrorinforzate.

A tal proposito si riportano in



Tabella 1.9³ i maggiori produttori mondiali di fibrocemento per il mercato dell'edilizia. Ad esclusione del mercato europeo, prevalentemente dominato da grandi gruppi derivati dalla fusione di diverse società, come ad esempio Etex group e Eternit AG, il mercato del sud est asiatico è costituito da singoli produttori locali di medie dimensioni.

È facile quindi immaginare l'interesse dei produttori di fibre nello sviluppo di tale nuova tecnologia. Lo sviluppo e la commercializzazione di un nuovo prodotto potrebbe quindi interessare un mercato estremamente vasto.

³ Si ringrazia Kuraray Co. Japan. per aver fornito i dati aggiornati al secondo semestre 2011

Tabella 1.9 – Dislocazione dei maggiori produttori di fibrocemento e loro mercati principali

Mappa dei produttori di fibrocemento					
Società	ETEX group	Eternit AG (Fiber Cem group)	Cembrit (FLSmidt group)	Brasilit (St. Gobain group)	James Hardie
Sede	Belgio	Svizzera	Danimarca	Brasile	Australia
Mercato	EU, UK, Sud America, Asia, Africa	EU	EU, UK, EU est	BRA	AUS, NZ, Asia, USA, EU

Il connubio della flessibilità delle linee di estrusione e della leggerezza del prodotto fibrorinforzato, pur preservando l'aspetto esteriore delle coperture in tegole, sta ricevendo forti impulsi dal mercato edilizio che inducono alla ricerca e sviluppo di tegole leggere fibrorinforzate ad elevate prestazioni meccaniche.

Gli indubbi vantaggi nell'impiego di tegole fibrorinforzate si riconoscono nel mantenimento dei bassi costi di trasporto e installazione, nella preservazione dell'aspetto estetico delle nuove costruzioni o di quelle rammodernate e soprattutto al forte abbattimento dei carichi agenti in copertura. La diminuzione di peso è relativamente maggiore in quei paesi in cui il legno è la materia prima principale nella realizzazione della sottostruttura portante e in cui l'azione sismica è rilevante.

STATO DELL'ARTE NELLO STUDIO DI MATERIALI FIBRORINFORZATI ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES "ECC"

Nei paragrafi seguenti vengono riportati importanti elementi della ricerca e sviluppo nel campo di materiali ECC dalla progettazione del materiale fine a se stessa sino alle applicazioni commerciali. In particolare viene data molta importanza al ruolo compiuto dalla micromeccanica del materiale nella progettazione e ottimizzazione della miscela. Verranno inoltre compiute riflessioni sulla duttilità del materiale, sulle caratteristiche della prestazione di materiali ECC e R/ECC (Reinforced ECC) e importanti considerazioni sui costi dei medesimi. In aggiunta sono indicate le possibili applicazioni di materiali ECC in campo strutturale e le possibili ulteriori direzioni di ricerca.

ECC (*Engineered Cementitious Composites*) è una classe di compositi a base cementizia ad elevata duttilità fruibile per impieghi industriali in cui il controllo dei costi gioca un ruolo di rilevante importanza specialmente in relazione alle elevate quantità di materiali impiegate.

Successivamente alla sua introduzione, avvenuta dieci anni fa, il materiale è stato soggetto a diversi sviluppi sia dal punto di vista delle proprietà sia dal punto di vista delle applicazioni in edilizia.

La scoperta degli ECC è dovuta principalmente ai primi sperimentatori di IPC Group (Aveston et al. 1971) che inoltre per primi applicarono il concetto di meccanica della frattura per analizzare i sistemi di materiali fibrorinforzati. Le recenti e non ultime scoperte nel campo degli ECC non sarebbero certamente potute avvenire senza la partecipazione di diverse organizzazioni internazionali.

2.1. DALLE APPLICAZIONI TEORICHE ALLA COMMERCIALIZZAZIONE

Dalla loro introduzione sul mercato 10 anni or sono i compositi ECC hanno subito significanti sviluppi sia dal punto di vista della ricerca sia dal punto di vista della

commercializzazione in modo tale da influenzare sia il mondo accademico sia il mondo industriale. In Figura 2.1 si mostra un semplice grafico che riassume le principali fasi dalla produzione e vendita dei prodotti industriali per arrivare alle applicazioni commerciali.

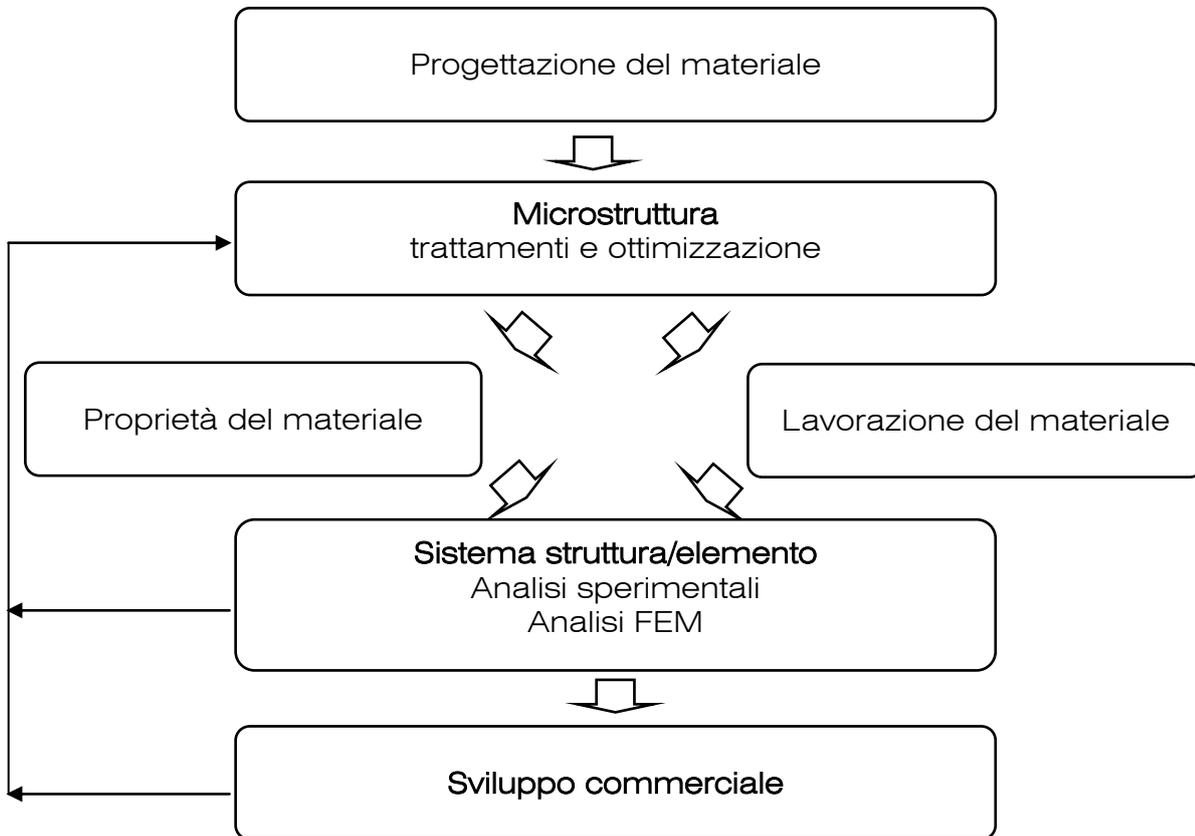


Figura 2.1 – Principali fasi dalla produzione e vendita dei prodotti industriali

Una teoria è in grado correlare le proprietà macroscopiche del composito alla sua microstruttura e costituisce la base per la progettazione dei materiali compositi. Essa in particolare deve modellare il comportamento micro strutturale del composito ECC e allo stesso modo modellare il comportamento del materiale nel suo complesso.

La progettazione a livello microstrutturale ha consentito di ottenere compositi fibrorinforzati ad elevato livello di duttilità, una proprietà prima d'ora mai osservata in compositi fibrorinforzati di tipo discontinuo.

In Figura 2.2 si riporta la curva ottenuta in una prova di trazione di materiali ECC aventi capacità di deformazione pari al 5% (Li et al. 2001), approssimativamente 500 volte maggiore della deformabilità di calcestruzzi standard FRC.

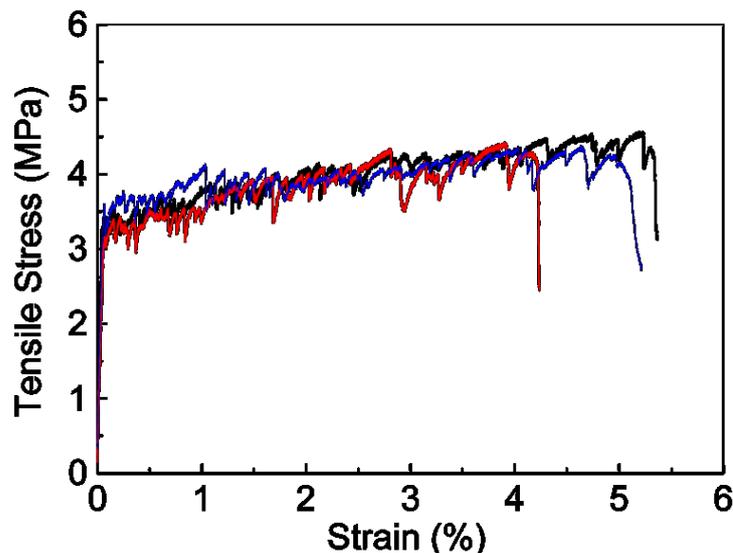


Figura 2.2 – Curva sforzi-deformazioni per la prova di trazione uniassiale di provini realizzati in ECC rinforzati con fibre in PVA al 2% in frazione di volume

Ad oggi è possibile accedere ad un vasto database riguardante le proprietà meccaniche (resistenza a trazione, compressione, taglio fatica e comportamento viscoso) e fisiche (resistenza al gelo e ritiro plastico/igrometrico) di questo genere di compositi. In aggiunta l'ottimizzazione dei componenti rende possibile realizzare compositi a base cementizia impiegabili in diversi processi industriali. ECC attualmente possono essere stampati, spruzzati (Kanda et al. 2001; Kim et al. 2003), autocompattanti (Kong et al. 2003) ed estrusi (Stang & Li 1999).

L'origine dell'acronimo ECC è derivante dalla metodologia di sviluppo dello stesso, essenzialmente basata sul proporzionamento e studio dei costituenti nonché l'ottimizzazione del ruolo che questi svolgono all'interno della miscela.

L'estrema duttilità del composito allo stato indurito e l'ottima lavorabilità del prodotto durante le operazioni di mescolazione ne hanno permesso l'utilizzo in una vasta gamma di applicazioni. Numerosi esperimenti sono stati eseguiti per validare le performance di ECC in applicazioni strutturali (Fukuyama et al. 1999; Parra-Montesinos and Wight 2000; Yoon and Billington 2002; Fischer and Li 2003a,b; Li et al. 2002) alcune anche di carattere strutturale. Questi esperimenti hanno altresì dimostrato come le proprietà di un materiale da costruzione possano influenzare il comportamento strutturale di interi edifici.

L'aggiunta e la formulazione di modelli costitutivi in codici ad elementi finiti (Kabele 2001; Han et al. 2002a) ha consentito di prevedere il comportamento strutturale di elementi costruttivi; consentendo inoltre un uso selettivo del materiale ECC in applicazioni strutturali con conseguente diminuzione dell'attività sperimentale.

Le attività di ricerca, sperimentazione e formulazione di modelli matematici atti alla descrizione del comportamento macro strutturale del composito non sono però sufficienti a giustificare lo sviluppo commerciale. L'adozione infatti di una nuova tecnologia deve anche tenere conto del rapporto tra costi e benefici dovuto al suo impiego. Mentre l'impiego in una prima fase iniziale del prodotto ECC può risultare

più costoso del calcestruzzo tradizionale, i benefici che si registrano a lungo termine sono sufficienti a consentirne la commercializzazione, in un futuro ormai prossimo, in un elevato numero di paesi, quali: Giappone, Korea, Australia, Svizzera e Stati Uniti. È necessario comunque sottolineare l'importanza dell'ottimizzazione del materiale ai fini della riduzione dei costi di produzione.

Di primaria importanza rimane dunque l'affinamento del comportamento a livello microstrutturale del composito che con successive reiterazioni consentirebbe l'ottenimento di un ottimo prodotto dal punto di vista commerciale. Come indicato nella soprastante Figura 2.1 ci si aspetta che l'ulteriore diminuzione dei costi di produzione del materiale sia seguita da un continuo flusso di attività atte al trattamento e ottimizzazione del materiale passando sempre per fasi di ricerca e valutazione sperimentale.

È ragionevole attendersi, tra le varie applicazioni del composito, lo sviluppo di tipologie di materiali aventi speciali applicazioni come ad esempio la costruzione di prodotti/manufatti alleggeriti o prodotti ad alta resistenza, applicazioni, queste, che favorirebbero inoltre collaborazioni in diversi campi di ricerca, tra diversi fornitori di prodotti e/o materiali, prefabbricatori e non ultimo progettisti.

2.2. MICROMECCANICA

Estese ricerche hanno dimostrato la fondamentale importanza della capacità della fibra di connettere le due superfici opposte di un elemento fratturato. La valutazione della capacità e modalità delle fibre di resistere alla forza di distacco delle due superfici può essere effettuata tramite la cosiddetta curva $\sigma - \delta$ (Li 1992b; Li et al.1993; Lin and Li 1997 Figura 2.3). La curva rappresenta la tensione media σ trasmessa attraverso una fessura avente spessore costante pari a δ durante una prova di trazione diretta. La curva $\sigma - \delta$ fornisce l'elemento di collegamento tra i componenti del composito fibrorinforzato e la duttilità del medesimo.

Per comprendere il fondamentale meccanismo che governa la relazione tra i comportamenti *strain-hardening* e *strain-softening* nei compositi ECC è necessario innanzitutto riconoscere la capacità di carico e l'assorbimento di energia che occorrono durante la fessurazione di un materiale fibrorinforzato.

La curva $\sigma - \delta$ (Figura 2.3) può essere pensata come la curva della relazione forza/spostamento di una molla immaginaria a comportamento non lineare in grado di connettere le superfici opposte delle facce fessurate. Tale relazione rappresenterebbe la forza mediata sul numero totale di fibre agenti all'interno della fessura al fine di contrastarne la relativa apertura durante l'azione di trazione diretta.

Uno dei criteri della multi-fessurazione impone che la resistenza di prima fessurazione della matrice non deve eccedere la tensione massima di connessione che nasce tra le fibre di collegamento, *bridging stress* σ_{cu} . In questa sede è possibile nominare tale criterio come *criterio di resistenza* per la multi fessurazione. Un secondo criterio utile alla spiegazione del fenomeno della multi-fessurazione è invece basato sulla modalità di propagazione della fessura, ovvero sull'energia che questa genera. In questa sede questo criterio verrà nominato *criterio energetico* per la multi-fessurazione. Chiaramente la violazione del criterio di resistenza comporta l'incapacità per le fibre di mantenere unite le facce interessate dalla fessurazione.

Nel caso si presenti una eccessiva debolezza o della matrice cementizia o delle fibre di rinforzo avviene il fenomeno di *pull-out* delle fibre dalla matrice cementizia con conseguenti bassi valori di picco del *bridging stress* σ_{cu} osservabili nel grafico $\sigma - \delta$. Nel caso invece l'interfaccia tra fibra e matrice sia eccessivamente resistente le fibre non possono deformarsi a sufficienza, e, spezzandosi dallo luogo a bassi valori di apertura critica δ_p .

In entrambi i casi l'energia complementare evidenziata in grigio nella sottostante Figura 2.3 è di minore entità.

Accurati studi (Li and Leung 1992) hanno rivelato che se durante la fessurazione del composito si osserva un esiguo sviluppo di energia complementare la fessura si propaga come una tipica *Griffith Crack*. Nel momento in cui la fessura si propaga, nel mezzo di essa ha luogo la rottura delle fibre di collegamento. In questo modo avrà luogo l'espansione della zona non soggetta ad alcun sforzo di trazione dando luogo al fenomeno di *tension-softening* tipico dei normali compositi FRC. In questi compositi il raggiungimento del carico massimo di rottura è subito seguito da una perdita quasi istantanea di resistenza a trazione.

L'ottimizzazione del comportamento meccanico può essere ottenuta solo mediante un'equilibrata ripartizione tra la resistenza a sfilamento delle fibre e la resistenza della matrice a base cementizia nella quale queste sono immerse.

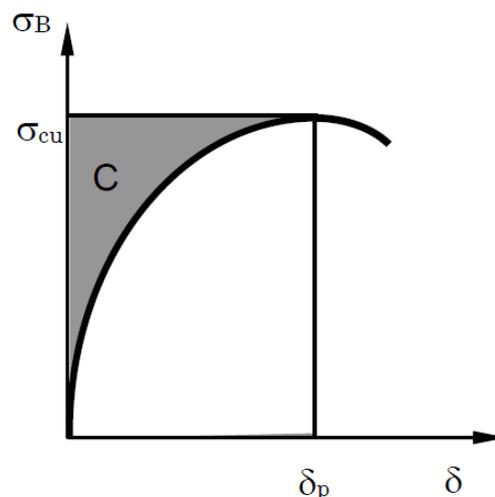


Figura 2.3 – Curva $\sigma - \delta$ (Li 1992b; Li et al. 1993; Lin and Li 1997)

Al contrario se durante la fessurazione del composito si osserva un grande sviluppo di energia complementare la fessura generata si propaga in lunghezza conservando la sua ampiezza. La conservazione dell'ampiezza della fessura consente alle fibre di trasferire il carico alle zone circostanti con conseguente nascita del noto fenomeno di multi-fessurazione.

Principalmente quindi si riconoscono due tipologie di propagazione della frattura (Figura 2.4):

- *Griffith Type Crack* caratteristico dei normali compositi fibrorinforzati FRC, aventi comportamento a rottura del tipo *Strain Softening*;

- *Steady State Crack Opening* che invece fa capo ai compositi di tipo ECC aventi comportamento a rottura del tipo *Strain Hardening*;

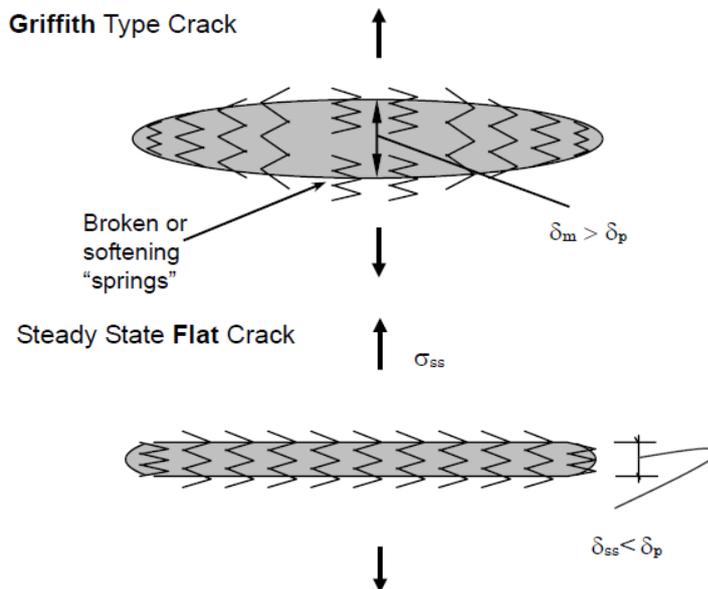


Figura 2.4 – Confronto tra la propagazione della frattura di tipo Griffith e Steady State Crack Opening

I criteri energetici e di resistenza basati sulla curva $\sigma - \delta$ forniscono le linee guida per il trattamento superficiale delle fibre, la resistenza della matrice e dell'interfaccia. La forma della curva $\sigma - \delta$ è invece governata dalla frazione di volume di fibre, dal diametro, dalla lunghezza, dalla resistenza a trazione e allo sfilamento (Lin et al. 1999). L'insieme delle azioni sopracitate consiste nella *tayloring strategy* messa in atto per la tipologia di fibre REC15 commercializzata da Kuraray Co. Ltd (Japan) per l'impiego in prodotti compositi di tipo ECC.

Quanto appena scritto permette di considerare che lo studio della micromeccanica è uno strumento utile e necessario per la progettazione di materiali fibrorinforzati aventi come obiettivo il raggiungimento di determinate caratteristiche meccaniche. Questo procedimento è la base di partenza per il *Performance Driven Design Approach* (PDDA) (Li 1992a) proposto per la progettazione dei materiali.

È inoltre necessario osservare che la micromeccanica è altresì utile per ottenere l'ottimizzazione del composito dal punto di vista commerciale. Come è noto infatti l'industria delle costruzioni è fortemente sensibile ai costi dei materiali. Ogni nuovo materiale inserito nel mercato deve possedere un buon rapporto qualità/prezzo. L'elevato costo delle fibre rispetto ai componenti standard di un composito a base cementizia impone il contenimento dei valori percentuale in frazione di volume. L'unione di questo aspetto alla necessità di perseguire ottime prestazioni meccaniche in termini di deformazione massima e carico ultimo (*strain-hardening property*) ha spinto la ricerca alla definizione di un valore critico, di transizione, della percentuale di fibre, al di sotto del quale il comportamento meccanico rientra nella comune categoria di compositi FRC (*strain-softening property*) ed oltre al quale pur raggiungendo un comportamento ECC la scelta si dimostra essere economicamente non vantaggiosa.



Chiaramente l'obiettivo principale delle ricerche sino ad ora svolte è stato quello di ridurre al minimo il valore critico della quantità di fibre presenti. Tutto ciò è stato possibile per merito degli studi approfonditi che hanno permesso di impiegare le teorie e i modelli micromeccanici per modificare il comportamento a rottura dei materiali testati in funzione della variazione delle proprietà fisiche e di interfaccia delle fibre i rinforzo.

In Figura 2.5 e Figura 2.6 si mostra l'effetto, dei diversi trattamenti superficiali sulle fibre al termine di una prova di trazione diretta. Il trattamento superficiale consiste nella modificazione, tramite agenti chimici, della resistenza a sfilamento dalla matrice a base cementizia delle fibre in PVA. L'impiego di questa tipologia di fibre allo stato grezzo, in assenza di trattamenti superficiali, comporta lo sviluppo di un'alta resistenza allo sfilamento. Mentre un contenuto di prodotto chimico modificatore di aderenza compreso tra lo 0,8% e l'1,2% sul peso di fibre tende a ridurre lo sviluppo della resistenza allo sfilamento a livelli tali da consentire il raggiungimento della soglia critica in contenuto di fibre già a valori che si attestano attorno al 2% in frazione di volume.

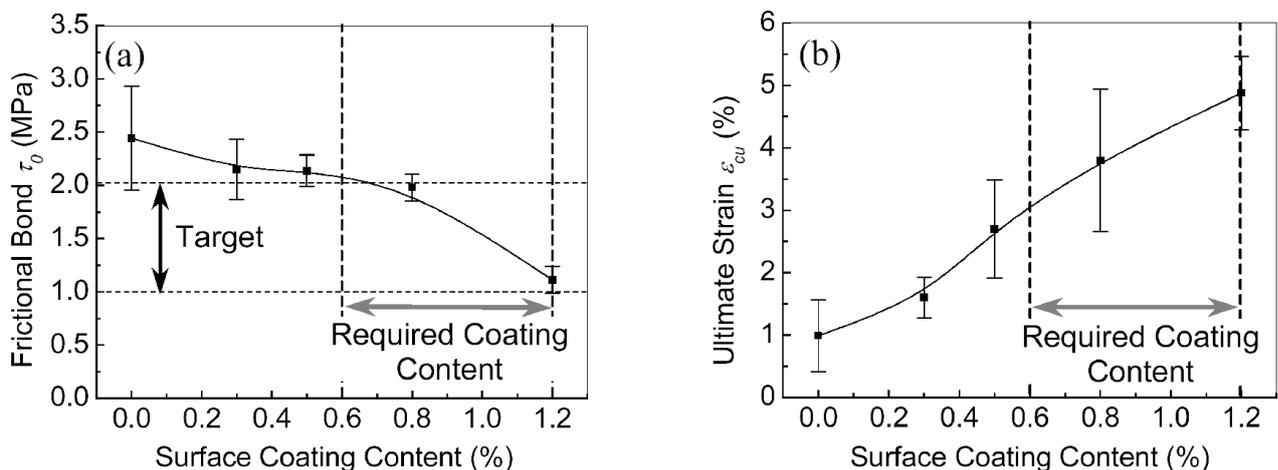


Figura 2.5 – Effetto dei diversi trattamenti superficiali sulle fibre al termine di una prova di trazione diretta

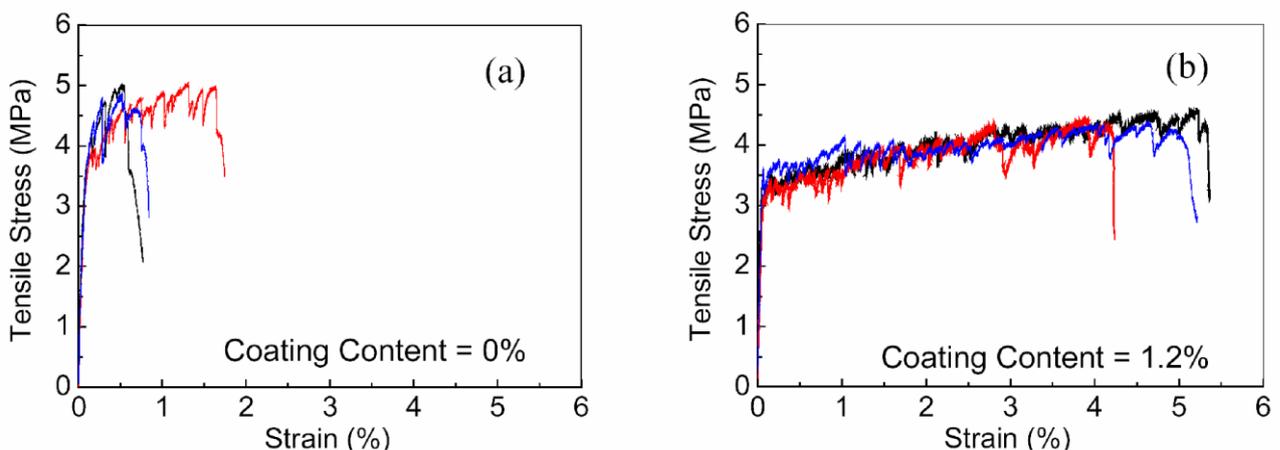


Figura 2.6 – Effetto dei diversi trattamenti superficiali sulle fibre al termine di una prova di trazione diretta

In Figura 2.7 invece si può osservare l'effetto di protezione da danni superficiali da sfilamento ottenuto applicando gli agenti chimici modificatori di aderenza.

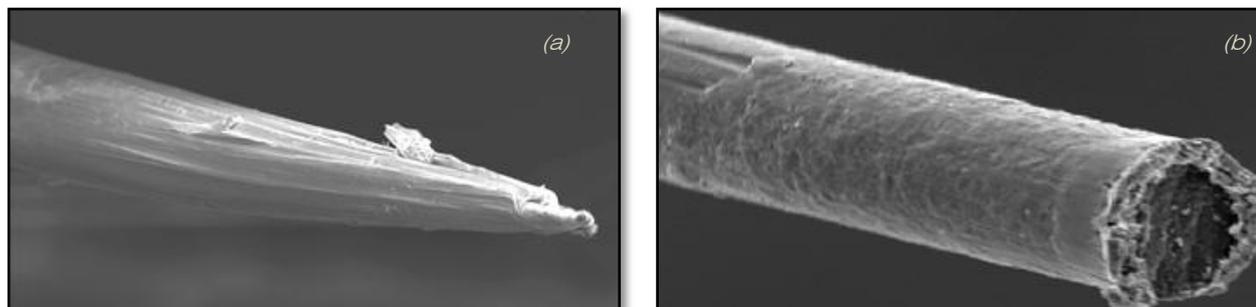


Figura 2.7 – Effetto di protezione da danni superficiali da sfilamento ottenuto applicando gli agenti chimici modificatori di aderenza. (a) in assenza di agente modificatore di resistenza allo sfilamento e (b) in presenza del giusto quantitativo di agente modificatore.

2.3. RESISTENZA E DUTTILITÀ

La principale caratteristica di elementi realizzati con compositi ECC è l'incremento di duttilità. Questo implica che il collasso strutturale dovuto alla fragilità del materiale è molto meno significativo rispetto a quanto invece avviene per materiali standard FRC. La progettazione di calcestruzzi rinforzati mediante armature tradizionali è basata sul parametro di resistenza a compressione dei provini del materiale di riferimento. La resistenza a trazione del calcestruzzo viene di fatto trascurata a favore di sicurezza. Per questo motivo la resistenza strutturale è da intendersi come rappresentata dalla resistenza massima del materiale a compressione. Questo concetto è corretto solo se la resistenza a compressione del materiale può essere ritenuta realmente rappresentativa della modalità di collasso degli elementi strutturali. L'assunzione di una resistenza a trazione del calcestruzzo trascurabile, ovvero non correlata alla resistenza a compressione del materiale, può comportare gravi errori di valutazione di resistenza ultima strutturale nel caso la struttura sia principalmente sottoposta a sforzi di trazione. Al contrario un materiale duttile può generare elevate resistenze a livello strutturale. In esso di fatto la resistenza a trazione del materiale non viene trascurata e viene correlata alla resistenza ultima a compressione dello stesso.

Un elevato numero di osservazioni sperimentali (Lim and Li 1997; Kanda et al. 1998; Kesner and Billington 2002) supportano quanto detto precedentemente.

Un esempio è lo studio di pannelli prefabbricati impiegati per il recupero sismico delle strutture. Test ciclici di taglio diretto (Kesner and Billington 2002) applicato ai pannelli realizzati in conglomerato cementizio armato avente resistenza a compressione pari a 50 MPa hanno riportato una resistenza strutturale pari a 38 kN. Valore, questo, inferiore ben del 35% a quello ottenuto con pannelli realizzati in compositi ECC aventi una resistenza a compressione di 41 MPa. Il 35% di resistenza in più è imputabile alla duttilità del materiale fibrorinforzato in grado di garantire l'integrità del pannello anche a livelli elevati di deformazione.

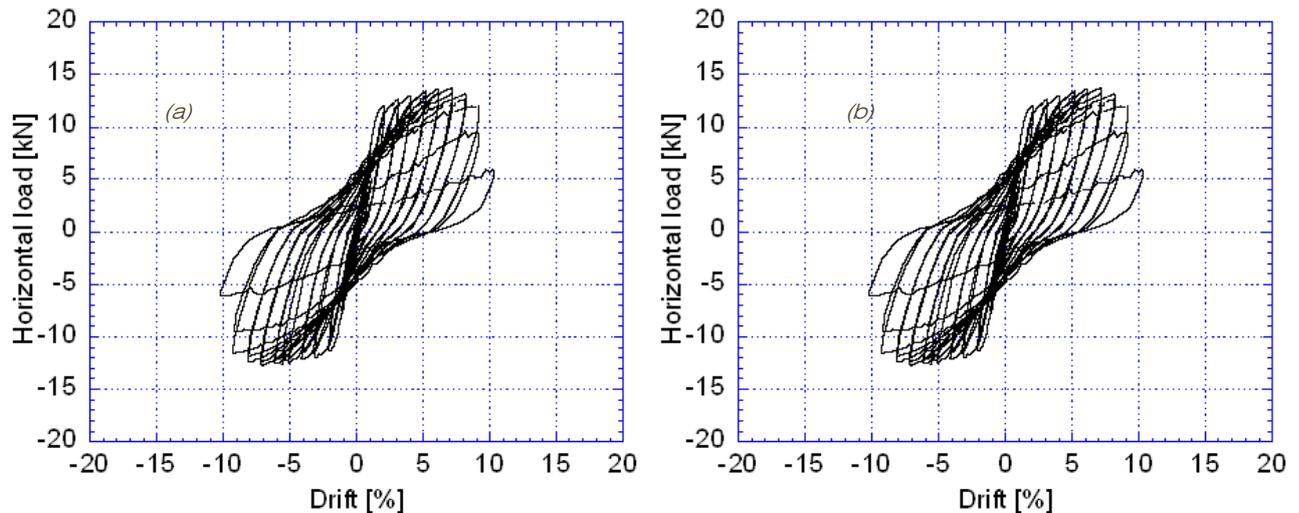


Figura 2.8 – Comportamento ad isteresi di una colonna soggetta a carico ciclico rinforzata tradizionalmente (a) e con materiali ECC in assenza di staffe trasversali. Maggiore assorbimento di energia, comportamento ad isteresi stabile e minori danni osservabili nel secondo caso (b) anche in assenza di armature di rinforzo

2.4. PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL COMPORTAMENTO DI MATERIALI RINFORZATI ECC

Riduzione o eliminazione delle armature di rinforzo per le sollecitazioni taglianti (staffe di rinforzo): i materiali ECC posseggono eccellenti capacità di resistenza a taglio come dimostrato dai test a taglio su travi da Ohno (Li et al. 1994). Sotto sollecitazione tagliante i compositi ECC sviluppano fessure multiple ortogonali alla direzione della tensione principale di trazione. Per merito del comportamento duttile a trazione dei materiali ECC si ottiene un conseguente comportamento duttile anche a sollecitazione tagliante prevalente.

Ne consegue che elementi realizzati con materiali ECC potrebbero fare a meno, in parte o totalmente, di armature metalliche. Per esempio risultati di test su elementi resistenti a flessione soggetti a carico ciclico confermano che la capacità di carico e l'energia assorbita degli elementi realizzati in materiali ECC (Figura 2.9b) è nettamente maggiore degli elementi rinforzati in modo tradizionale con armature metalliche (Figura 2.9a).



Figura 2.9 – Comportamento a rottura di un pilastro rinforzato con tradizionali armature metalliche (a) e di un pilastro rinforzato con materiali ECC senza staffe trasversali. In tutti e due i casi è stato imposto uno spostamento laterale che nel primo caso ha comportato l'espulsione del calcestruzzo superficiale e la disgregazione dello stesso anche nella zona interna alle staffe di rinforzo, mentre nel secondo caso (b) il pilastro presenta una fessurazione diffusa.

Capacità di sopportare ad elevati livelli di deformazione: per merito del comportamento *strain-hardening* durante la sollecitazione di trazione il materiale ECC può sostenere elevati livelli di deformazione senza incorrere in elevati danneggiamenti locali. Questa caratteristica può essere sfruttata particolarmente in quegli impieghi strutturali in cui ci si aspetta un elevato livello di deformazione. Un esempio può essere quello delle solette di collegamento che possono ad oggi sostituire i tradizionali giunti di collegamento nelle pavimentazioni. Il rinforzo realizzato con questi materiali può essere in grado di accomodare deformazioni indotte per esempio da ritiro, da variazioni di temperatura o comportamento viscoso del calcestruzzo. Zhang et al. (2002) hanno dimostrato la veridicità delle affermazioni, applicando fasce di rinforzo realizzate con materiali ECC a provini realizzati in calcestruzzo tradizionale ottenendo il completo assorbimento delle deformazioni da parte del rinforzo.

Successivamente, test in scala reale hanno ulteriormente avvalorato la capacità degli elementi di rinforzo di sopportare elevati livelli di deformazione anche in applicazioni reali.

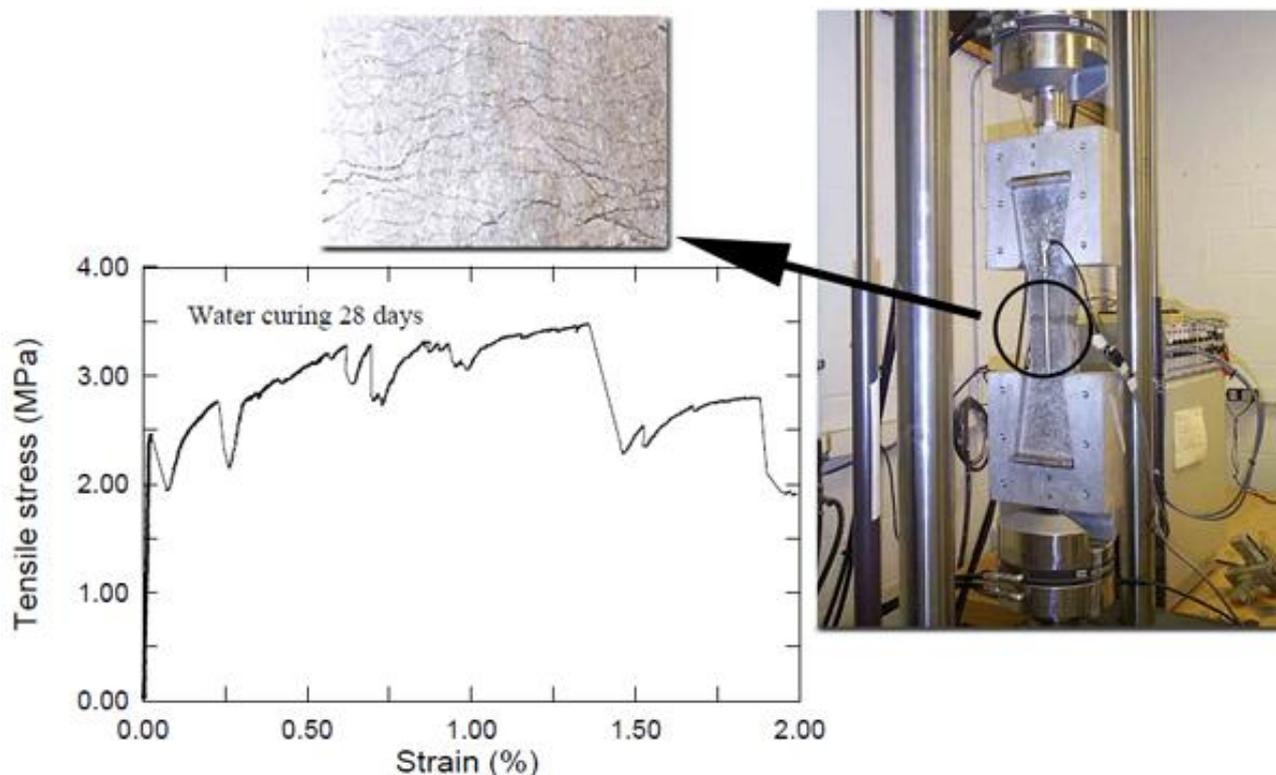


Figura 2.10 – Test di trazione diretta di un provino in calcestruzzo tradizionale al quale sono stati applicati rinforzi esterni costituiti di materiale ECC. La grande capacità di deformazione del materiale ECC è in grado di sopperire alla deformazione imposta alla struttura composta riflettendosi nella generazione di multi fessure avvicinate.

Compatibilità tra le deformazioni del materiale ECC e quelle dell'armatura metallica:
In elementi ECC rinforzati con armatura metallica tradizionale sia l'armatura tradizionale sia la matrice ECC possono essere considerati come dotati di sufficiente duttilità, in grado quindi di sostenere elevati livelli di deformazione. Da ciò risulta che i due materiali sperimentano deformazioni compatibili anche durante la fase di snervamento dell'acciaio. Questo implica che non vi sono (o sono minimi) scorrimenti relativi tra la superficie dell'armatura metallica e la superficie del calcestruzzo rinforzato. L'assenza di scorrimenti all'interfaccia dei due materiali ha effetto diretto sulla qualità dell'aderenza delle armature alla matrice cementizia. Lo stress all'interno della matrice può infatti essere trasmesso alle armature metalliche anche in fase post critica a micro fessurazione avvenuta. ECC infatti consentono il trasferimento di sforzi all'interno della matrice, e di conseguenza alle armature, anche in fase avanzata di fessurazione.

Al contrario, in elementi rinforzati tradizionalmente, il trasferimento degli sforzi deve obbligatoriamente passare per l'interfaccia tra armatura e matrice. Pertanto, a fessurazione avvenuta, la matrice subisce uno scarico tensionale nella zona fessurata riversando gli sforzi sulle armature metalliche. Questo comporta deformazioni non compatibili tra i due elementi ed elevati scorrimenti all'interfaccia degli stessi. L'elevata tensione che si sviluppa all'interfaccia dei due elementi è responsabile dei più comuni meccanismi di collasso osservabili negli elementi in calcestruzzo armato. La compatibilità delle deformazioni tra matrice ECC e rinforzi metallici in elementi

strutturali è stata confermata sperimentalmente [1]. In Figura 2.11 si può osservare il differente comportamento ad elevati livelli di deformazione di elementi rinforzati tradizionalmente (a) ed elementi ECC rinforzati con armature metalliche (b).

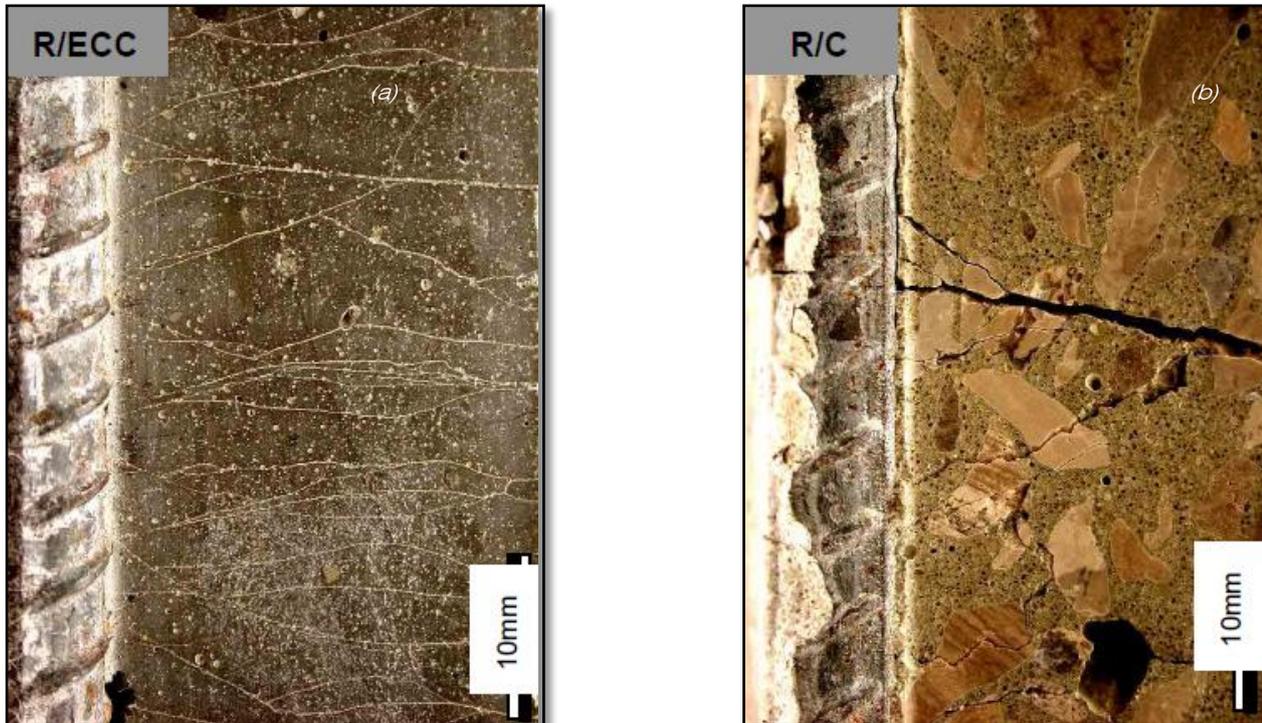


Figura 2.11 – Compatibilità delle deformazioni tra matrice ECC e rinforzo metallico (a) rispetto al rinforzo metallico inserito nel calcestruzzo tradizionale (b). Nel primo caso il carico può essere trasferito all'interno della matrice e di conseguenza alle armature metalliche per mezzo delle fibre, nel secondo caso la rottura fragile del calcestruzzo concentra gli sforzi in prossimità della zona di interfaccia causando la disconnessione tra armatura e matrice.

Interazione sinergica con i tradizionali rinforzi FRP:

L'impiego di fibre di tipo plastico per il rinforzo di elementi strutturali armati tradizionalmente con armature metalliche è spesso comporta spesso risultati scadenti a causa del prematuro collasso delle fibre di rinforzo plastico dopo l'avvenimento della rottura fragile della matrice di calcestruzzo tradizionale [4]. Il fenomeno è inoltre enfatizzato nel caso in cui l'elemento strutturale sia soggetto a carichi ciclici.

Il collasso del rinforzo plastico tradizionale (FRP) può essere prevenuto tramite l'inserimento di microfibre di rinforzo polimerico [5] in quanto la matrice ECC previene la formazione di fratture di maggiori dimensioni e consente di garantire una maggiore aderenza del calcestruzzo alle armature metalliche anche in fase inelastica.

L'impiego di materiali ECC anche nelle tradizionali strutture rinforzate con macrofibre di tipo plastico in aggiunta al rinforzo metallico, consente di ottenere elementi ad elevate prestazioni flessionali; in particolare nei confronti della duttilità, capacità di carico, resistenza al taglio e durabilità in riferimento ai tradizionali elementi HSC (*High Strength Concrete*) aventi la medesima configurazione di rinforzo.

Tolleranza e riduzione del danneggiamento del calcestruzzo: la tolleranza al danneggiamento in materiali ECC è stata oggetto di studi sin dal 1997 [6]. Provini sottoposti carico di trazione, nei quali si sono disposti intagli in diverse posizioni, si sono dimostrati essere sensibili alla posizione delle discontinuità introdotte. L'alta tolleranza al danneggiamento di materiali ECC si riflette nella modalità in cui questi collassano; per esempio se sottoposti ad un test con indentazione [7], il luogo dell'intaglio in cui la concentrazione delle tensioni è maggiore in realtà non conduce ad una propagazione della fessura. In effetti l'alta tolleranza al danneggiamento dei materiali ECC fa di essi un elemento di impiego sostenibile nella costruzioni di strutture in cui è difficile ridurre la concentrazione degli sforzi. Ad esempio nel caso di interazione tra trave di acciaio e colonna di calcestruzzo con armature metalliche; quando il giunto di connessione tra i due elementi viene sollecitato avviene una forte concentrazione di sforzi nel luogo in cui la flangia di connessione si inserisce nel calcestruzzo. Dai test eseguiti [8] si è osservato che non vi è rottura per frattura nel caso in cui si impiegano materiali ECC anche in assenza di staffe metalliche, al contrario di quanto avvenuto impiegando calcestruzzo convenzionale con rinforzi metallici.

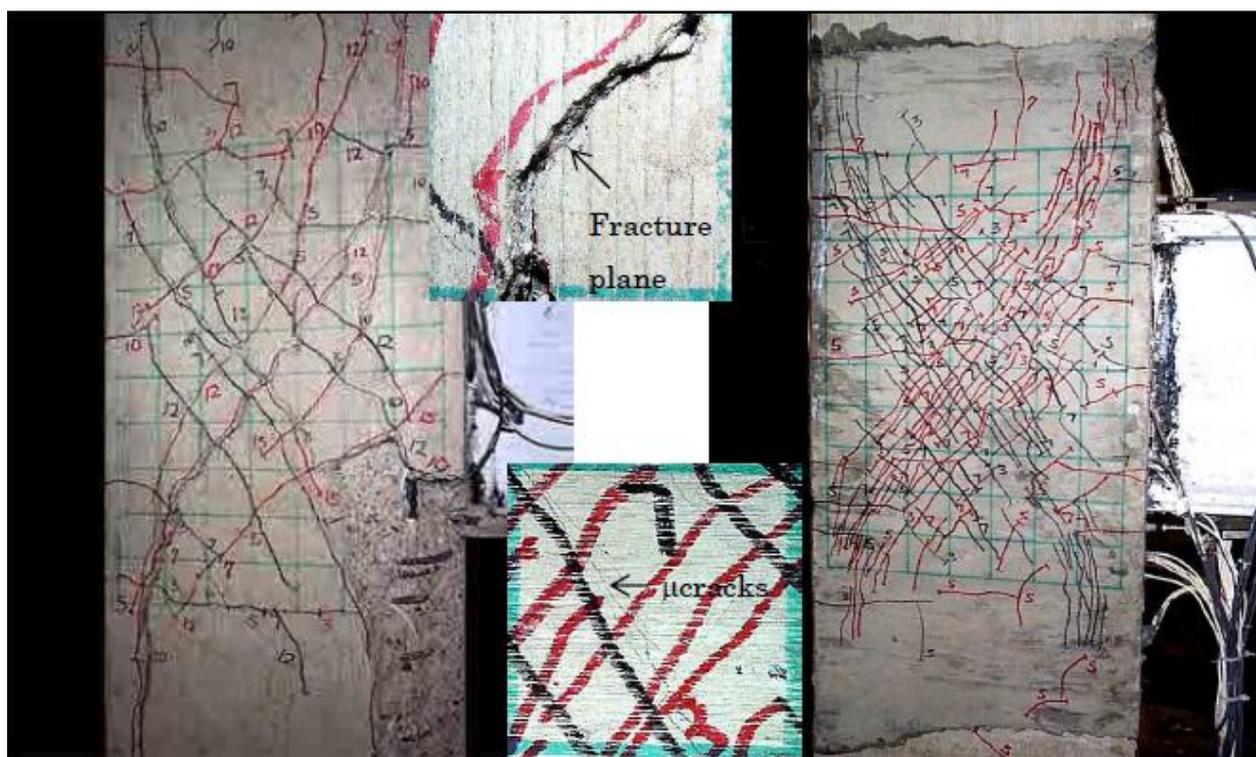


Figura 2.12 – Comportamento a rottura di travi parete dopo l'applicazione di carico ciclico. La colonna con rinforzo metallico tradizionale a sinistra mostra l'espulsione di calcestruzzo nelle zone laterali nelle zone in cui la trave in acciaio si connette. Si possono inoltre osservare le fratture che si originano durante la rottura. Al contrario la colonna realizzata in materiale ECC non presenta zone di espulsione del calcestruzzo e giunge a rottura mostrando una fessurazione diffusa.

In Figura 2.12 si può osservare che applicando un carico ciclico ai provini testati si generano una serie di fessure tra loro ortogonali. Negli stessi provini realizzati però con materiali ECC queste fessurazioni diffuse non producono l'espulsione del

calcestruzzo superficiale come invece accade nei provini delle medesime dimensioni rinforzati in modo tradizionale, dimostrando quindi una significativa riduzione del danneggiamento strutturale a rottura.

Controllo della fessurazione: quando un elemento è caricato sino al superamento del limite elastico le deformazioni inelastiche associate alla micro-fessurazione producono una ulteriore capacità di carico post critica. La larghezza della micro fessura è definita dalle proprietà della fibra e dalle proprietà della zona di interfaccia, e nel caso si impieghino fibre in PVA tale larghezza è inferiore ai 100 micron.

Generalmente la dimensione della fessura prima aumenta, e successivamente raggiunge un valore stabile a livelli di deformazione che si attestano pari all'1%. Il controllo della fessurazione e il mantenimento di bassi livelli di apertura ha innumerevoli vantaggi, primo tra tutti l'effetto positivo sulla durabilità del calcestruzzo ed in secondo luogo la minimizzazione delle operazioni di riparazione a seguito di un eccessivo carico applicato alla struttura.

2.5. COSTO DI MATERIALI ECC

L'elevato costo di materiali ECC è principalmente dovuto all'inserimento di fibre polimeriche e all'alto contenuto di cemento. Questo è il principale motivo per cui, come discusso in precedenza, è necessario porre molta attenzione durante il proporzionamento dei componenti in fase di progettazione.

Il costo per unità di peso delle fibre polimeriche in PVA impiegate è inoltre di gran lunga superiore a quello per unità di peso delle fibre metalliche impiegate nei comuni prodotti FRC. È necessario comunque notare che la densità specifica delle fibre polimeriche in oggetto è 6 – 7 volte inferiore a quella dell'acciaio delle comuni fibre metalliche ed è il contenuto in volume delle fibre a regolare la risposta strutturale del materiale composito e non il quantitativo in peso delle fibre inserite.

Una parziale sostituzione della quota di legante cementizio con prodotti secondari come ad esempio cenere volante o loppe d'altoforno possono ridurre i costi del composito ECC anche se il cambiamento delle proprietà della matrice e di interfaccia comporterà maggiori attenzioni durante la progettazione del composito.

Si ritiene che le scelte economiche su materiali ECC dovrebbero essere valutate in base all'analisi del rapporto costi/benefici specialmente considerando quanto riportato nei paragrafi precedenti.

Si deve inoltre tenere presente che il costo per il ciclo di vita di un edificio non è solamente costituito dal costo dei materiali da costruzione impiegati ma anche dai costi di manodopera e di manutenzione. La possibilità di ridurre o eliminare la presenza delle armature a taglio nelle travature in calcestruzzo armato, oltre che ridurre i costi dovuti all'impiego di una minore quantità di materiale ridurrebbe anche le ore necessarie per la messa in opera, accelerando di conseguenza il processo di costruzione. Le ottime caratteristiche di durabilità del composito ECC trasferite alla struttura limiterebbe inoltre al minimo i costi di mantenimento in servizio dell'opera.



2.6. LA RETE TECNOLOGICA ECC

ECC è un materiale composito relativamente nuovo nato in laboratorio e diretto all'impiego in prefabbricazione e in cantiere. Il materiale è in continua evoluzione per merito della continua ricerca che sta oltremodo trovando nuove applicazioni del prodotto. La necessità di scambiare informazioni tra il mondo industriale quello accademico ha indotto gli addetti ai lavori a realizzare la *ECC Technology Network* a partire dal 2001.

ECC Technology Network è un organizzazione informale costituita da membri che sono interessati a sviluppare e promuovere prodotti ECC. Il sito web www.engineeredcomposites.com costituisce una base internazionale per la condivisione di novità, conoscenze e applicazioni tecnologiche riguardanti ECC.

3

PROVE DI LABORATORIO

La campagna sperimentale di seguito descritta è stata svolta nell'ambito del dottorato di ricerca con l'ausilio delle macchine e degli strumenti messi a disposizione dalla società Vortex Hydra srl. A supporto di tale sperimentazione sono stati inoltre impiegati strumenti di calcolo e macchine di prova del laboratorio di resistenza dei materiali della facoltà di Ingegneria di Ferrara.

La parte più significativa delle prove di laboratorio è stata svolta nel corso degli anni 2009 e 2010 ed è documentata in due pubblicazioni [2] e [2]. Dopo queste due prime due fasi, la ricerca è stata dedicata allo sviluppo del prodotto industriale.

Scopo del primo anno di studi è stato quello di individuare la tipologia più adatta di microfibre dal punto di vista della composizione chimica, della dimensione e della quantità in frazione di volume sulla miscela impiegata.

La produzione industriale oggetto della ricerca è basata su di un processo di estrusione che impone valori del rapporto sabbia/cemento (di seguito s/c) di alcune volte superiori a quelli comunemente riportati nella letteratura tecnica per gli *Engineered Cementitious Composites* [9] – [18], inoltre la dimensione massima degli inerti varia da 0.3–0.4 mm nelle pubblicazioni citate e fino a 3 mm nelle malte utilizzate nella produzione industriale. Si è tuttavia cercato, mediante la sperimentazione, di realizzare un comportamento analogo a quello della malte ECC ovvero un comportamento di tipo *Strain Hardening* sufficientemente duttile.

Obiettivo principale di questa prima fase della ricerca è valutare il miglior compromesso in termini di proporzionamento dei componenti la miscela e tipologia di fibre di rinforzo per realizzare con processi industrializzati questo tipo di elementi non strutturali fibrorinforzati.

A seguito delle prove preliminari, una volta definito il comportamento dei diversi campioni testati, si sono eseguite ulteriori prove mirate ad una gamma ristretta di miscele e combinazioni di materiali al fine di elaborare un modello matematico utile

alla rappresentazione del comportamento a rottura degli elementi sottoposti a flessione.

L'estesa campagna prove preliminare [2] ha reso di fatto possibile la valutazione delle miscele, fibrorinforzate con fibre polimeriche in grado di fornire le migliori prestazioni nella realizzazione di prodotti estrusi tramite processi di tipo industriale. La campagna di prove viene completata, in questa seconda fase, con ulteriori prove di flessione e con prove di compressione e trazione diretta. Nello svolgimento delle stesse, ove possibile, si è fatto riferimento alle normative esistenti [19] – [22].

Scopo ulteriore della ricerca, come descritto nel capitolo successivo, è inoltre verificare se l'approccio proposto dalla CNR DT 204 proposta per calcestruzzi fibrorinforzati con fibre metalliche e gettati in opera, è ancora utilizzabile per elementi ottenuti mediante processi industriali e rinforzati con fibre polimeriche.

A tal fine i modelli semplificati proposti nella letteratura tecnica vengono utilizzati per simulare i risultati della prova di flessione e risultano dare indicazioni attendibili sul comportamento di manufatti allo Stato Limite Ultimo.

Il processo di estrusione è già stato trattato nella letteratura più recente in concomitanza con lo sviluppo di materiali ECC ad alte prestazioni [15]–[17], tuttavia in questo lavoro si studia la possibilità di ottenere materiali fibrorinforzati ad alte prestazioni, tramite un processo industriale. Il principale vantaggio dato dall'utilizzo di questo tipo di materiali può venire dal miglioramento delle proprietà meccaniche e della duttilità dei manufatti e dalla tenacità conferita dalle fibre; ciò potrebbe consentire la sostituzione delle armature lente, talvolta presenti nei processi di *casting*, sempre salvaguardando l'alta produttività dei sistemi ad estrusione continua che consente di abbattere i costi di produzione.

L'introduzione di fibre polimeriche nella matrice di malta a base cementizia induce una drastica perdita di lavorabilità dell'impasto fresco. L'impiego di superfluidificanti, in dosi che talvolta superano l'1%, ha tuttavia permesso di controllare la lavorabilità dell'impasto durante le operazioni di mescolazione e di estrusione. Ciò consente di ottenere un buon compromesso tra la fluidità dell'impasto, necessaria per una dispersione omogenea delle fibre, e una buona capacità di presentare deformazioni irreversibili (plastiche) necessarie a ridurre il rigonfiamento all'uscita dal rullo estrusore e quindi a preservare la forma del manufatto.

3.1. IL PROCESSO DI ESTRUSIONE

Il processo industriale utilizzato per la realizzazione di tegole e piastre (e prodotti simili) viene comunemente denominato di estrusione, tuttavia non può essere a tutti gli effetti considerato un processo di estrusione in senso stretto, in quanto il prodotto finale non è ottenuto per effetto del passaggio dell'impasto in pressione attraverso una sezione definita, ma giace in una tramoggia e viene richiamato dalla rotazione di un rullo in grado di comprimerlo su di un basamento scorrevole. Il processo termina con la fase di presa e maturazione forzata al di sopra del basamento che gli conferisce la forma idonea al tipo di impiego (tegola ondulata o piana). La parte superiore del prodotto estruso acquisisce una forma avente sezione indotta da quella del rullo rotante il quale può essere caratterizzato da una sezione ondulata per la produzione di tegole sagomate (Figura 3.1 e) oppure da una sezione costante per la produzione di tegole piane o lastre (Figura 3.3).



Figura 3.1 – Estrusore con cilindro conformato per la realizzazione di tegole ondulate – particolare della testata di estrusione

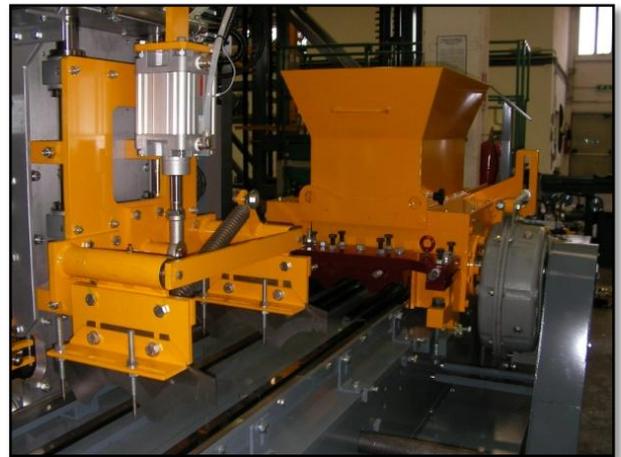


Figura 3.1 – Estrusore di tegole ondulate – particolare dei coltelli per il taglio trasversale

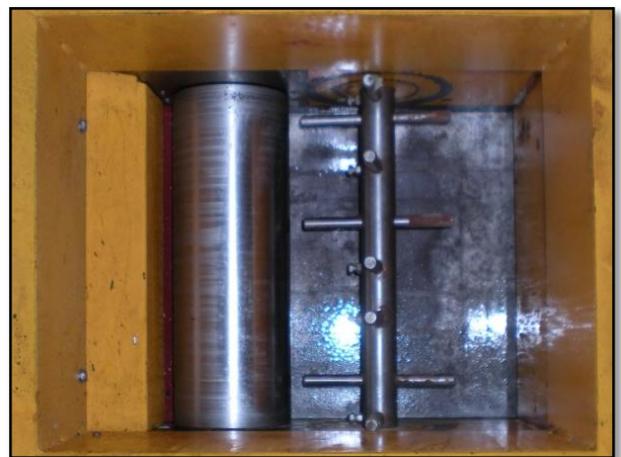


Figura 3.2 – Estrusore con cilindro conformato per la realizzazione di lastre piane – particolare della testata di estrusione



Figura 3.3 – Estrusore con cilindro conformato per la realizzazione di lastre piane – particolare dei coltelli per il taglio trasversale e della tramoggia di carico

I prodotti ottenuti tramite questo procedimento possiedono una superficie di estradosso omogenea mentre all'intradosso possono essere ottenute nervature e ringrossi mediante scanalature impresse nello stampo scorrevole. È pertanto possibile estrarre tegole ondulate (Figura 3.4 - a), tegole piane e lastre piane (Figura 3.4 - b) nel caso particolare in cui lo stampo scorrevole sia una sagoma rettangolare senza nervature.

Il principale vantaggio rispetto ai sistemi industriali per stampaggio è l'alta produttività. È possibile raggiungere infatti produzioni fino a 140 pezzi/minuto mediamente delle dimensioni in pianta di 300x400 mm con spessore variabile tra gli 8 mm e i 30 mm.

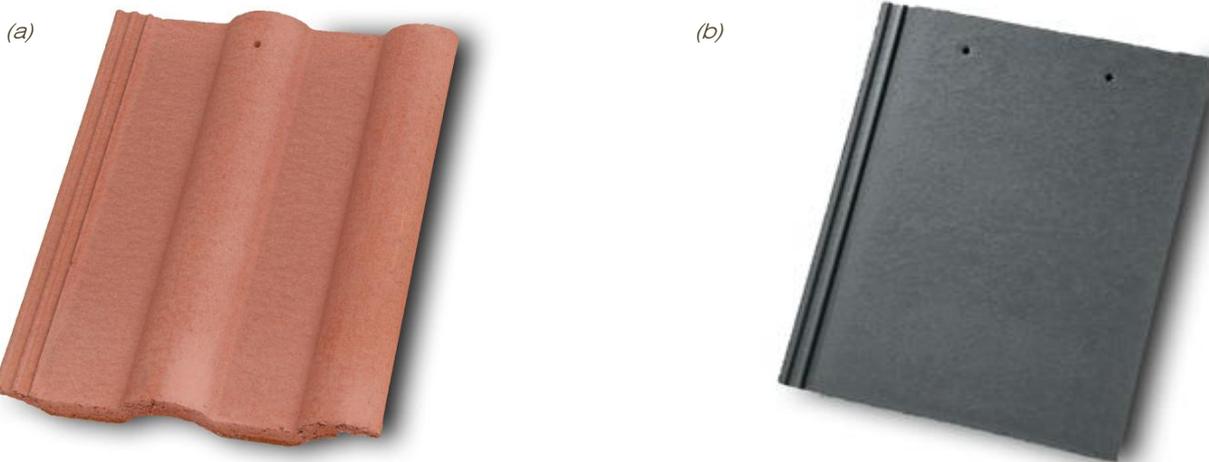


Figura 3.4 – Esempio di tegola in calcestruzzo ondulata profilata a Doppia Romana (a) ed esempio di tegola piana in calcestruzzo del tipo Self Stacking (b)

Le miscele impiegate negli impasti oltre ad essere in grado di conferire al prodotto l'adeguata resistenza meccanica [23] e [24] devono anche verificare esigenze di estetica (per la vendibilità del prodotto), di sostenibilità dei costi e di lavorabilità per la buona riuscita del processo automatizzato di estrusione. In genere una miscela



troppo ricca in acqua fornisce prodotti con bassa resistenza ed eccessivo ritiro (con difficoltà di distacco dello stampo scorrevole). Al contrario una miscela povera di acqua provoca una scarsa lavorabilità, superfici di finitura irregolari e, se in percentuale veramente bassa, potrebbe venire a mancare l'acqua necessaria alle reazioni di presa e indurimento del cemento.

L'esperienza industriale mostra come un compromesso accettabile, dal punto di vista della lavorabilità, si ottenga con valori del rapporto sabbia/cemento variabili tra 2.5 e 3.5, valori del rapporto acqua/cemento variabili tra 0.35 e 0.41 (calcolati sulla condizione di inerte saturo a superficie asciutta [29] e [30]), anche senza impiego di additivi superfluidificanti.

La mescolazione degli ingredienti è una fase cruciale del processo industriale. L'evoluzione delle tecniche di estrusione che consente la produzione giornaliera di decine di migliaia di pezzi ha reso necessario l'adeguamento dei sistemi di mescolazione. Tradizionalmente vengono impiegati mescolatori planetari ad asse verticale con volumi della cassa che possono superare i 1500 litri (Figura 3.5 e Figura 3.6).



Figura 3.5 – Mescolatore planetario di 250 lt (a), planetario e pale del rotore all'interno della vasca di mescolazione (b)



Figura 3.6 – Ugelli per l'introduzione dell'acqua all'interno della vasca di mescolazione

I maggiori inconvenienti tipici di questi sistemi sono dovuti al loro carattere discontinuo che non si accorda al processo di estrusione di tipo continuo, inoltre si possono avere problemi nella mescolazione delle fibre quali problemi di disomogeneità (formazione di *clusters*).

Attualmente l'evoluzione in ambito industriale è volta allo sviluppo di tecniche di mescolazione di tipo continuo (Figura 3.7 e Figura 3.8) a diretto servizio dell'estrusore aventi la possibilità di variare le portate di materiale e, di conseguenza, il tipo di miscela; infine, possibilmente, realizzare una distribuzione più omogenea delle fibre.



Figura 3.7 – Sistema di mescolazione a vite continuo (installato presso Vortex Hydra s.r.l.)

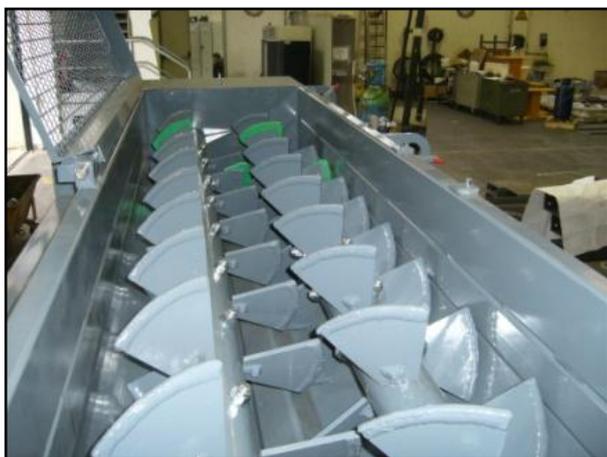


Figura 3.8 – Sistema di mescolazione a vite continuo – particolare della zona di mescolazione (installato presso Vortex Hydra s.r.l.)

La mescolazione dei componenti impiegati in questo studio è stata eseguita con sistemi di mescolazione tradizionale (Figura 3.13 e Figura 3.10) su piccola scala (cassa di volume inferiore a 100 litri) notoriamente più maneggevoli e che consentono in modo più rapido di ottenere campioni con diverse miscele variando: rapporti sabbia/cemento, acqua/cemento nonché la percentuale ed il tipo di fibra.



Figura 3.9 – Mescolatore impiegato nella sperimentazione



Figura 3.10 – Mescolatore impiegato nella sperimentazione – fase di introduzione delle fibre e omogeneizzazione

Ugualmente, l'estrusore impiegato per la sperimentazione è caratterizzato dalla produttività minima possibile. In particolare il modello a spinta alternativa utilizzato gode di una capacità produttiva pari a 5 tegole per minuto con azionamento semi automatico. Nelle sottostanti Figura 3.11 Figura 3.12 vengono mostrate: la testata di estrusione a rullo cilindrico per la produzione di piastre, una vista dell'estrusore al momento della fuoriuscita della piastra, un'immagine del modello di estrusore UNO 300 settato per la produzione di piastre piane e una vista del particolare della zona di spinta degli stampi di alluminio.



Figura 3.11 – Estrusore a spinta alternativa ed azionamento semi-automatico modello UNO 300, particolare del rullo compressore (a) e dei coltelli per l'esecuzione del taglio trasversale (b)



Figura 3.12 – Estrusore a spinta alternativa ed azionamento semi-automatico modello UNO 300, vista generale (a) e particolare della zona di spinta (b)

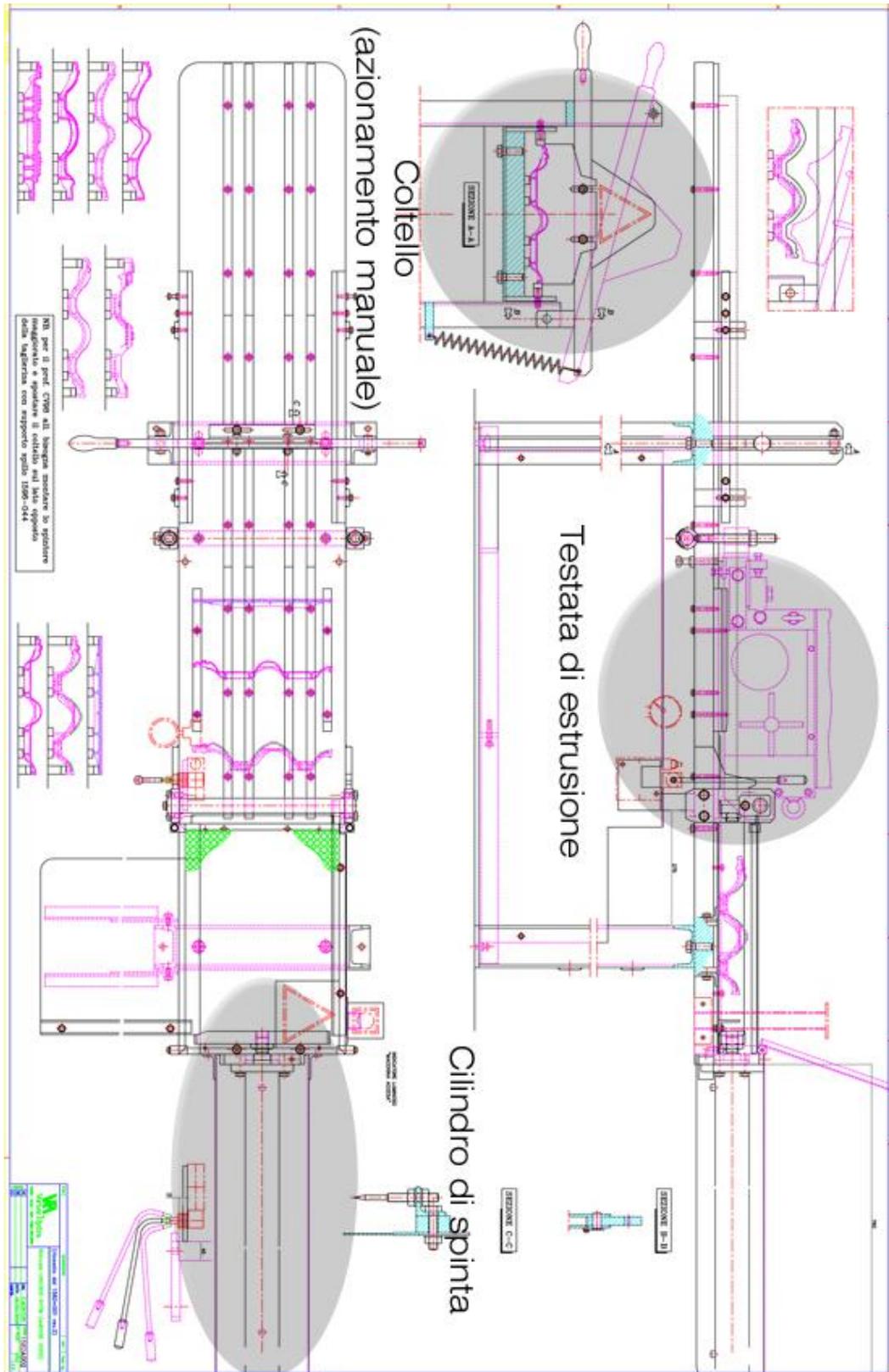


Figura 3.13 – Estrusore modello UNO 300 (per gentile concessione di Vortex Hydra s.r.l.)

3.2. MATERIALI IMPIEGATI E PREPARAZIONE DEI PROVINI

Nel seguito si espongono le caratteristiche di base dei materiali impiegati per la produzione dei manufatti estrusi. Si elencano quindi le proprietà della sabbia impiegata, le caratteristiche del cemento utilizzato e le tipologie di fibre impiegate nel corso della ricerca. Per quanto concerne i valori di riferimento citati, ove necessario, si farà riferimento alle procedure di misurazione ed interpretazione secondo le vigenti normative [26] – [30].

Gli inerti impiegati per la realizzazione di manufatti estrusi (Sabbie Sataf s.r.l.) posseggono normalmente una distribuzione granulometrica ben assortita, al fine di ridurre la porosità della matrice; i grani hanno in genere dimensioni comprese tra gli 0.125 mm e i 4.000 mm. Una “buona granulometria” consente di raggiungere resistenze meccaniche ottimali, mentre i valori inferiore e superiore dei diametri dei grani sono definiti sulla base della più piccola dimensione della sezione estrusa. Non è di fatto possibile ottenere manufatti, o parti di essi, di dimensioni inferiori a quelle dell'inerte del diametro maggiore.

Come mostrato in Figura 3.14, la curva granulometrica impiegata per la realizzazione dei manufatti (di colore nero) si discosta notevolmente dalla distribuzione granulometrica riportata in letteratura e relativa alle malte ECC (evidenziata in rosso), che spesso vengono vagliate ad un setaccio avente un diametro di 0.3 mm.

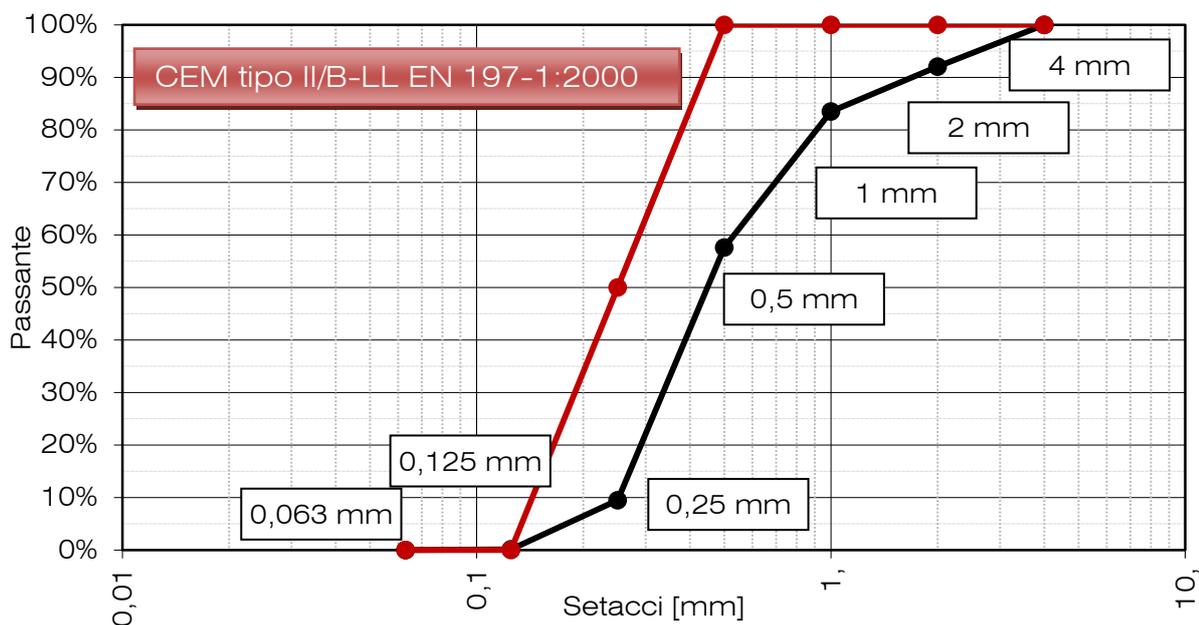


Figura 3.14 – Confronto tra la distribuzione granulometrica impiegata per la realizzazione dei manufatti e la distribuzione granulometrica generalmente impiegata per la realizzazione delle malte ECC

In Tabella 3.1 vengono riportati, in conformità con le normative vigenti, le caratteristiche degli inerti impiegati, dove:

- **w** è contenuto d'acqua espresso in percentuale sul peso di inerti essiccato in stufa;



- WA_{24} è l'assorbimento d'acqua (come percentuale della massa essiccata) dopo immersione per 24 h
- ρ_a è la massa volumica apparente dei granuli;
- ρ_{rd} è la massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa;
- ρ_{ssd} è la massa volumica dei granuli in condizioni di saturazione a superficie asciutta;

Per ridurre le incertezze in merito alla valutazione dell' acqua assorbita si è deciso di impiegare inerti a basso contenuto di umidità (inferiore allo 0,2%). Come di consueto, tutti i valori dei rapporti acqua/cemento (successivamente a/c) e sabbia/cemento (successivamente s/c) riportati nella caratterizzazione delle miscele, saranno riferiti alla condizione di inerte saturo a superficie asciutta (successivamente s.s.a.). Indicando con ciò che non si tiene conto della porzione di liquidi che andrà a saturare i grani.

Tabella 3.1 – Caratteristiche degli inerti impiegati in base alle normative vigenti

w	WA_{24}	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}
[%]	[%]	[Kg/mc]	[Kg/mc]	[Kg/mc]
0.20	1.20	2693	2598	2633

Lo studio oggetto della tesi di dottorato è basato sulle tipologie di fibre polimeriche elencate di seguito:

- microfibre di tipo polimerico polyvinylalcohol (in seguito PVA per gentile concessione di Kuraray Co., LTD Fibers and Industrial Materials Division) di cui si espone un riepilogo delle principali proprietà nella tabella sottostante (Tabella 3.2). Una serie di prove preliminari, in cui si sono considerati rapporti di forma pari a 158 (RSC15) e 30 (RF400), ha consentito di definire quello più indicato (230) in relazione alla buona qualità del prodotto estruso e alle prestazioni meccaniche ottimali;
- microfibre di tipo polimerico poliacrilonitrile (in seguito PAN per gentile concessione di LAMBDA FURTHERANCE B.V., Wingerd 178, 2496 VJ S-Gravenhage, Netherlands) di cui si espone un riepilogo delle principali proprietà in Tabella 3.2.

Il significato dei simboli in oggetto è il seguente:

- **spec. dens.**, peso per unità di volume delle fibre in oggetto;
- σ_r , tensione di rottura per trazione;
- ϵ_r , valore percentuale per la deformazione a rottura;
- L, lunghezza della fibra;
- ϕ , diametro apparente delle fibre misurato in DeciTex e millimetri;
- **asp. ratio**, rapporto d'aspetto delle fibre definito come rapporto L/ϕ .

Per ottenere una migliore omogeneità nella dispersione delle fibre e una migliore lavorabilità degli impasti si è utilizzato, in dosi variabili, il superfluidificante polycarbossilico Tecnos® *azur* PF 1000 (prodotto da Tecnochem Italiana S.p.A.).

Tabella 3.2 – Tipologia di microfibre impiegate durante la sperimentazione

Type	spec. dens	σ_r	Young's modulus	ϵ_r	L	ϕ	ϕ	asp. ratio.
-	[gr/cm ³]	[MPa]	[GPa]	[%]	[mm]	[Dtex]	[μ m]	[L/ ϕ]
PVA	1.30	1400	30	6	6	7	26	230
PAN	1.18	708	16.5	13	6.4	0.8 – 1.5	7.1 – 12.7	900 - 504

Per valutare in maniera comparativa le prestazioni delle malte fibrorinforzate ad alte prestazioni, si è fissato in via preliminare il numero dei parametri in gioco, assumendo come variabili il rapporto s/c, la quantità di fibre in termini di frazione di volume e la percentuale di superfluidificante riferita al peso di cemento. Il rapporto a/c impiegato è rimasto il medesimo per tutte le miscele e pari a 0.25 con riferimento alla condizione di inerte saturo a superficie asciutta (s.s.a).

Si è assunto il rapporto s/c variabile fra 2 e 0.5. Si ricorda che nella letteratura tecnica relativa agli ECC il rapporto s/c non supera mai l'unità e la granulometria, come precedentemente discusso, risulta completamente diversa. Le esigenze legate all'industrializzazione del processo e all'estrusione costringono dunque a definire miscele composte completamente diverse.

La campagna sperimentale atta alla valutazione del comportamento meccanico dei provini è stata divisa in due fasi:

- individuazione la tipologia più adatta di microfibre dal punto di vista della composizione chimica, della dimensione e della quantità in frazione di volume sulla miscela impiegata (Tabella 3.3 e Tabella 3.4);
- esecuzione di prove con provini strumentati e mirate ad una gamma ristretta di miscele e combinazioni di materiali al fine di elaborare un modello matematico (Tabella 3.5).

In ambedue le fasi la quantità di fibre considerata viene fatta variare fra 1% e 2% in volume, considerando inoltre come riferimento fisso la stessa miscela in assenza di fibre. Infine si è deciso di variare la percentuale in peso del superfluidificante, in modo diverso a seconda delle miscele, poiché tale addizione comporta unicamente modifiche di lavorabilità e non di proprietà meccanica. Nelle sottostanti tabelle è riportato un quadro sinottico dei mix impiegati rispettivamente per i tests su fibre in PVA e PAN nelle due fasi della sperimentazione.



Tabella 3.3 – Mix a base di fibre PVA impiegati nella prima fase della sperimentazione (2009)

mix	s/c	fibre PVA	S.P.	mix	s/c	fibre	S.P.
–	–	[%]	[%]	–	–	[%]	[%]
F09-PVA01	2.0	0	1.00	F09-PVA06	1.5	0	1.00
F09-PVA02	2.0	1.00	1.00	F09-PVA07	1.5	1.00	1.50
F09-PVA03	2.0	1.25	2.00	F09-PVA08	1.5	1.25	1.50
F09-PVA04	2.0	1.50	2.00	F09-PVA09	1.5	1.50	2.00
F09-PVA05	2.0	2.00	2.00	F09-PVA10	1.5	2.00	2.00
F09-PVA11	1.0	0	0.55	F09-PVA16	0.75	0	0.75
F09-PVA12	1.0	1.00	1.04	F09-PVA17	0.75	1.00	1.20
F09-PVA13	1.0	1.25	1.05	F09-PVA18	0.75	1.25	1.50
F09-PVA14	1.0	1.50	1.20	F09-PVA19	0.75	1.50	1.50
F09-PVA15	1.0	2.00	1.30	F09-PVA20	0.75	2.00	2.00
F09-PVA21	0.50	0	0.55				
F09-PVA22	0.50	1.00	1.04				
F09-PVA23	0.50	1.25	1.05				
F09-PVA24	0.50	1.50	1.20				
F09-PVA25	0.50	2.00	1.30				

Tabella 3.4 – Mix a base di fibre PAN impiegati nella prima fase della sperimentazione (2009)

mix	s/c	fibre PAN	S.P.	mix	s/c	fibre	S.P.
–	–	[%]	[%]	–	–	[%]	[%]
F09-PAN01	2.0	0	0,5	F09-PAN06	1.5	0	1,0
F09-PAN02	2.0	1.00	1,0	F09-PAN07	1.5	1.00	1,5
F09-PAN03	2.0	1.25	2,0	F09-PAN08	1.5	1.25	1,75
F09-PAN04	2.0	1.50	2,0	F09-PAN09	1.5	1.50	2,0
F09-PAN05	2.0	2.00	2,5	F09-PAN10	1.5	2.00	2,5
F09-PAN11	1.0	0	0,77	F09-PAN16	0.75	0	0,75
F09-PAN12	1.0	1.00	1,5	F09-PAN17	0.75	1.00	1,20
F09-PAN13	1.0	1.25	2	F09-PAN18	0.75	1.25	1,8
F09-PAN14	1.0	1.50	2	F09-PAN19	0.75	1.50	1,8
F09-PAN15	1.0	2.00	2,5	F09-PAN20	0.75	2.00	2,3
F09-PAN21	0.50	0	0,55				
F09-PAN22	0.50	1.00	1,05				
F09-PAN23	0.50	1.25	1,15				
F09-PAN24	0.50	1.50	1,38				
F09-PAN25	0.50	2.00	1,5				

Tabella 3.5 – Mix a base di fibre PVA impiegati nella seconda fase della sperimentazione (20 10)

mix	s/c	fibre	S.P.	mix	s/c	fibre	S.P.
–	–	[%]	[%]	–	–	[%]	[%]
F10-PVA11	1.0	0	0.75	F10-PVA16	0.75	0	0.75
F10-PVA14	1.0	1.50	1.50	F10-PVA19	0.75	1.50	1.50
F10-PVA15	1.0	2.00	1.50	F10-PVA20	0.75	2.00	2.00
F10-PVA21	0.50	0	0.55				
F10-PVA24	0.50	1.50	1.20				
F10-PVA25	0.50	2.00	1.30				

Le fasi di preparazione dei provini consistono principalmente nelle operazioni di proporzionamento dei materiali, nella miscelazione dei componenti e nell'estrusione della miscela ottenuta. Una volta ottenuti i provini dall'impasto fresco questi vengono riposti nella camera di stagionatura per il tempo necessario e successivamente tagliati e strumentati per l'esecuzione dei tests.

Nella mescolazione dei materiali, si è seguita la seguente sequenza:

- introduzione degli inerti e del cemento all'interno del mescolatore;
- aggiunta dell'acqua di impasto (30 sec);
- aggiunta del superfluidificante sino a livello di lavorabilità desiderato (60 sec);
- aggiunta di fibre sino ad ottenere una sufficiente omogeneizzazione dell'impasto (120 sec).

Al termine di queste fasi il composto viene introdotto nell'estrusore.



Figura 3.15 – Fase di estrusione di piastre piane



Figura 3.16 – Fase di taglio delle piastre in uscita dall'estrusore

Conclusa la fase di estrusione (Figura 3.15) e taglio (Figura 3.16), le lastre piane ottenute vengono disposte in un ambiente a temperatura costante di 20°C per un periodo di 24 ore, al termine di esso i manufatti, rimosso lo stampo scorrevole, vengono immersi in acqua a temperatura di 20°C per un periodo di 28 giorni (Figura 3.17 e Figura 3.18).



Figura 3.17 – Preparazione delle piastre all'immersione in vasca termostata

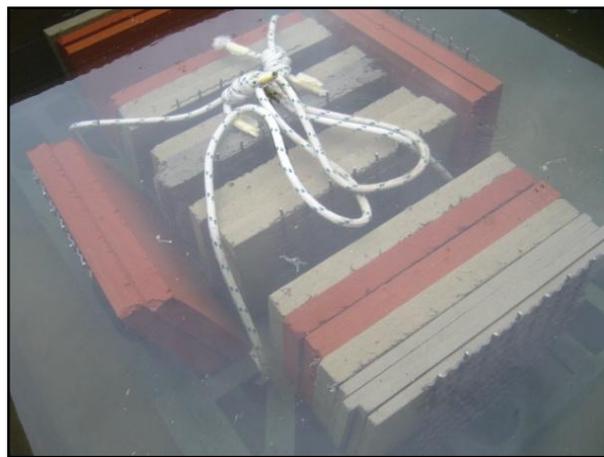


Figura 3.18 – Maturazione delle piastre in acqua a 20°C

Dopo questo periodo si è eseguito il taglio delle lastre da cui si sono ricavati i provini e 24 ore dopo si sono svolte le prove. In questo lasso di tempo i provini si sono conservati in ambiente a 20°C per favorire l'evaporazione dell'acqua trattenuta, successivamente ogni provino viene misurato, pesato e catalogato (Figura 3.20).



Figura 3.19 – Sega a disco diamantato impiegata per il taglio delle piastre e disposizione dei provini per le operazioni di pesatura e misurazione



Figura 3.20 – Catalogazione dei provini e pesatura

La campagna di prove intrapresa nei due anni di sperimentazione è stata volta alla caratterizzazione del materiale tramite prove di compressione, flessione a tre punti e tramite prove di trazione diretta.

Le prove di flessione e compressione sono state eseguite per mezzo di una pressa Zwick/Roell Allround line Z100 Material Testing Machine, situata presso il laboratorio di Vortex Hydra srl (Figura 3.21-a). Le prove di trazione diretta invece sono state eseguite per mezzo di una pressa Instron 4467 situata presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara (Figura 3.21-b).

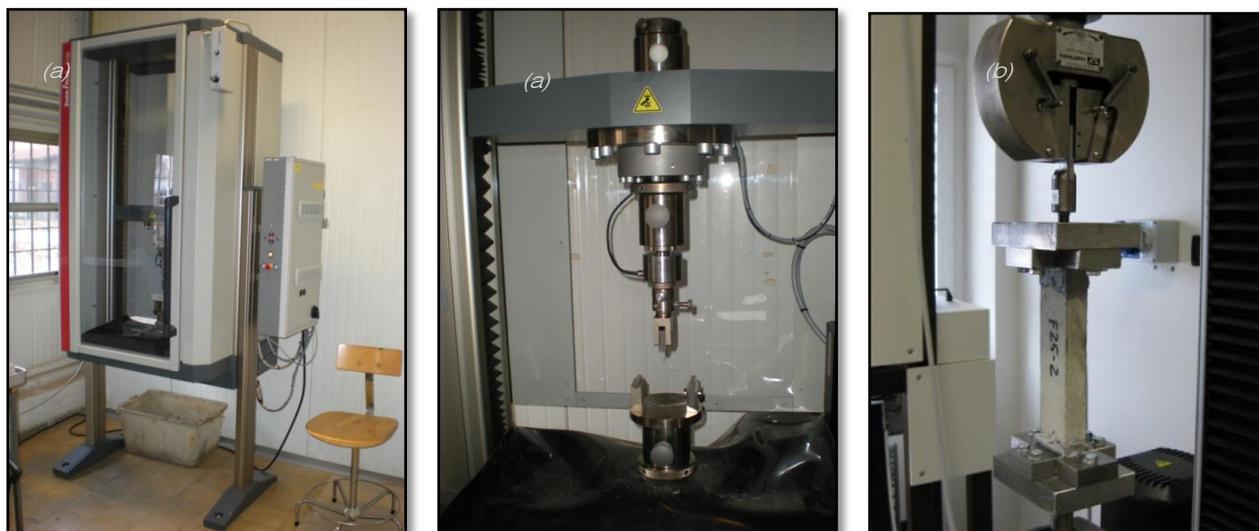


Figura 3.21 – Zwick/Roell Allround line Z100 Material Testing Machine (a) e Instron 4467 (b)

3.3. METODOLOGIA DI TEST

Come annunciato in precedenza le metodologie di test che si è scelto di eseguire per dedurre il comportamento meccanico dei provini e poterli confrontare per le diverse formulazioni di impasto sono le seguenti:

- prova di flessione a tre punti su travette con lettura dell'abbassamento del punto di applicazione del carico;
- prova di flessione a tre punti su travette con lettura dell'abbassamento del punto di applicazione del carico e dell'apertura della bocca di intaglio;
- prova di compressione diretta su prismi;
- prova di trazione diretta su prismi;

Le prove di flessione a tre punti senza lettura della bocca di intaglio (Figura 3.22) sono state eseguite in controllo di spostamento ad una velocità costante di 0.25 mm/min mantenendo una distanza tra gli appoggi di base pari a 100 mm.

Il termine della prova, durante la quale si registrano i grafici forza/spostamento, avviene o per raggiungimento dell'abbassamento massimo dell'attuatore pari a 3 mm oppure quando il valore discendente del carico raggiunge il livello di 50N, assegnato in fase di precarico.

I provini impiegati per l'esecuzione delle prove di flessione, in entrambe le fasi della sperimentazione, erano caratterizzati mediamente da una sezione trasversale pari a 20 millimetri di altezza e 40 millimetri di larghezza. La lunghezza dei provini prismatici era pari a 180 millimetri. La catalogazione dei campioni ha consentito di registrare per ognuno di essi le dimensioni della sezione trasversale per poter calcolare la tensione nominale dovuta alla sollecitazione flessionale.



Figura 3.22 – Prove di flessione a tre punti con lettura dell'abbassamento del punto di applicazione della forza

I test di flessione a tre punti sono stati effettuati in modalità di controllo di spostamento su provini prismatici di base 20x40 mm e lunghezza pari a 180 mm. La velocità di abbassamento del punto di forza era pari a 0,25 mm/min.

Le prove di flessione a tre punti eseguite con la lettura dell'apertura della bocca di intaglio (Figura 3.23 e Figura 3.24) si sono eseguite previa strumentazione dei provini con appositi trasduttori di spostamento (LVDT). Il monitoraggio dell'abbassamento del punto di forza e dell'apertura della bocca di intaglio è avvenuto tramite due trasduttori induttivi LVDT appositamente disposti per non risentire delle deformazioni dei componenti dell'apparato di spinta. In particolare per il monitoraggio dell'apertura della bocca di intaglio lo strumento è stato posizionato in corrispondenza dell'intaglio di mezzeria.

Si è inoltre cercato di uniformare il posizionamento dei sostegni del trasduttore con un accurata misurazione delle distanze su ogni campione testato.



Figura 3.23 – Prove di flessione a tre punti con lettura dell'abbassamento del punto di applicazione della forza e dell'apertura della bocca di intaglio



Figura 3.24 – Prove di flessione a tre punti con lettura dell'abbassamento del punto di applicazione della forza e dell'apertura della bocca di intaglio – zona di mezzeria del provino in cui è stato applicato il trasduttore di spostamento

I test a compressione retta (Figura 3.25 e Figura 3.26) sono stati effettuati su provini prismatici di base 20x40 mm e altezza pari a 60 mm. La prova è stata eseguita in controllo di spostamento alla velocità di 0,75 mm/min.

Il taglio dei provini ha consentito di ottenere due superfici opposte complanari per ridurre l'effetto della disomogeneità del carico. Il numero di campioni testato è pari a 9 per ogni tipologia di miscela.

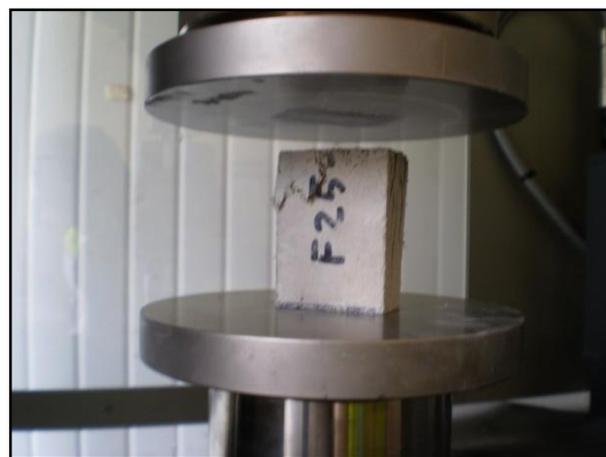


Figura 3.25 – Prove di compressione retta su prismi

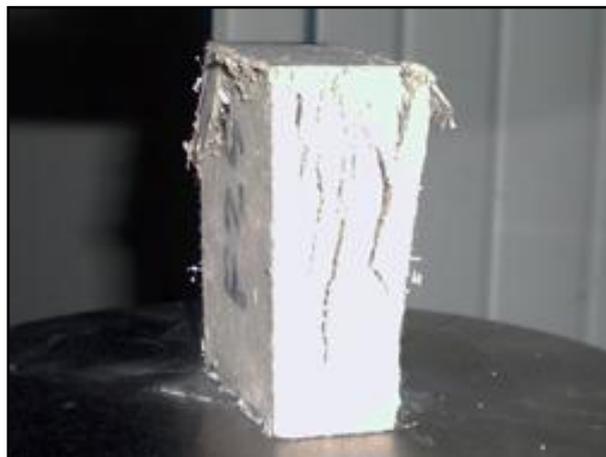


Figura 3.26 – Prove di compressione retta su prismi – particolare del provino al termine del test

I test a trazione diretta (Figura 3.28) sono stati effettuati su provini prismatici di base 20x40mm e lunghezza pari a 180 mm. Gli attrezzi per il supporto dei provini sono stati concepiti per ridurre al minimo gli errori di complanarità tra le superfici di incollaggio del provino. In questo modo è stato possibile garantire le minime tensioni parassite dovute alle flessioni indotte dalla geometria del sistema. La prova, in controllo di spostamento, è stata condotta alla velocità costante di 0,05 mm/min. In questo tipo di test, date le ridotte dimensioni del provino, non è stato possibile disporre sulle pareti laterali gli strumenti di misura, ci si è quindi limitati a registrare gli spostamenti del punto di forza



Figura 3.27 – Prove di trazione diretta, vista generale (a) e particolare del provino fessurato al termine della prova (b)



Figura 3.28 – Prove di trazione diretta – particolare della zona di ancoraggio del provino ai supporti di acciaio

3.4. INDIVIDUAZIONE DELLA FIBRA DI RINFORZO OTTIMALE

Considerato l'importante ruolo ricoperto dalla tipologia di fibra all'interno dei materiali cementizi fibrorinforzati si è deciso di dedicare la fase iniziale delle sperimentazione alla scelta della tipologia di polimero da impiegare.

In questa fase sono stati fondamentali il supporto della letteratura e delle pubblicazioni scientifiche riguardanti i materiali cementizi rinforzati con fibre polimeriche che hanno di fatto consentito di delineare preliminarmente le dimensioni ottimali delle fibre e di limitare lo studio alle tipologie PVA e PAN.

Nelle pagine seguenti verranno esposti i grafici forza/spostamento delle prove di flessione a tre punti eseguiti in questa prima fase di sperimentazione [1] e riguardanti le miscele esposte in Tabella 3.3 e Tabella 3.4. Per ogni tipologia di miscela si sono testati n°6 provini in ognuno dei grafici esposti viene rappresentata la curva sperimentale di un campione generico, la quale si ritiene essere rappresentativa del comportamento osservato. La curva relativa alla matrice cementizia viene rappresentata in linea a tratto continuo.

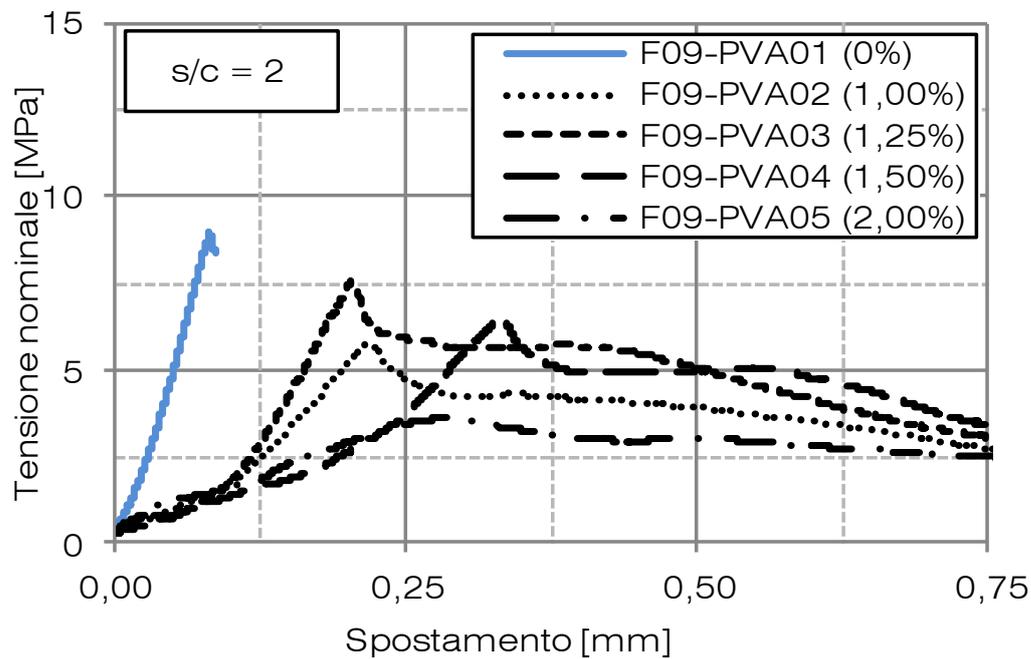


Figura 3.29 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=2$

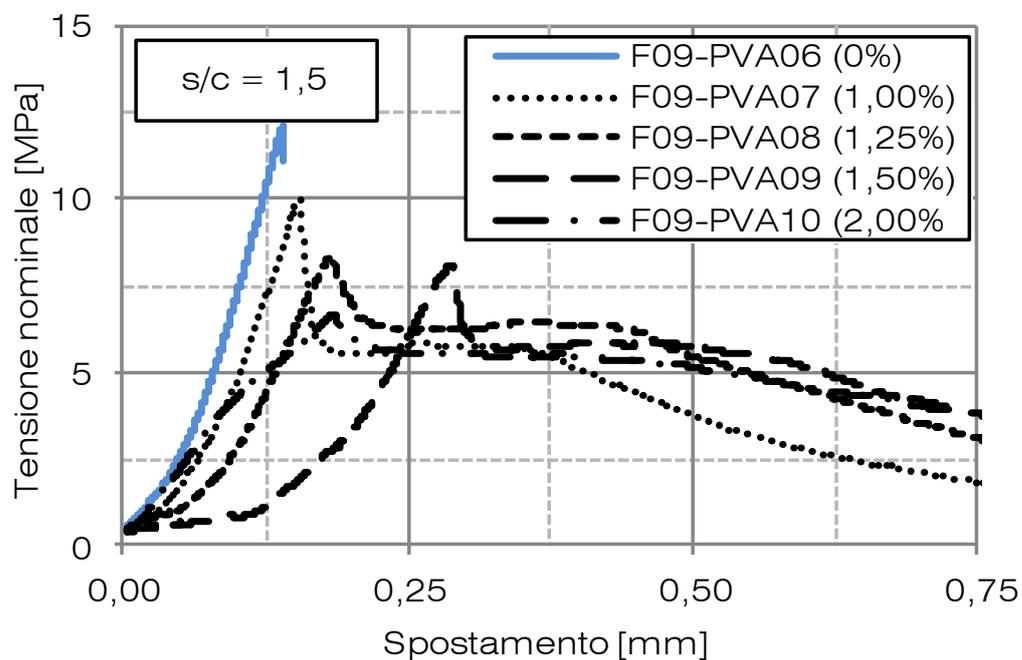


Figura 3.30 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=1.5$

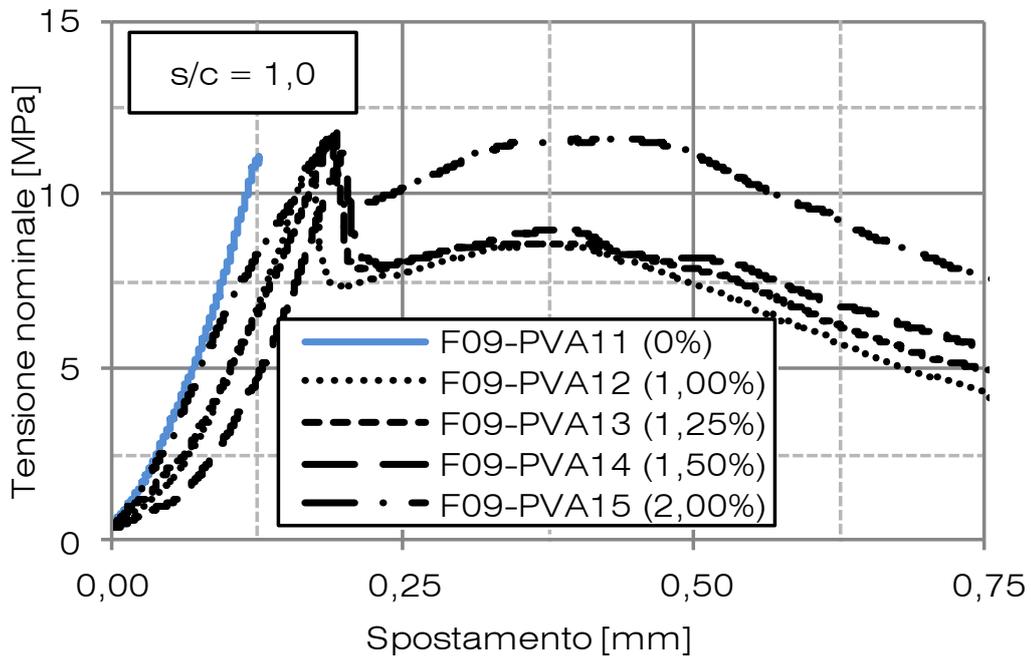


Figura 3.31 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=1$

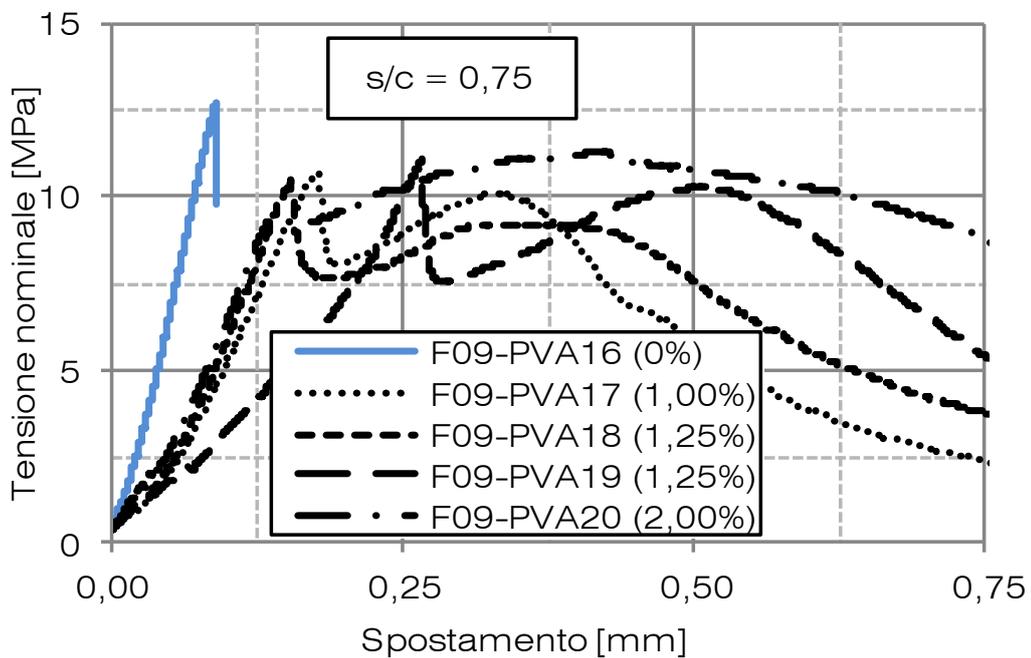


Figura 3.32 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=0,75$

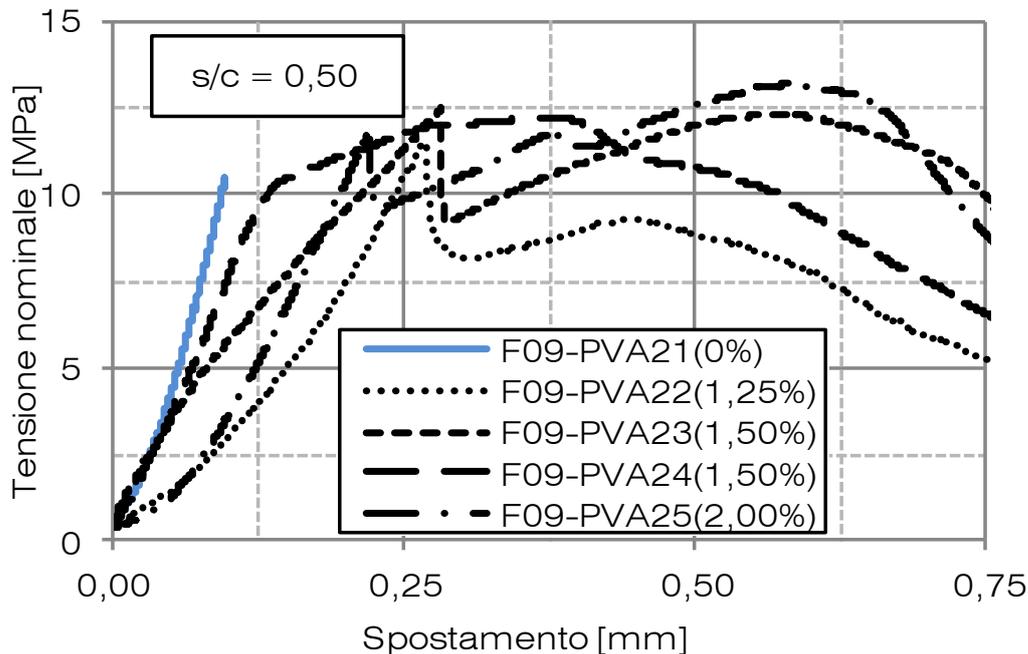


Figura 3.33 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=0.50$

Nella tabella sottostante si riportano i valori medi calcolati per ogni set di campioni testato. Si sono inoltre calcolati deviazione standard e coefficiente di variazione indicandoli rispettivamente a lato del valore medio.

I valori di tensione nominale esaminati durante i test *First Crack Strength* e *Post Peak Strength* sono indicati separatamente ed ad essi competono distinte analisi statistiche. Con *First Crack Strength* si intende il valore di tensione nominale registrato in corrispondenza della rottura di “prima fessurazione”, ossia il valore di tensione oltre il quale il provino generalmente può considerarsi fessurato. Con *Post Peak Strength* si intende invece il valore massimo di resistenza a flessione del provino. Tale valore è calcolato elasticamente assumendo deformazioni in sviluppo lineare, e può occorrere a livelli di deformazione elevati. Inoltre quest’ultimo può avere valore inferiore alla resistenza di prima fessurazione e ne si ometterà la misurazione nel caso in cui la curva non manifesti un marcato comportamento di tipo *Strain Hardening*.

L’analisi della relazione esistente tra i due valori sopraccitati consente di ricavare importanti informazioni sul comportamento dei provini, ovvero sulle prestazioni indotte dalle fibre di rinforzo al materiale.



Tabella 3.6 – Mix a base di fibre PVA impiegati nella prima fase della sperimentazione (2009) – Riassunto ed analisi statistica dei valori di tensione nominale registrati durante i test di flessione a tre punti

mix	s/c	Fibre [%]	First Crack Strength			Post Peak Strength		
			Mean n = 6 [MPa]	dev. Std. [MPa]	coeff. Var. [%]	Mean n = 6 [MPa]	dev. Std. [MPa]	coeff. Var. [%]
F09-PVA01	2,00	0,00%	9,12	0,85	9,3%	-	-	-
F09-PVA02		1,00%	5,76	0,26	4,6%	3,89	0,76	19,5%
F09-PVA03		1,25%	7,23	0,57	7,8%	5,34	0,47	8,8%
F09-PVA04		1,50%	6,00	0,45	7,5%	4,66	1,05	22,5%
F09-PVA05		2,00%	3,48	0,24	6,9%	2,90	0,34	11,6%
F09-PVA06	1,50	0,00%	12,01	0,65	5,5%	-	-	-
F09-PVA07		1,00%	10,58	0,54	5,1%	6,96	1,09	15,6%
F09-PVA08		1,25%	8,11	1,37	16,9%	6,25	1,08	17,2%
F09-PVA09		1,50%	7,84	0,77	9,8%	6,63	1,46	22,0%
F09-PVA10		2,00%	6,11	0,76	12,4%	4,77	0,53	11,2%
F09-PVA11	1,00	0,00%	11,41	0,34	3,0%	-	-	-
F09-PVA12		1,00%	11,85	0,81	6,8%	7,91	0,53	6,7%
F09-PVA13		1,25%	11,18	0,76	6,8%	8,96	1,21	13,5%
F09-PVA14		1,50%	11,56	0,95	8,2%	9,43	0,60	6,4%
F09-PVA15		2,00%	10,73	0,71	6,6%	10,48	1,05	10,0%
F09-PVA16	0,75	0,00%	12,87	0,57	4,4%	-	-	-
F09-PVA17		1,00%	11,00	1,93	17,6%	9,13	1,45	15,9%
F09-PVA18		1,25%	10,39	0,88	8,5%	9,11	0,76	8,4%
F09-PVA19		1,50%	10,98	1,53	14,0%	9,43	1,04	11,0%
F09-PVA20		2,00%	9,61	0,64	6,6%	10,60	1,10	10,4%
F09-PVA21	0,50	0,00%	10,44	0,77	7,4%	-	-	-
F09-PVA22		1,00%	11,93	1,09	9,1%	9,28	1,07	11,5%
F09-PVA23		1,25%	11,17	1,17	10,5%	10,45	2,10	20,1%
F09-PVA24		1,50%	11,09	0,84	7,6%	12,58	0,57	4,5%
F09-PVA25		2,00%	10,57	0,92	8,7%	13,33	0,99	7,4%

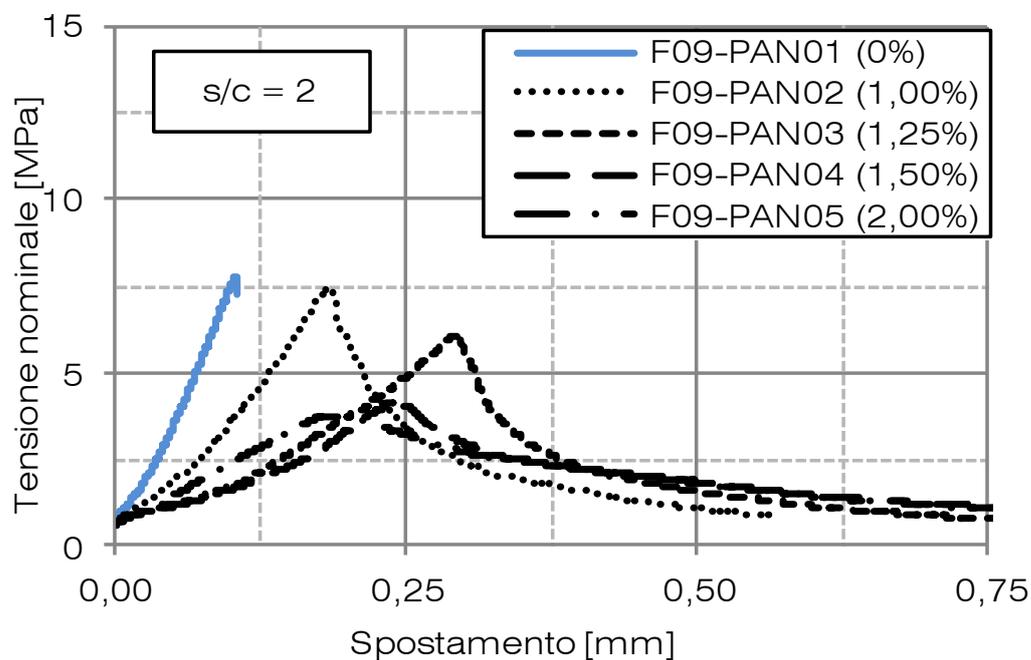


Figura 3.34 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=2$

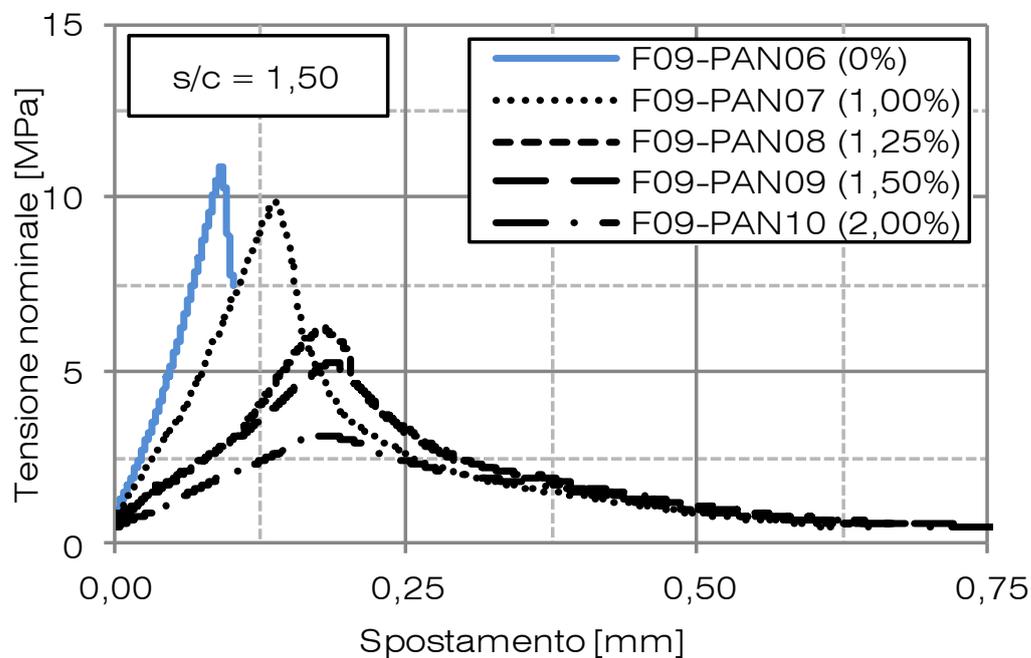


Figura 3.35 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=1.5$

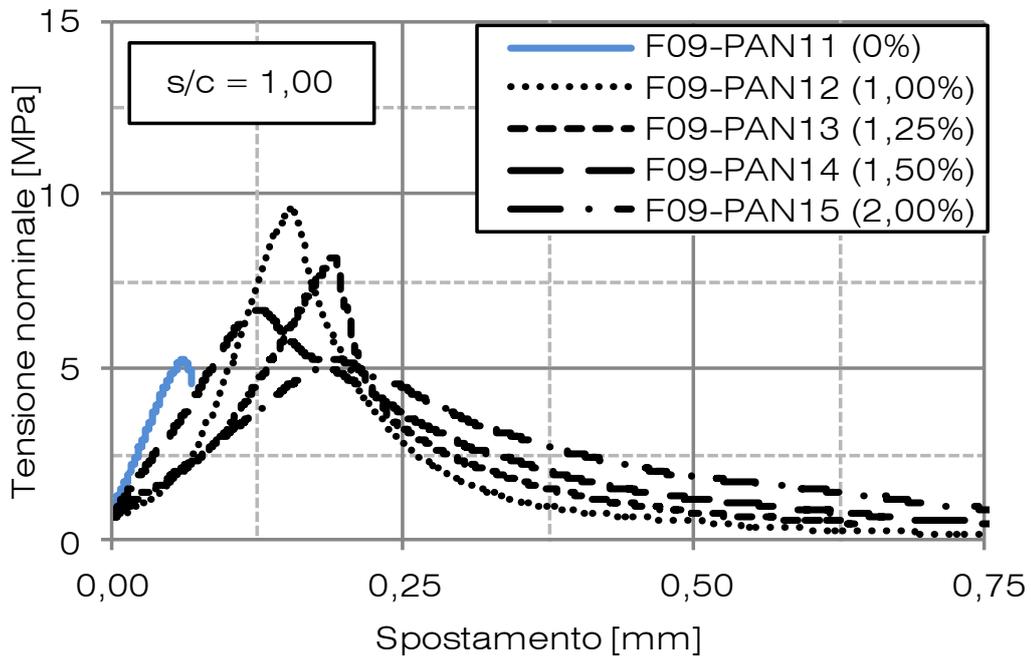


Figura 3.36 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=1,00$

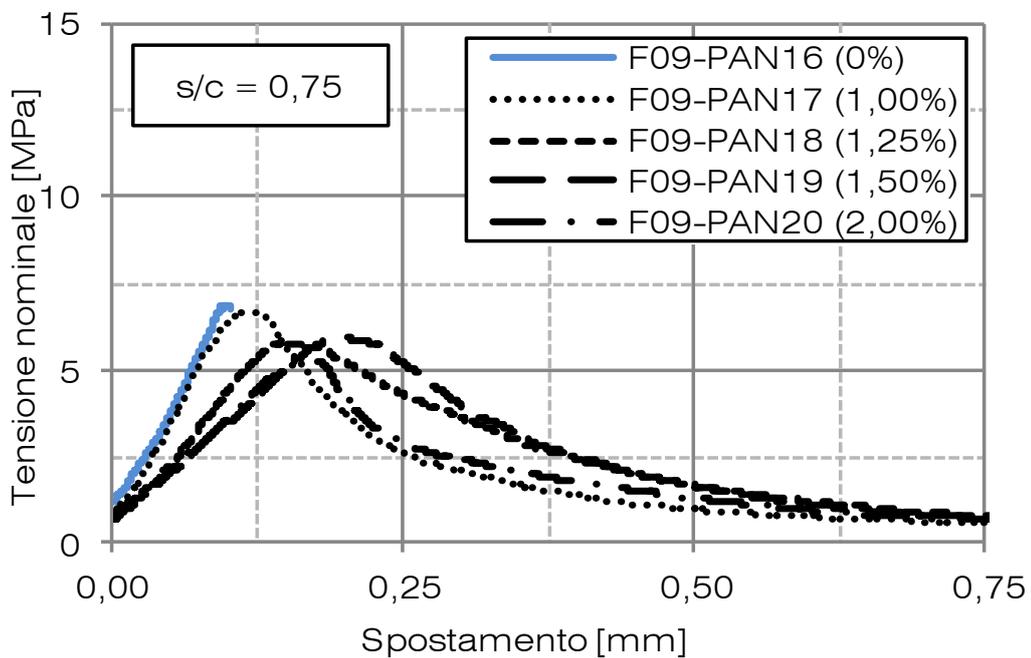


Figura 3.37 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=0,75$

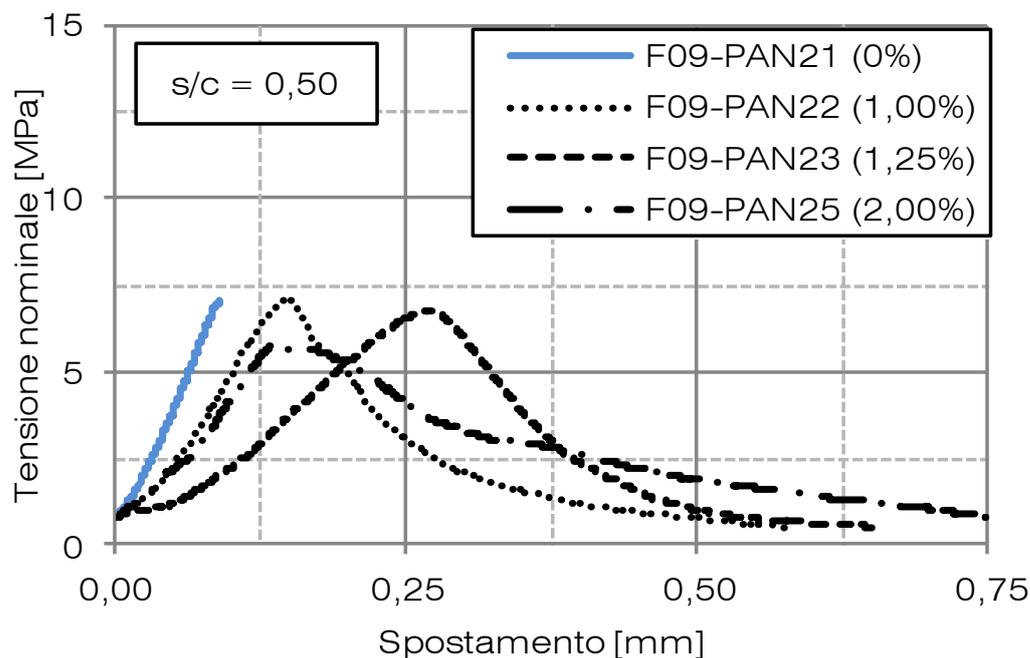


Figura 3.38 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=0.50$

Nella tabella sottostante si riportano i valori medi calcolati per ogni set di campioni testato. Si sono inoltre calcolati deviazione standard e coefficiente di variazione indicandoli rispettivamente a lato del valore medio.

I valori di tensione nominale che è stato possibile esaminare durante i test corrispondono solo al *First Crack Strength*. Con *First Crack Strength* si intende il valore di tensione nominale registrato in corrispondenza della rottura di “prima fessurazione”, ossia il valore di tensione oltre il quale il provino generalmente può considerarsi fessurato. Nel caso di provini realizzati con fibre di tipo PAN non si è di fatti osservato un marcato comportamento *Strain Hardening* che avrebbe consentito di rilevare valori di tensione nominale relativi al *Post Peak Strength*.



Tabella 3.7 – Mix a base di fibre PAN impiegati nella prima fase della sperimentazione (2009) – Riassunto ed analisi statistica dei valori di tensione nominale registrati durante i test di flessione a tre punti

mix	s/c	Fibre [%]	First Crack Strength			Post Peak Strength		
			Mean n = 6 [MPa]	dev. Std. [MPa]	coeff. Var. [%]	Mean n = 6 [MPa]	dev. Std. [MPa]	coeff. Var. [%]
F09-PAN01	2,00	0,00%	7,13	0,53	7,5%	-	-	-
F09-PAN02		1,00%	6,94	0,55	8,0%	-	-	-
F09-PAN03		1,25%	5,70	0,57	10,0%	-	-	-
F09-PAN04		1,50%	4,14	0,40	9,7%	-	-	-
F09-PAN05		2,00%	3,49	0,33	9,4%	-	-	-
F09-PAN06	1,50	0,00%	10,53	0,54	5,2%	-	-	-
F09-PAN07		1,00%	9,36	0,65	6,9%	-	-	-
F09-PAN08		1,25%	6,33	0,17	2,8%	-	-	-
F09-PAN09		1,50%	5,20	0,67	12,8%	-	-	-
F09-PAN10		2,00%	3,40	0,27	8,1%	-	-	-
F09-PAN11	1,00	0,00%	5,92	0,77	13,0%	-	-	-
F09-PAN12		1,00%	9,21	0,52	5,6%	-	-	-
F09-PAN13		1,25%	7,66	0,68	8,9%	-	-	-
F09-PAN14		1,50%	6,11	0,51	8,4%	-	-	-
F09-PAN15		2,00%	4,95	0,58	11,6%	-	-	-
F09-PAN16	0,75	0,00%	7,46	0,67	9,0%	-	-	-
F09-PAN17		1,00%	6,31	0,46	7,4%	-	-	-
F09-PAN18		1,25%	5,90	0,45	7,6%	-	-	-
F09-PAN19		1,50%	5,56	0,64	11,5%	-	-	-
F09-PAN20		2,00%	5,44	0,35	6,4%	-	-	-
F09-PAN21	0,50	0,00%	6,68	1,20	17,9%	-	-	-
F09-PAN22		1,00%	6,85	0,33	4,9%	-	-	-
F09-PAN23		1,25%	6,83	0,80	11,7%	-	-	-
F09-PAN24		1,50%	-	-	-	-	-	-
F09-PAN25		2,00%	5,75	0,41	7,2%	-	-	-

3.4.1. OSSERVAZIONI E CONCLUSIONI

In Figura 3.39 e Figura 3.40 si riportano i grafici relativi rispettivamente all'1.5% e 2.0% di fibre in frazione di volume. Il confronto fra le curve mostra l'aumento della rigidezza flessionale del composto all'aumentare della quantità di cemento (i rapporti s/c vanno da 2.0 a 0.50). Inoltre si può osservare un diverso comportamento in zona di post-fessurazione primaria all'aumentare della quantità di cemento.

Si osserva inoltre che in corrispondenza alla frazione di volume di fibre pari al 2%, impiegando bassi valori del rapporto s/c (inferiori a 1.0), si evidenziano fenomeni di tipo *Strain Hardening*. Negli altri casi si manifesta invece, dopo l'inizio della fessurazione, una diminuzione della forza, e il manifestarsi, talvolta di un secondo picco.

L'analisi delle diverse curve permette di individuare la forza corrispondente alla prima fessurazione della matrice e l'incremento di forza indotto dalla presenza delle fibre in condizione di fessurazione avvenuta.

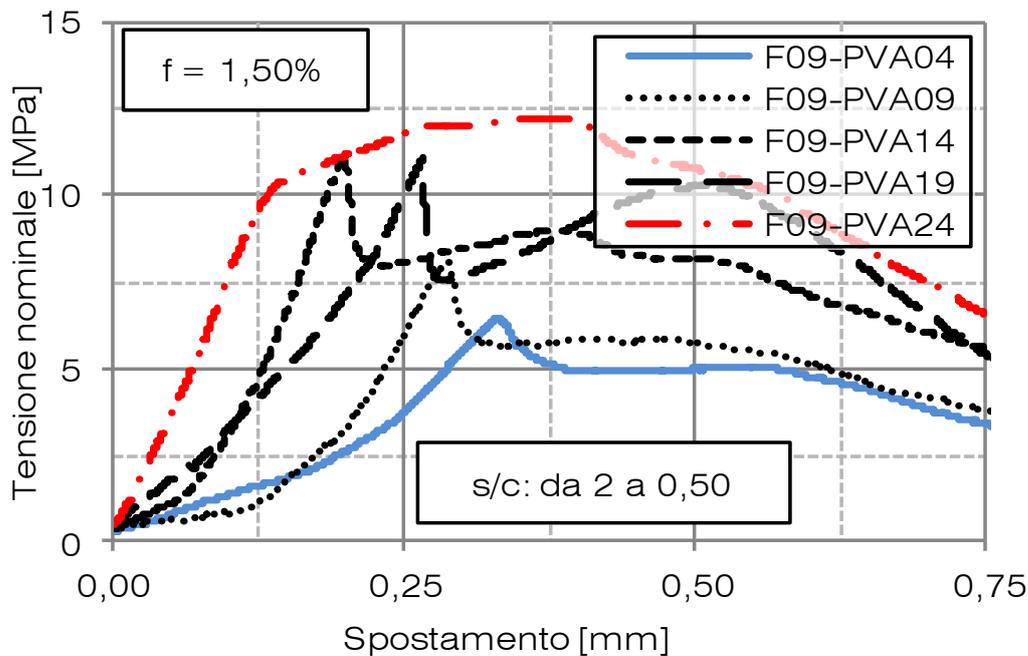


Figura 3.39 – Curve forza/spostamento al variare del rapporto s/c per i provini con quantità di fibre pari a 1.5%

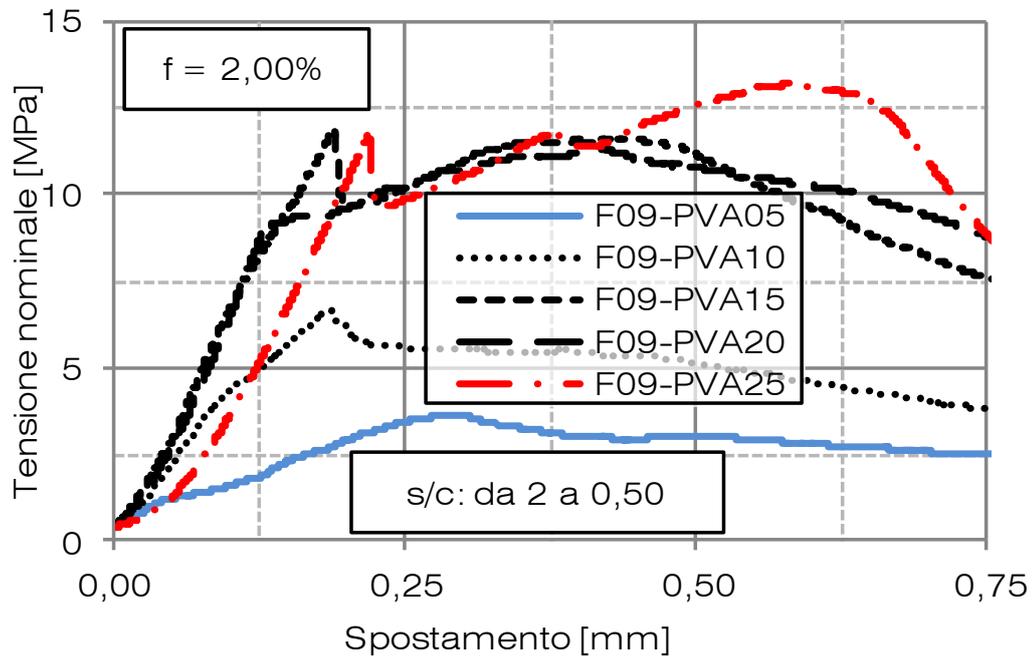


Figura 3.40 – Curve forza/spostamento al variare del rapporto s/c per i provini con quantità di fibre pari a 2.0%

In Figura 3.41, Figura 3.42 e Figura 3.43 si mostrano, per valori del rapporto s/c pari a 1.0, 0.75 e 0.50, il valore medio della forza per ognuno dei due quantitativi di fibre indagati.

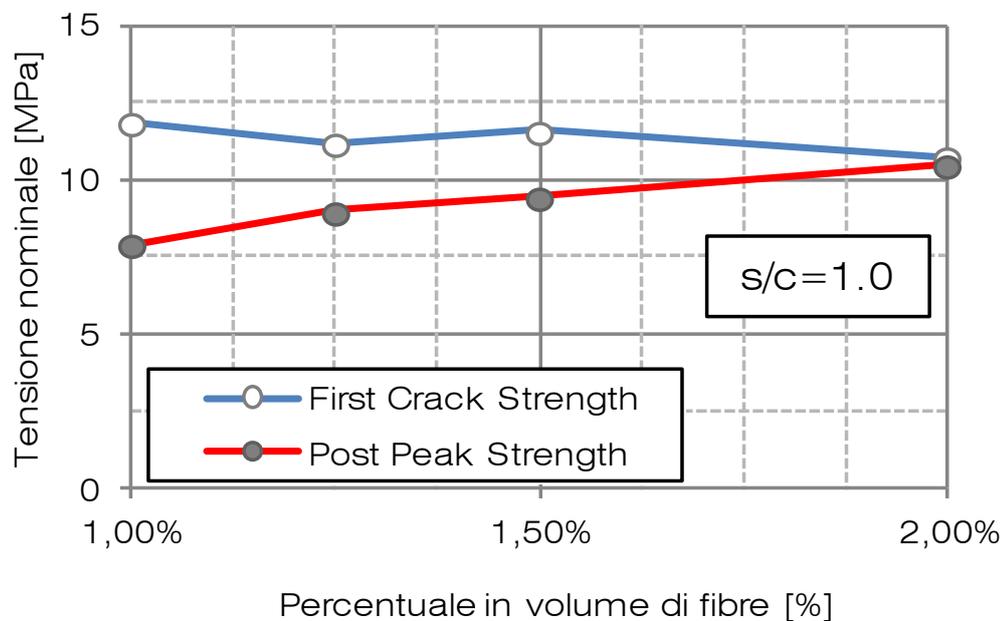


Figura 3.41 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori s/c=1.0

Le tre serie di curve, indicano l'andamento del momento resistente di prima fessurazione della sezione trasversale e del momento ultimo, all'aumentare della frazione in volume di fibre; si osservi come per il valore s/c pari a 0.50 si ottengano momenti ultimi superiori ai momenti di prima fessurazione già per una percentuale di fibre pari all'1.50%.

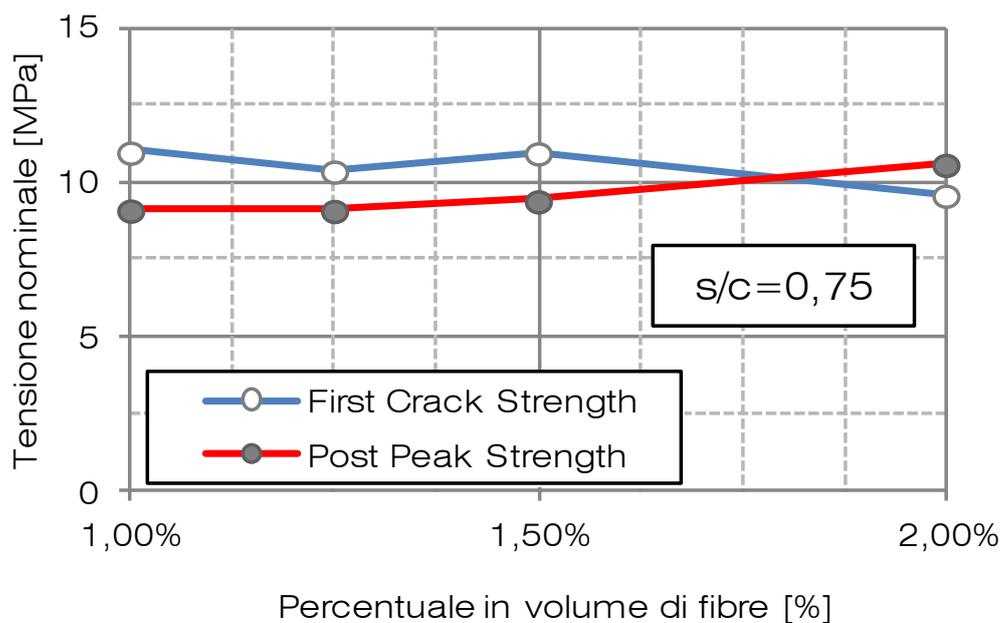


Figura 3.42 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=0.75$

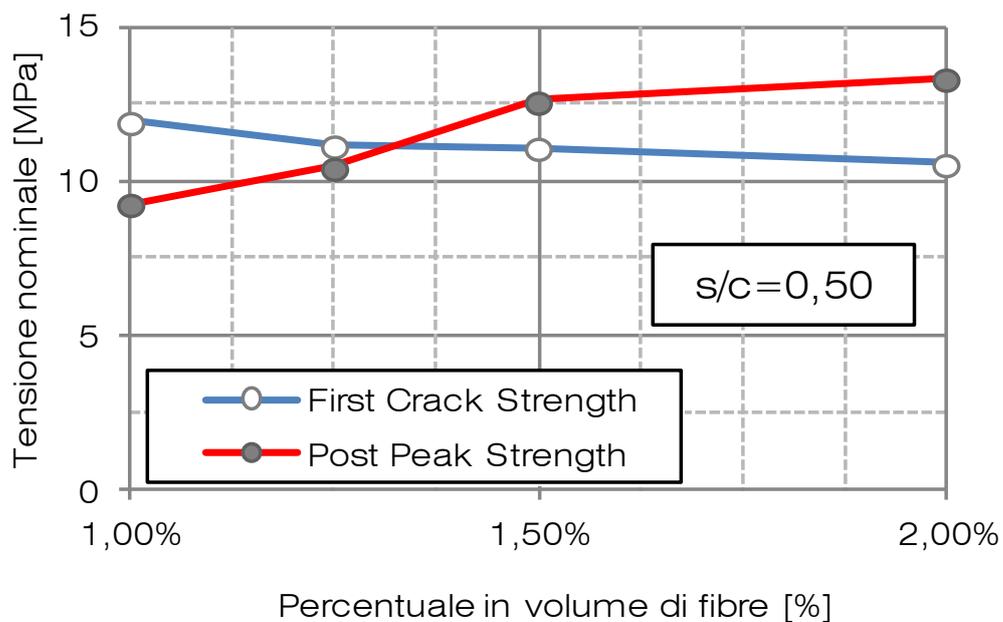


Figura 3.43 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=0.5$



In Tabella 3.6 sono riportati, per i tipi di miscele indicati, i valori medi, la devianza standard e la variazione percentuale di riferimento per le due grandezze menzionate.

In Figura 3.44 sono rappresentate le curve sperimentali per valori rispettivamente del rapporto s/c e della quantità di fibre pari a 0.75 e 2.00%, in cui sono indicati il valore medio e lo scarto quadratico medio del momento di prima fessurazione e del momento ultimo.

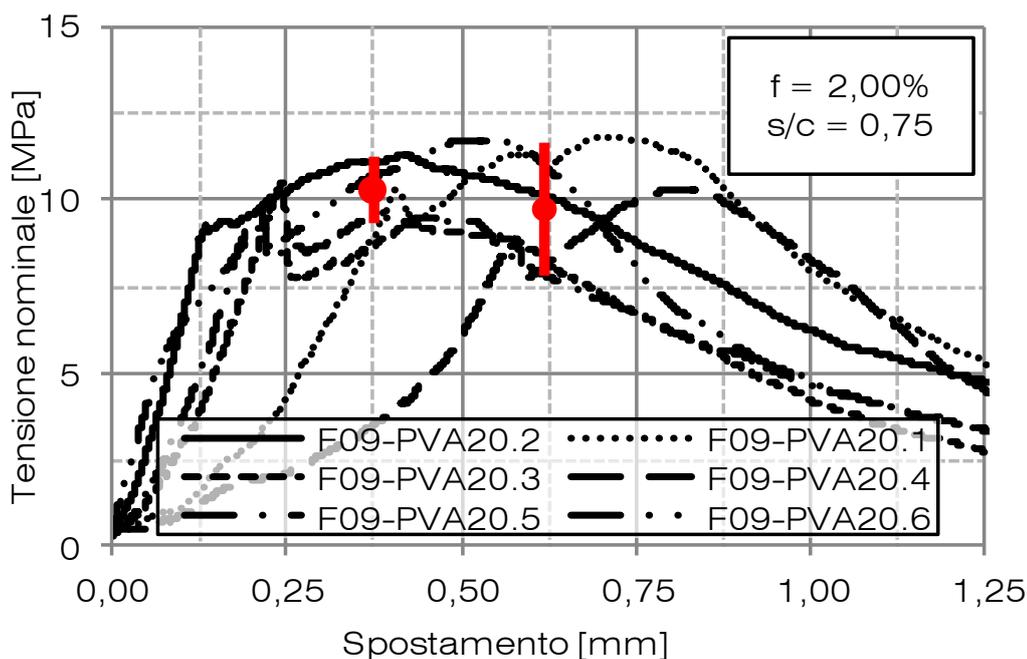


Figura 3.44 – Curve tensione nominale/spostamento per provini aventi rapporto s/c=0.75 e frazione di volume di fibre pari al 2%

Nel seguito verranno presentati i grafici tensione nominale/percentuale di fibre per i provini realizzati con fibre di tipo PAN di cui alla Tabella 3.7.

In Figura 3.45, Figura 3.46 e Figura 3.47 si mostrano, per valori rispettivamente del rapporto s/c pari a 1.00, 0.75 e 0.50, il valore medio della tensione per ognuno dei quantitativi di fibre indagati. Le tre serie di curve, indicano l'andamento del momento resistente di prima fessurazione della sezione trasversale, all'aumentare della frazione in volume di fibre.

A differenza di quanto osservato nei paragrafi precedenti (serie da F09-PVA01 a F09-PVA25 di cui ai grafici riassuntivi mostrati in Figura 3.41, Figura 3.42 e Figura 3.43), non è possibile definire un valore di resistenza a flessione in fase di post-fessurazione. L'andamento delle curve è infatti quello tipico dei materiali FRC con graduale perdita di rigidità a fessurazione avvenuta.

Il valore di resistenza massimo in fase di post-fessurazione è da considerarsi quindi coincidente con il momento resistente di prima fessurazione. Tale valore è inversamente proporzionale alla quantità di fibre, ovvero in calo all'aumentare della

percentuale in frazione di volume di rinforzo polimerico. La tendenza, inoltre, sembra essere enfatizzata dall'aumento della frazione di inerti su quella di legante.

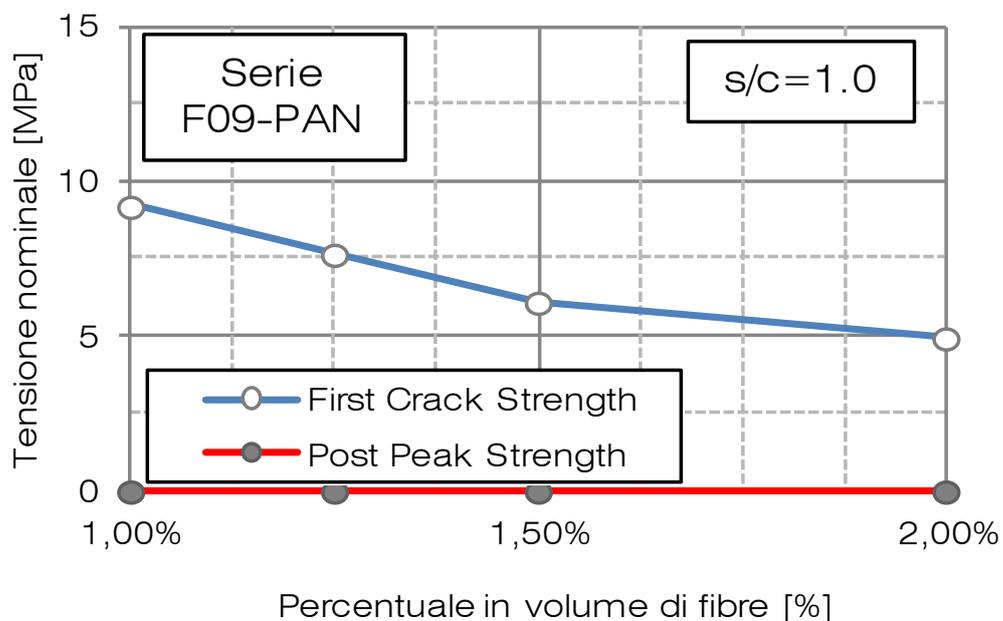


Figura 3.45 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=1.0$

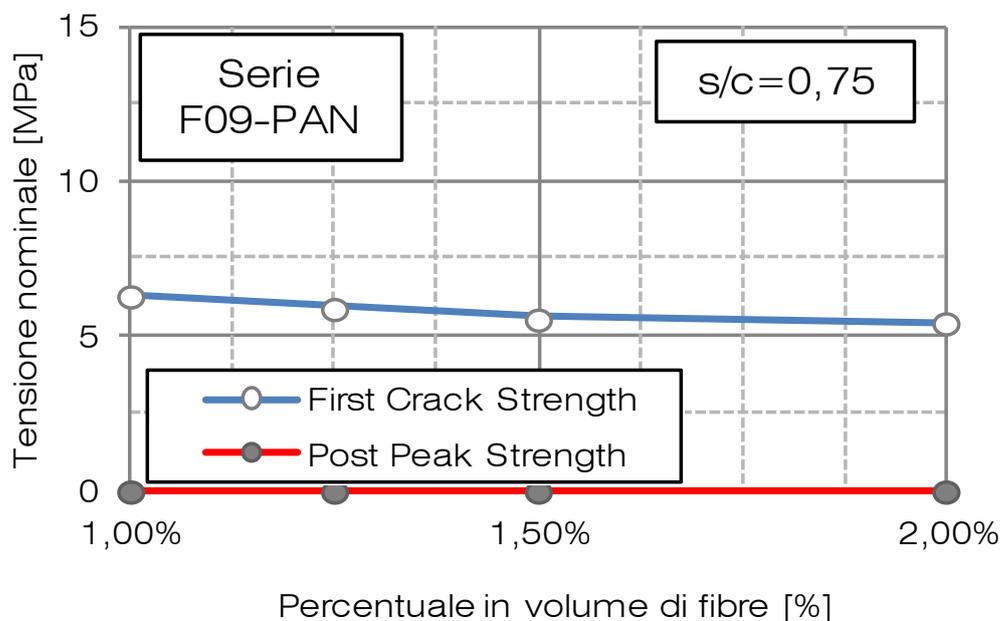


Figura 3.46 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=0.75$

In Tabella 3.7 sono riportati, per tutte le miscele realizzate, i valori medi, la devianza standard e la variazione percentuale della tensione nominale riferita al momento resistente.

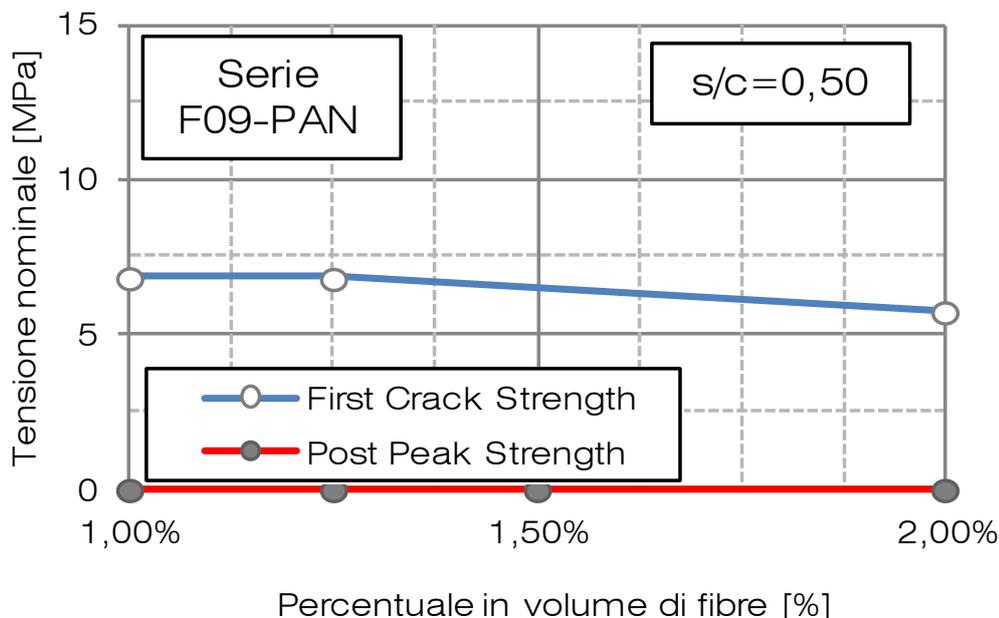


Figura 3.47 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=0.5$

La sperimentazione svolta con l'impiego di fibre PVA mostra come siano necessari bassi valori del rapporto s/c per incrementare il momento ultimo e ottenere una significativa duttilità.

Questo comportamento è meno accentuato, e talvolta non percettibile, nel caso si impieghino fibre polimeriche di tipo PAN (serie da F09-PAN01 a F09-PAN25 di cui ai grafici riassuntivi mostrati in Figura 3.45, Figura 3.46 e Figura 3.47). Questa tipologia di fibre di rinforzo, nelle quantità in frazione di volume impiegate e per i rapporti s/c che si è deciso di analizzare, al contrario di quanto accade per le fibre in PVA, riducono il momento ultimo della sezione all'aumentare della frazione in volume inserita nella matrice.

Dall'analisi delle curve evince inoltre un comportamento a flessione tipico dei materiali FRC. La caduta di rigidità flessionale, al superamento del momento resistente di prima fessurazione, è graduale e di notevole importanza già a bassi livelli di spostamento.

L'aumento della quantità di fibre, a parità di rapporto s/c , influisce negativamente sul valore del momento resistente.

Queste circostanze, in aggiunta al repentino calo della lavorabilità anche a bassi contenuti di fibre (in percentuale di volume), che implica l'impiego di elevati dosi di superfluidificante, non sono incoraggianti all'impiego di fibre PAN ai fini dell'aumento della resistenza ultima.

Studi di carattere preliminare, che dovranno essere approfonditi, hanno tuttavia dimostrato che la combinazione delle due tipologie di fibre (PVA e PAN), in percentuali variabili a seconda della matrice in esame, inducono sostanziali modifiche nel comportamento a rottura specialmente nella zona di prima fessurazione.

I test di flessione a tre punti con le fibre di tipo PVA (serie da F09-PVA01 a F09-PVA25 di cui ai grafici riassuntivi mostrati in Figura 3.41, Figura 3.42 e Figura 3.43) hanno dimostrato diversamente che per il valore s/c pari a 0.50 si possono ottenere momenti ultimi superiori ai momenti di prima fessurazione già per una percentuale di fibre pari all'1.50%.

Tuttavia, come discusso nei paragrafi precedenti, non è possibile impiegare rapporti veramente bassi di s/c per motivi tecnologici (nella letteratura citata si utilizzano rapporti s/c tipicamente inferiori a 0.50).

Per poter ottenere un'alta produttività degli impianti, e contemporaneamente una sufficiente duttilità del materiale è consigliabile utilizzare rapporti s/c compresi tra 1.0 e 0.75.

Sembra dunque possibile realizzare l'obiettivo principale della ricerca, cioè realizzare con processi industrializzati elementi fibrorinforzati, più leggeri e che non richiedono eventuali armature aggiuntive.

3.5. CAMPAGNA SPERIMENTALE

In questa seconda ed ultima parte della ricerca sperimentale [2] vengono presentati risultati unicamente relativi a microfibre di tipo polimerico polyvinylalcohol (in seguito PVA).

Nel seguito in Tabella 3.5 vengono ancora una volta riassunti i mix impiegati in questa parte della sperimentazione.

Tabella 3.5 – Mix a base di fibre PVA impiegati nella seconda fase della sperimentazione (20 10)

mix	s/c	fibre	S.P.	mix	s/c	fibre	S.P.
–	–	[%]	[%]	–	–	[%]	[%]
F10-PVA11	1.0	0	0.75	F10-PVA16	0.75	0	0.75
F10-PVA14	1.0	1.50	1.50	F10-PVA19	0.75	1.50	1.50
F10-PVA15	1.0	2.00	1.50	F10-PVA20	0.75	2.00	2.00
F10-PVA21	0.50	0	0.55				
F10-PVA24	0.50	1.50	1.20				
F10-PVA25	0.50	2.00	1.30				

Per ottenere una migliore omogeneità nella dispersione delle fibre e una migliore lavorabilità degli impasti si è utilizzato, in dosi variabili, il superfluidificante polycarbossilico Tecnos® azur PF 1000 (prodotto da Tecnochem Italiana S.p.A.).



Per valutare in maniera comparativa le prestazioni delle malte fibrorinforzate ad alte prestazioni, si è fissato in via preliminare il numero dei parametri in gioco, assumendo come variabili il rapporto s/c, la quantità di fibre in termini di frazione di volume e la percentuale di superfluidificante riferita al peso di cemento. Il rapporto a/c impiegato è rimasto il medesimo per tutte le miscele e pari a 0.25 con riferimento alla condizione di inerte saturo a superficie asciutta (s.s.a).

I rapporti s/c selezionati per effettuare le prove aggiuntive sono quelli rivelatisi più prestanti in termini di comportamento duttile in riferimento alla campagna sperimentale svoltasi in precedenza (§ 3.4 da pagina 69): 0,50 – 0,75 – 1,00. Si ricorda che nella letteratura tecnica relativa agli ECC il rapporto s/c non supera mai l'unità e la granulometria, come precedentemente discusso, risulta completamente diversa. Le esigenze legate all'industrializzazione del processo e all'estrusione costringono dunque a definire miscele composte completamente diverse.

Sulla base dei risultati ottenuti nella precedente ricerca la quantità di fibre impiegata negli impasti è stata limitata alle due percentuali 1,50% e 2,00% in volume, mentre la variazione del rapporto sabbia-cemento è stata limitata ai tre valori 1,00, 0,75 e 0,50. Infine si è deciso di variare la percentuale in peso del superfluidificante, in modo diverso a seconda delle miscele, tuttavia tale addizione comporta unicamente modifiche di lavorabilità e non di proprietà meccanica.

Nei paragrafi seguenti vengono presentati i grafici tensione nominale-spostamento dei diversi test effettuati al variare della quantità di fibre (0%, 1,5% e 2% sul volume di matrice cementizia) e del rapporto s/c in termini di peso, in Tabella 3.8 si espone un sommario delle prove effettuate e del relativo numero di campioni testato. Nelle figure sottostanti si mostrano le curve sperimentali rappresentative del comportamento osservato per ogni tipologia di miscela testata, in particolare si dispongono due curve per ognuna delle ricette testate. La curva relativa alla matrice cementizia viene rappresentata in rosso.

Tabella 3.8 – Campioni testati nelle diverse tipologie di test eseguite

tipo prova	compressione	flessione	trazione
provini testati per ogni miscela	9	3	3
totale provini testati	81	27	27

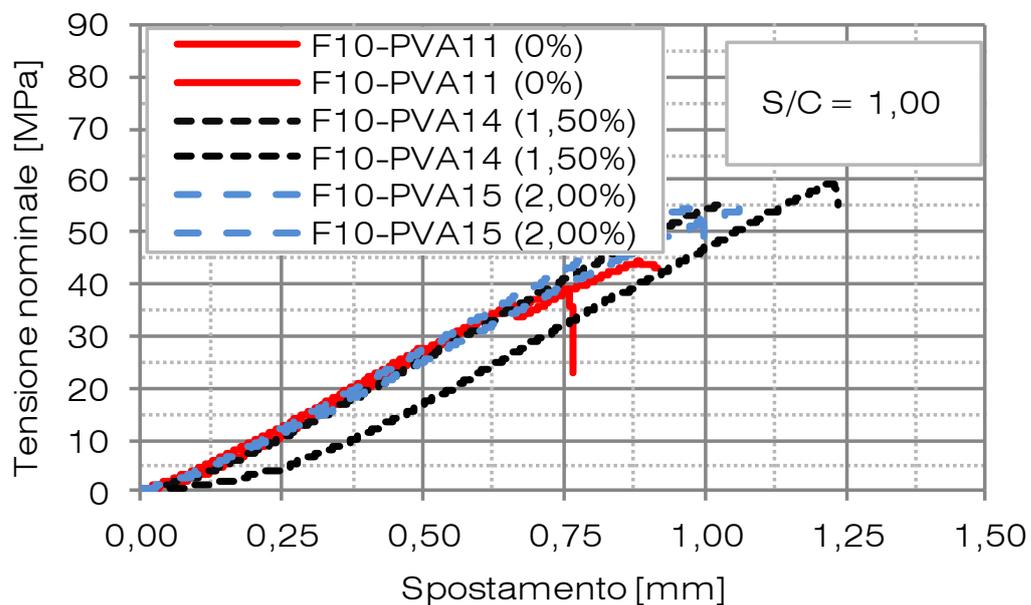


Figura 3.48 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di compressione retta per valori del rapporto $s/c=1,00$ – base di misura pari a 60 mm

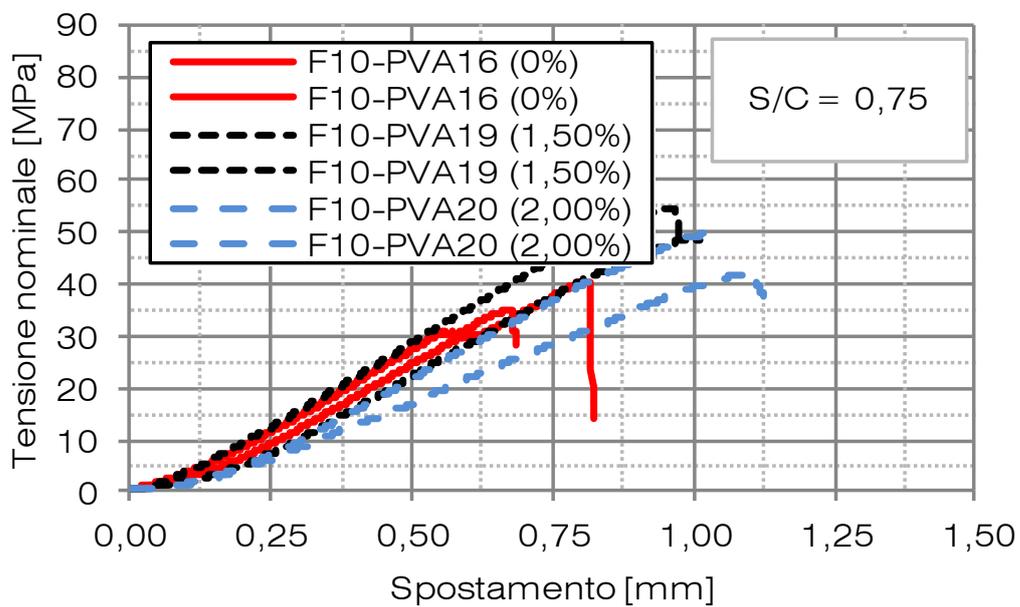


Figura 3.49 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di compressione retta per valori del rapporto $s/c=0,75$ – base di misura pari a 60 mm

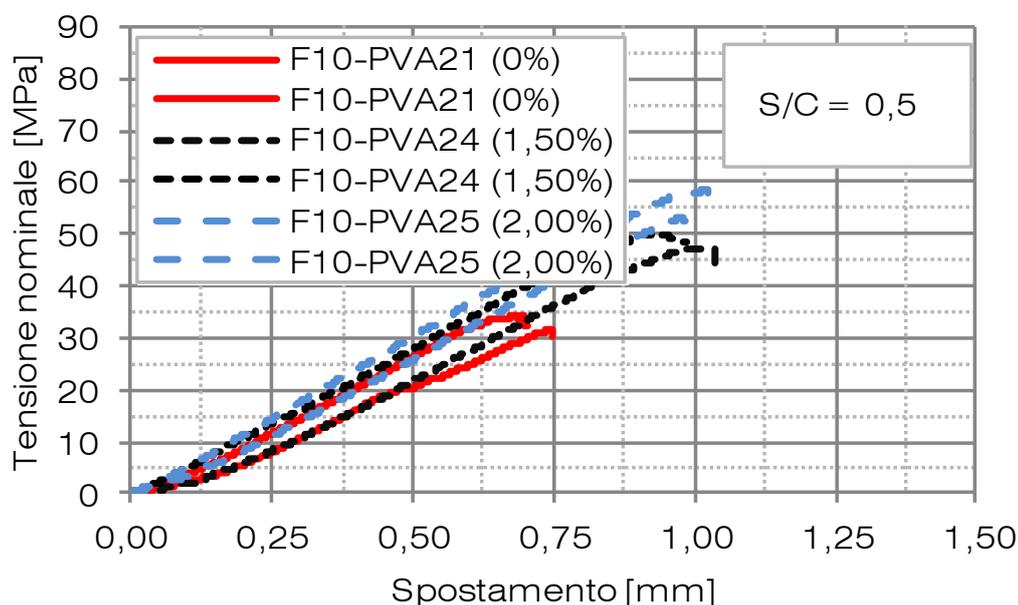


Figura 3.50 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di compressione retta per valori del rapporto $s/c=0,50$ – base di misura pari a 60 mm

Si osserva, come è noto in letteratura, che la presenza delle fibre non modifica la forma della curva rappresentativa della prova a compressione (Figura 3.48, Figura 3.49 e Figura 3.50). Il comportamento rimane di tipo fragile con una brusca perdita di rigidità al termine del tratto elastico. Si registra tuttavia un aumento del valore di rottura anche dovuto al confinamento che le fibre inducono nella direzione trasversale.

Successivamente in Figura 3.51, Figura 3.52 e Figura 3.53 vengono espone le curve ottenute dai test di flessione a tre punti con la lettura della bocca di intaglio. È evidente la distinzione tra la zona iniziale a comportamento elastico e la zona di post-fessurazione. Si osserva infatti che in corrispondenza alla frazione di volume di fibre pari al 2%, impiegando bassi valori del rapporto s/c , si evidenziano fenomeni di tipo *Strain Hardening*. Negli altri casi si manifesta invece, dopo l'inizio della fessurazione, una diminuzione della forza, e il manifestarsi, talvolta di un secondo picco.

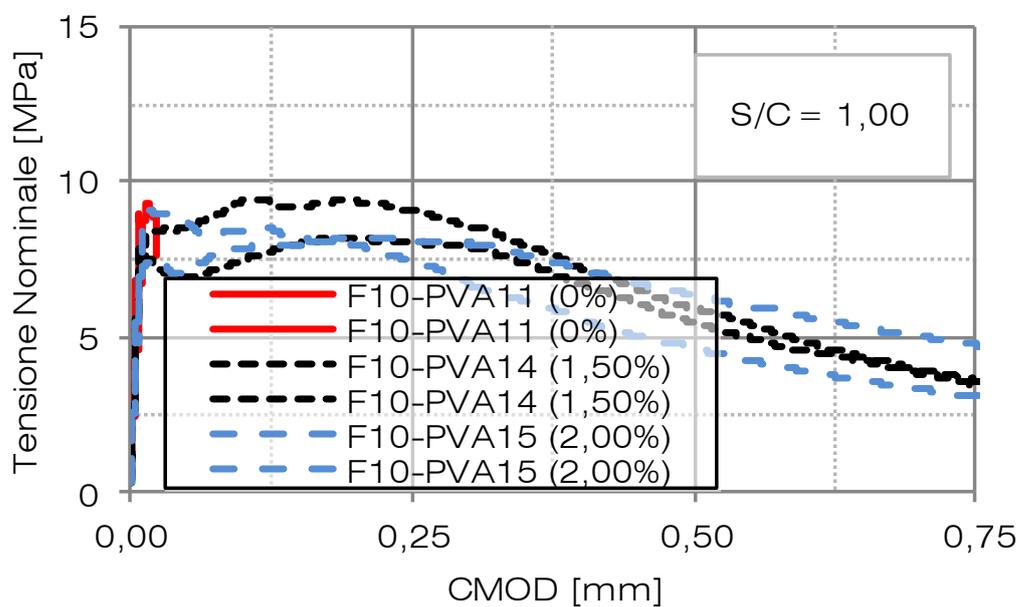


Figura 3.51 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di flessione a tre punti per valori del rapporto $s/c=1,00$ – base di misura pari a 20 mm

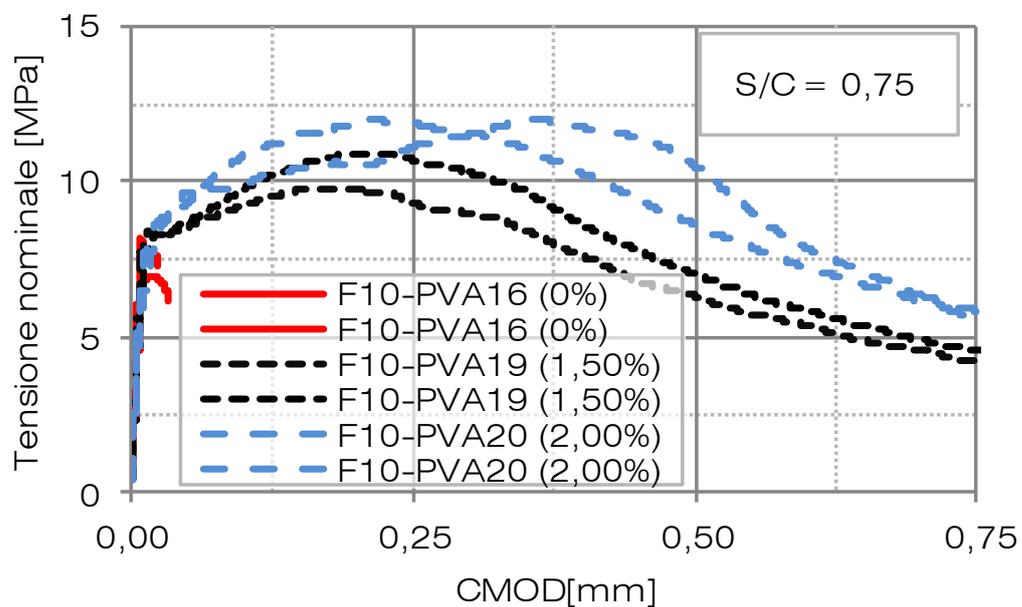


Figura 3.52 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di flessione a tre punti per valori del rapporto $s/c=0,75$ – base di misura pari a 20 mm

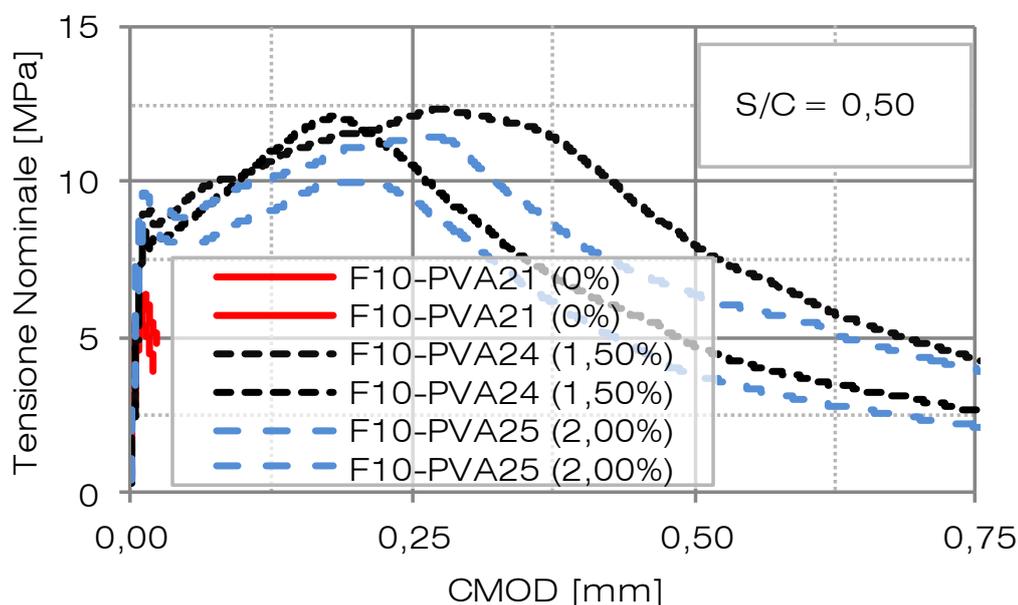


Figura 3.53 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di flessione a tre punti per valori del rapporto $s/c=0,50$ – base di misura pari a 20 mm

Successivamente in Figura 3.54, Figura 3.55 e Figura 3.56 vengono espone le curve ottenute dai test di trazione diretta.

È possibile notare i differenti comportamenti post critici che si ottengono al variare del rapporto s/c . L'area sottesa dal grafico in presenza di un alto contenuto di cemento ($s/c < 1,00$) risulta di fatto essere maggiore anche per quantitativi di fibre pari all'1,5% in frazione di volume.

I campioni testati, a rottura avvenuta, manifestano spesso uno stato di multifessurazione localizzato in adiacenza al punto di distacco delle superfici della sezione. Le zone in cui si concentrano le fessure multiple sono più diffuse all'aumentare del quantitativo di fibre.

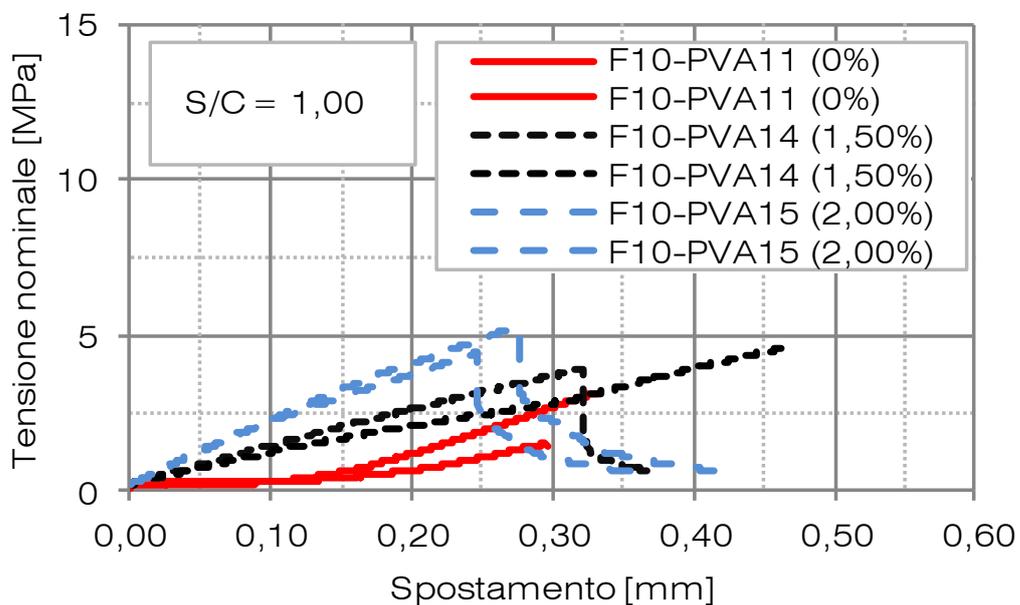


Figura 3.54 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di trazione diretta per valori di $s/c=1,00$ – base di misura pari a 160 mm

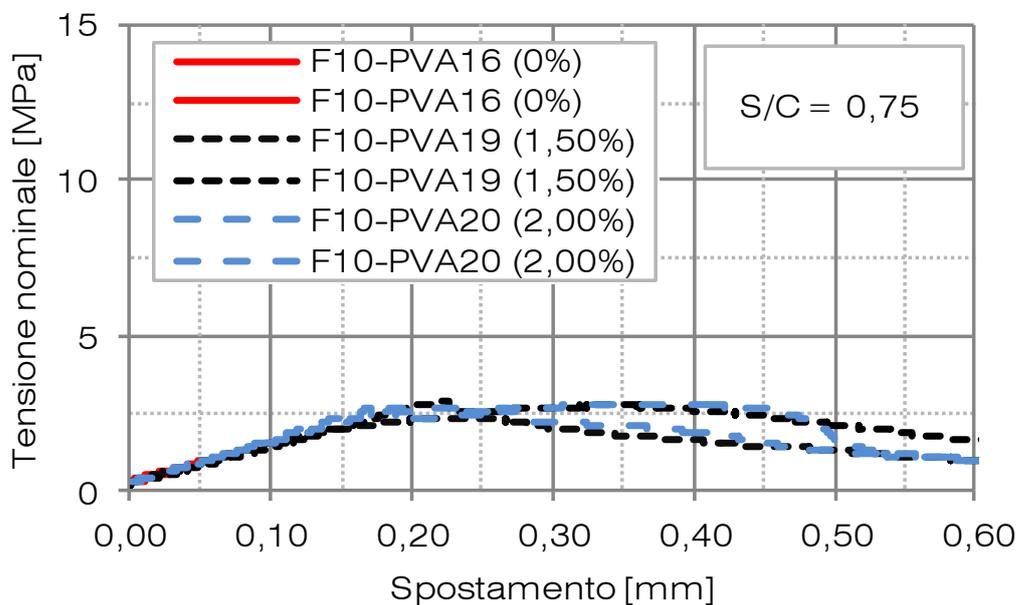


Figura 3.55 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di trazione diretta per valori di $s/c=0,75$ – base di misura pari a 160 mm

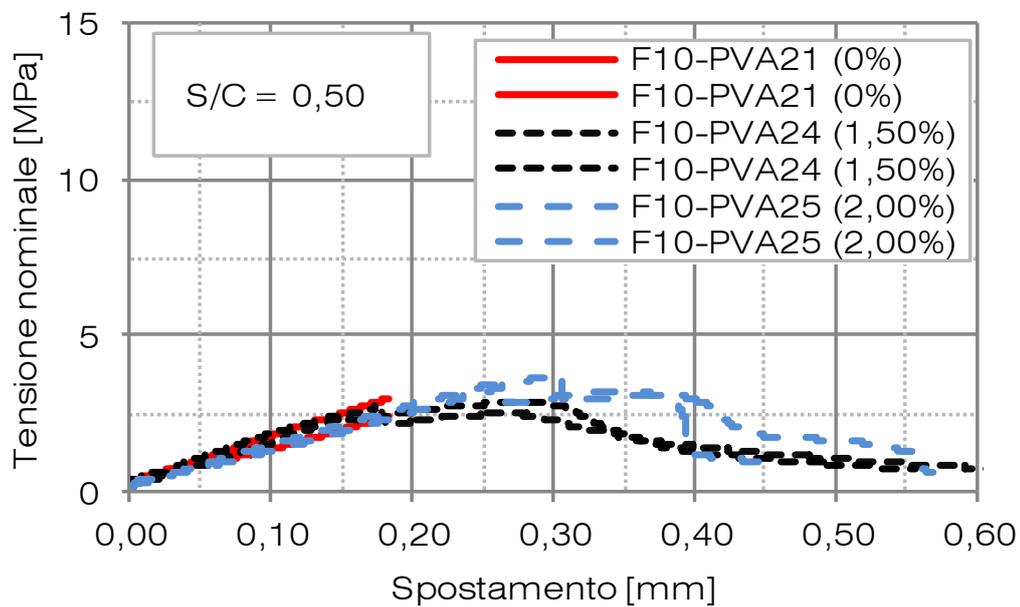


Figura 3.56 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di trazione diretta per valori di $s/c=0,50$ – base di misura pari a 160 mm

Nella tabella sottostante si espongono i valori di resistenza mediati sul campione in esame per le diverse prove effettuate. Nell'elenco riportato, ove possibile, si è fatta distinzione tra i valori sperimentali a limite elastico (f_{Fs} , M_{Fs} e f_{Fts}) e quelli massimi a rottura ($f_{F(max)}$, $M_{F(max)}$ e $f_{Ft(max)}$).

Tabella 3.9 – Valori al limite elastico e massimi per i campioni testati

Mix	Tipologia di prova		
	Comp. retta	Flessione 3P	Trazione retta
	$f_{Fs} - (f_{F(max)})$	$M_{Fs} - (M_{F(max)})$	$f_{Fts} - (f_{Ft(max)})$
	[MPa]	[Nm]	[MPa]
F11	NA - (39,0)	NA - (25,6)	2,35 - (2,35)
F14	NA - (52,1)	23,5 - (25,6)	4,58 - (4,58)
F15	NA - (51,3)	26,7 - (30,0)	4,57 - (4,57)
F16	NA - (40,6)	NA - (19,0)	1,50 - (1,50)
F19	NA - (56,2)	23,5 - (29,0)	2,35 - (2,58)
F20	NA - (48,3)	23,8 - (33,0)	2,78 - (2,78)
F21	NA - (32,7)	NA - (16,9)	2,95 - (2,95)
F24	NA - (45,4)	24,9 - (34,3)	2,45 - (2,77)
F25	NA - (55,8)	26,7 - (31,8)	3,17 - (3,68)

Dalla trattazione statistica dei risultati delle prove risulta che il rapporto esistente tra i valori di tensione ultima misurati nella prova a compressione e i valori di tensione ultima misurati nella prova a trazione (Figura 3.55 e Figura 3.56) sono compresi tra 15 – 20. Nella letteratura tecnica il valore di tale rapporto è generalmente inferiore; probabilmente le prove eseguite portano ad una sottostima della resistenza a trazione del materiale, infine i grafici evidenziano una buona duttilità post-picco della malta fibrorinforzata.

4.1. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

L'aggiunta di fibre conferisce al calcestruzzo e/o alla malta cementizia, dopo la fessurazione, una significativa resistenza a trazione. Quest'ultima dipende da molteplici fattori tra i quali ad esempio "l' *aspect ratio*" (ovvero il rapporto tra lunghezza e diametro equivalente della fibra), la percentuale volumetrica delle fibre, le caratteristiche meccaniche e chimiche di queste ultime.

Oltre la vastissima letteratura tecnico-scientifica sono apparsi recentemente documenti tecnici scientifici che trattano il problema. In particolare, sono state pubblicate il 18 giugno 2007 le "*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato*" CNR DT204/2006 [31].

L'argomento del documento CNR DT 204 è, come noto, il calcestruzzo fibrorinforzato, specificatamente con fibre metalliche di lunghezza compresa generalmente tra 6 mm e 70 mm e diametro compreso tra 0,15 mm e 1,20 mm.

Nel caso in esame vengono utilizzate delle fibre in polyvinylalcohol (PVA) di lunghezza pari a 6 mm e diametro pari 0,026 mm aventi una resistenza a trazione di 1400 MPa e modulo elastico paragonabile a quello della malta cementizia (40 GPa). Siamo di fronte quindi ad un materiale con caratteristiche diverse, sia dal calcestruzzo rinforzato a cui si riferisce la norma, sia da altri materiali plastici utilizzati nelle strutture civili quali gli FRP.

La normativa in oggetto propone due tipologie di modelli semplificati (*2.5.2 Proprietà meccaniche del calcestruzzo indurito*), uno in termini di apertura della fessura e l'altro in termini di deformazione, con i quali si fornisce una interpretazione semplificata del comportamento a flessione dei materiali fibrorinforzati.

I modelli citati consentono di interpretare il comportamento di elementi trave soggetti a flessione tramite la definizione di parametri caratteristici del materiale, quali:

- f_{Fts} , resistenza a trazione residua di esercizio;
- f_{Ftu} , resistenza a trazione residua ultima;
- f_F , resistenza a compressione prismatica o cilindrica del fibrorinforzato.

Il metodo proposto dalla normativa per la definizione dei parametri caratteristici è basato sulla interpretazione di prove di flessione a tre punti su provini standardizzati, notoriamente di più semplice esecuzione rispetto alle prove di trazione diretta. Mediante tali prove è possibile risalire ai valori f_{eq1} e f_{eq2} (Figura 3.43).

Disponendo quindi dei dati ottenuti dalle prove sperimentali standardizzate, trattati in modo statistico, è possibile risalire ai parametri costitutivi che rappresentano il materiale allo *stato limite di esercizio* (SLE) e allo *stato limite ultimo* (SLU).

I modelli semplificati di cui al punto 2.5.2 della CNR DT 204, per mezzo dei quali è possibile risalire alla resistenza ultima di elementi trave soggetti a flessione, sono basati sulle seguenti ipotesi:

- conservazione delle sezioni piane;
- comportamento elasto-plastico del materiale a trazione;
- comportamento elastico-lineare del materiale a compressione;
- un valore fissato (ε) di deformazione al lembo teso della sezione inflessa;
- un legame lineare tra i punti di ascissa w_{i1} e w_{i2} esteso fino al punto di ascissa w_u ;

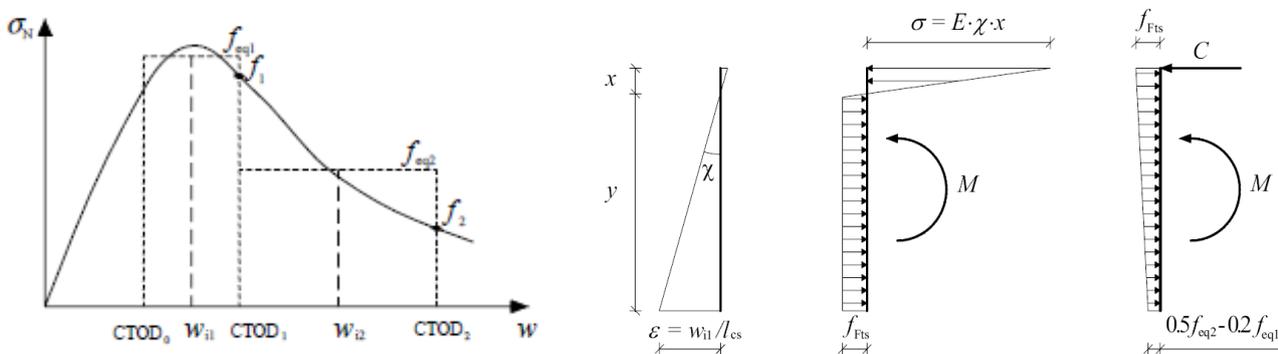


Figura 4.1 – Definizione della resistenza residua puntuale e media in una prova di flessione (a, sinistra) e soluzione grafica delle equazioni di equilibrio per la sezione soggetta a prova di flessione (b, destra)

Si ricorda che la normativa in oggetto è stata sviluppata sulla base di ricerche effettuate nel campo dei materiali da costruzione per i quali il rinforzo è spesso affidato a fibre di acciaio di dimensioni relativamente grandi. Il comportamento a rottura degli elementi in calcestruzzo rinforzati in fibra di acciaio FRC è tipicamente di tipo degradante (*Strain Softening*), considerevolmente diverso dal comportamento incrudente (*Strain Hardening*) ECC (equivalente alla sigla HPFRC per i calcestruzzi) che si riscontra per le malte oggetto della ricerca.

Nel seguito quindi saranno proposti modelli interpretativi sulla base del documento in oggetto facendo più specifico riferimento alle diverse modalità di prova e alle diverse geometrie degli elementi testati.



4.2. MODELLI INTERPRETATIVI

Attraverso i modelli interpretativi di seguito esposti, si intende verificare la relazione che lega il momento ultimo della sezione di trave soggetta a flessione retta ottenuto dalle prove sperimentali e il momento ultimo della medesima sezione, calcolato imponendo l'equilibrio alla rotazione delle forze in gioco.

Come precedentemente esposto non è stato possibile realizzare prove di laboratorio standardizzate a causa delle esigue dimensioni dei provini. Pertanto non è stato possibile ottenere parametri di riferimento caratteristici della normativa con i quali rappresentare il comportamento a flessione.

Al fine di rappresentare i dati sperimentali oggetto della ricerca si propongono tre modelli interpretativi, Modello A, Modello B e Modello C.

- Modello A (Figura 4.2): viene ipotizzata una distribuzione rettangolare delle tensioni nella zona tesa della sezione. La distribuzione di tensioni di trazione viene estesa a tutta l'altezza della sezione ed è tipica di un comportamento rigido perfettamente plastico della sezione. La forza di compressione che garantisce l'equilibrio della sezione alla traslazione si suppone sia concentrata al lembo compresso della stessa, conseguenza anche della buona resistenza a compressione;
- Modello B (Figura 4.3): viene ipotizzata una distribuzione triangolare delle tensioni nella zona tesa della sezione. Anche in questo caso la zona tesa della sezione è estesa a tutta l'altezza del provino e la reazione di compressione è concentrata al lembo compresso. Il valore della tensione di trazione raggiunge il valore minimo in corrispondenza dell'intradosso della trave;
- Modello C (Figura 4.4) si ipotizza una distribuzione triangolare delle tensioni nella zona tesa della sezione. Anche in questo caso la zona tesa della sezione è estesa a tutta l'altezza del provino e la reazione di compressione è concentrata al lembo compresso. Il valore della tensione di trazione raggiunge il valore massimo in corrispondenza dell'intradosso della trave;

Si osserva inoltre che a differenza dei modelli riportati nelle normative citate in precedenza non si dispone di armature metalliche in zona tesa. In questo caso la resistenza a trazione del provino viene fornita unicamente dalla resistenza a trazione della malta fibrorinforzata.

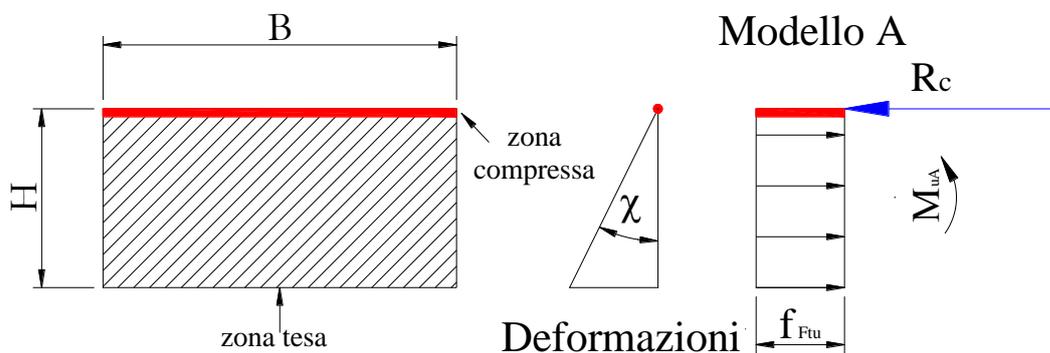


Figura 4.2 – Modello A, viene ipotizzata una distribuzione rettangolare delle tensioni nella zona tesa della sezione. La forza di compressione che garantisce l'equilibrio della sezione alla traslazione si suppone sia concentrata al lembo compresso della stessa, conseguenza anche della buona resistenza a compressione

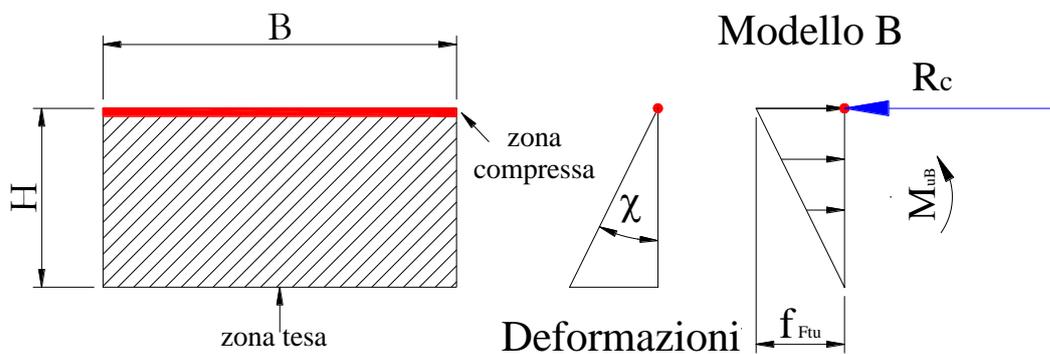


Figura 4.3 – Modello B, viene ipotizzata una distribuzione triangolare delle tensioni nella zona tesa della sezione. La forza di compressione che garantisce l'equilibrio della sezione alla traslazione si suppone sia concentrata al lembo compresso della stessa, conseguenza anche della buona resistenza a compressione

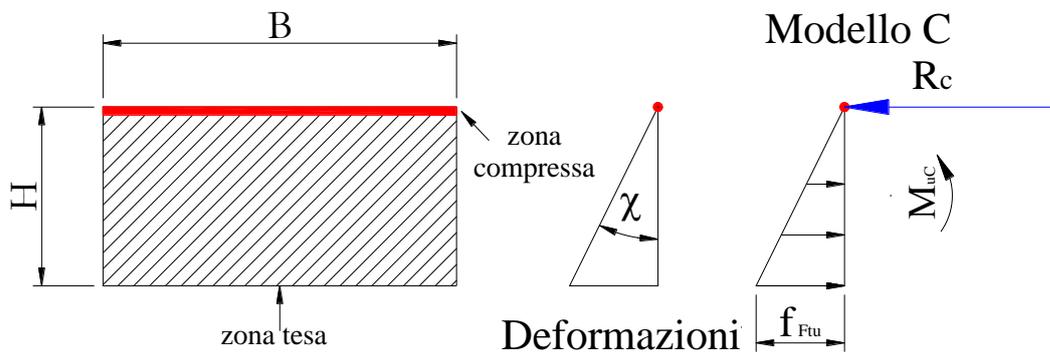


Figura 4.4 – Modello C, viene ipotizzata una distribuzione triangolare delle tensioni nella zona tesa della sezione. La forza di compressione che garantisce l'equilibrio della sezione alla traslazione si suppone sia concentrata al lembo compresso della stessa, conseguenza anche della buona resistenza a compressione

In riferimento ai simboli riportati nella tabella sottostante (Tabella 4.1), vengono definiti:



- f_{Ftu} , resistenza media a trazione residua ultima del provino fibrorinforzato;
- $\sigma_{(fFtu)}$, deviazione standard calcolata in riferimento al campione adottato e ai valori di resistenza a trazione residua ultima;
- f_{cm} , resistenza media a compressione prismatica del provino fibrorinforzato;
- $\sigma_{(fcm)}$, deviazione standard calcolata in riferimento al campione adottato e ai valori di resistenza compressione prismatica;
- M_{uX} , momento medio ultimo ottenuto dalle prove sperimentali;
- M_{uA} , momento ultimo calcolato mediante il modello A;
- M_{uB} , momento ultimo calcolato mediante il modello B;
- M_{uC} , momento ultimo calcolato mediante il modello C;

In riferimento a Figura 4.2, per il modello tipo A, è possibile scrivere quanto segue:

- $f_{Ftu}BH = R_c$, equilibrio alla traslazione,(1.a);
- $f_{Ftu}B \frac{H^2}{2} = M_{uA}$, equilibrio alla rotazione(1.b);

In riferimento a Figura 4.3, per il modello tipo B, è possibile scrivere quanto segue:

- $f_{Ftu}B \frac{H}{2} = R_c$, equilibrio alla traslazione(2.a);
- $f_{Ftu}B \frac{H^2}{6} = M_{uB}$ equilibrio alla rotazione(2.b);

In riferimento a Figura 4.4, per il modello tipo C, è possibile scrivere quanto segue:

- $f_{Ftu}B \frac{H}{2} = R_c$, equilibrio alla traslazione(3.a);
- $f_{Ftu}B \frac{H^2}{6} = M_{uB}$, equilibrio alla rotazione(3.b);

Tabella 4.1 – Confronti tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti tramite i modelli adottati

Provino	Dimensioni		Tensioni					Momento Ultimo		
	B [mm]	H [mm]	f_{Ftu} [MPa]	$\sigma_{(fFtu)}$	f_{cm} [MPa]	$\sigma_{(fcm)}$	M_{uX} [Nm]	M_{uA} [Nm]	M_{uB} [Nm]	M_{uC}
F11	40,1	19,9	2,35	1,20	39,2	5,27	25,6	18,6	6,20	12,4
F14	40,9	20,9	4,58	0,68	48,7	10,25	25,6	41,1	13,7	27,4
F15	40,9	21,1	4,57	0,67	47,7	7,45	30,0	41,4	13,8	27,6
F16	40,2	19,2	1,50	0,71	42,2	9,76	19,0	11,1	3,70	7,4
F19	40,2	20,6	2,78	0,49	54,1	6,39	29,0	23,8	7,90	15,9
F20	39,9	21,1	2,58	0,33	45,9	9,05	33,0	22,9	7,60	15,3
F21	40,2	19,5	2,95	0,55	33,3	8,36	16,9	22,6	7,50	15,0
F24	40,1	20,5	2,77	0,16	44,2	10,22	34,3	23,3	7,80	15,5
F25	41,7	20,5	3,68	0,23	52,3	9,40	31,8	32,1	10,7	21,4

Nelle tre immagini sottostanti si espongono i risultati analitici ottenuti tramite le tre diverse formulazioni del modello. Ogni punto analitico, rappresentativo di una miscela studiata, è corredato di barre di errore direttamente legate alla propagazione degli errori di cui sono affette le grandezze sperimentali di riferimento.

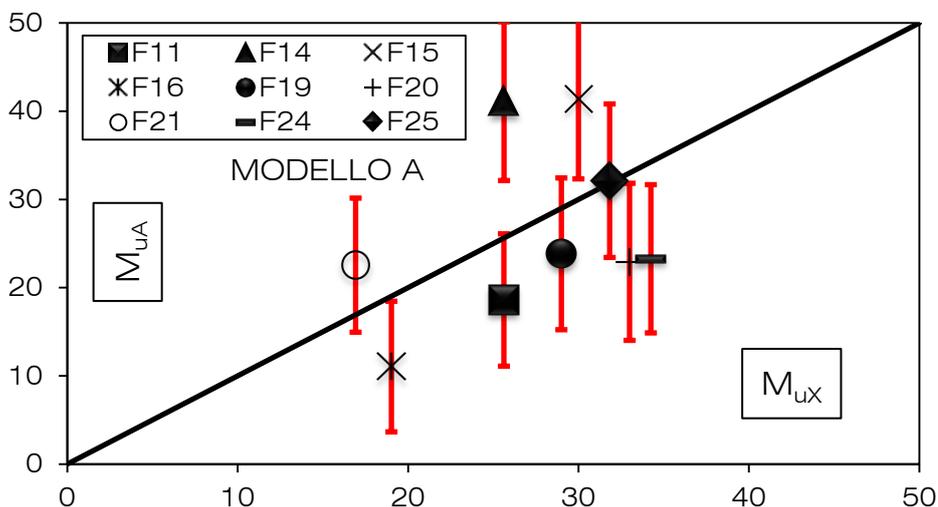


Figura 4.5 – Confronto tra i dati sperimentali e risultati dei due modelli interpretativi nel caso del Modello A

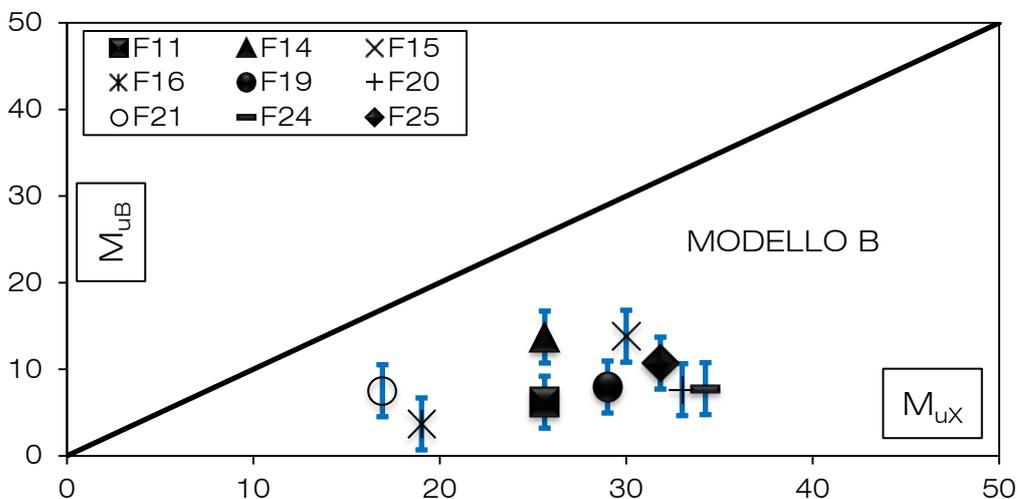


Figura 4.6 – Confronto tra i dati sperimentali e risultati dei due modelli interpretativi nel caso del Modello B

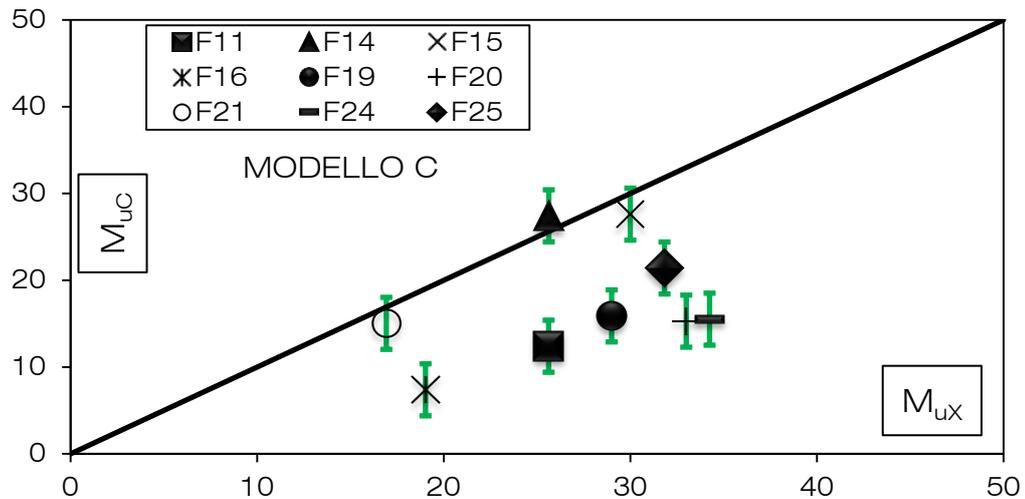


Figura 4.7 – Confronto tra i dati sperimentali e risultati dei due modelli interpretativi nel caso del Modello C

La sperimentazione svolta nel precedente lavoro ha mostrato come siano necessari bassi valori del rapporto s/c per incrementare il momento ultimo e ottenere una significativa duttilità. Tuttavia non è possibile impiegare rapporti veramente bassi di s/c per motivi tecnologici (nella letteratura citata si utilizzano rapporti s/c tipicamente inferiori a 0.50). La formulazione delle ricette per l'impiego in processi di estrusione di tipo industriale si discosta inoltre notevolmente dalle classiche formulazioni per calcestruzzi trattate nella normativa citata.

I modelli impiegati hanno dunque dovuto tenere conto delle diverse geometrie del manufatto e dei differenti materiali utilizzati. Come si osserva in Figura 4.5, il Modello A, basato su un comportamento rigido-plastico a trazione del materiale fibrorinforzato e per il quale si assume la concentrazione delle forze di compressione alla sommità della sezione, risulta essere il più adatto alla descrizione del comportamento sezioneale a flessione dei provini, sebbene esso sia poco sofisticato e probabilmente in esso è stata sottostimata la resistenza a trazione del materiale.

5

INGEGNERIZZAZIONE

I risultati riportati nei precedenti capitoli, frutto di due anni di test eseguiti in laboratorio, mostrano come siano necessari bassi valori del rapporto s/c per incrementare il momento ultimo e ottenere una significativa duttilità.

Tale circostanza è pienamente in accordo con quanto osservato nella letteratura tecnica riportata. Si può quindi concludere che per incrementare la duttilità del materiale e il valore del momento ultimo, sono necessari elevati quantitativi di cemento e inerti prevalentemente fini.

Dal punto di vista industriale un buon prodotto da costruzione deve tenere conto anche del costo di produzione, in funzione del possibile mercato del manufatto, ed infine è necessario considerare le eventuali interazioni del nuovo materiale all'interno del processo produttivo.

Con il termine *ingegnerizzazione* vengono di fatto raccolte in questo ultimo capitolo tutte le modifiche necessarie al fine di rendere il materiale processabile, ossia passare da uno studio di laboratorio ad una applicazione industriale finalizzata alla produzione in serie di manufatti.

Un'approfondita analisi, per mezzo della quale si sono valutati e confrontati i costi dei componenti delle diverse ricette, ha permesso di considerare quanto segue:

- il range dei valori del rapporto s/c accettabili ai fini della realizzazione di un prodotto dai costi sostenibili può essere ragionevolmente compreso tra 1,7 e 2,1;
- l'aumento di prezzo del prodotto ai fini dell'introduzione in un nuovo mercato è considerato accettabile anche a livelli che si attestano al 20%;
- la riduzione di peso del manufatto è richiesta anche ai fini del contenimento dei costi per unità di prodotto, e deve attestarsi almeno al 40%.

Ferme restando le considerazioni precedenti si è quindi cercato di modificare sia la composizione della miscela fibrorinforzata sia la meccanica del processo di estrusione al fine di ottenere un prodotto di ottima qualità e in grado occupare una nuova posizione di mercato.

La società Kuraray Co Japan, in questa parte della ricerca, ha collaborato strettamente con Vortex Hydra s.r.l. al fine di accelerare i tempi di sviluppo ed ingegnerizzazione del processo industriale.

Al fine di proteggere entrambe le società dal rischio della divulgazione delle informazioni riguardanti l'argomento della ricerca è stato sottoscritto, da ambo le parti, un contratto di collaborazione mutua e di riservo alla pubblicazione delle formulazioni studiate, per un periodo di tempo pari a cinque anni successivi alla data di sottoscrizione, periodo di tempo nel quale sono impegnato a non descrivere in modo dettagliato la composizione degli additivi impiegati e le procedure di mescolazione impiegate. L'accordo in oggetto è riportato nei documenti in allegato alla tesi di ricerca ed è stato sottoscritto per l'anno 2011 ed esteso in seguito anche all'anno 2012.

5.1. VALUTAZIONE PRELIMINARE DELLA QUALITÀ DEL MANUFATTO

La valutazione preliminare della qualità del manufatto è stata necessaria al fine di analizzare i punti critici del processo di estrusione di profili sagomati.

È da notare che la sperimentazione fino ad ora riportata è stata interamente dedicata alla realizzazione di piastre piane con l'obiettivo di ricavarne travette per l'esecuzione di test di flessione a tre punti.

L'estrusione di profili sagomanti, di fatto, introduce delle importanti variabili al processo, quali:

- flusso di materiale nella cassa di estrusione non più piano ma bidimensionale;
- velocità periferiche del rullo compattatore diverse al variare del diametro;
- sezioni trasversali del prodotto aventi spessore variabile;
- presenza di zone estremamente sottili, quali interlock e spigoli laterali.

In Figura 5.1 e Figura 5.2 sono riportate le immagini di un test preliminare di estrusione. La miscela di riferimento è riportata in Tabella 3.3 – Mix a base di fibre PVA impiegati nella prima fase della sperimentazione (2009) a pagina 61.



Figura 5.1 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA05 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61)



Figura 5.2 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA05 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61)

Le immagini mostrano chiaramente che la superficie del manufatto è fortemente irregolare e caratterizzata da avvallamenti localizzati. Spesso i rigonfiamenti superficiali sono localizzati in presenza di agglomerati di fibre non disperse.



Figura 5.3 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA05 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61) – (a) particolare della zona di taglio, (b) particolare della zona di interlock della tegola

La scarsa lavorabilità dell'impasto dovuta all'inserimento di fibre in concomitanza con un elevato contenuto di inerti rende di fatto difficili le operazioni di mescolazione, che di conseguenza ricadono negativamente sulla dispersione delle fibre.

In Figura 5.3 si riportano il particolare della zona di taglio del manufatto e il particolare della zona di interlocking della tegola. L'introduzione delle fibre ad elevate percentuali in frazione di volume provoca un aumento della pressione di esercizio della macchina con conseguente ricaduta sulla rigidità del materiale appena sformato. L'estrema durezza superficiale del manufatto appena estruso riduce notevolmente l'azione tagliente del coltello, producendo rigonfiamenti nelle zone adiacenti a quella di taglio. Inoltre, la zona di interlocking, generalmente di spessore esiguo, risulta essere irregolare e fortemente frastagliata. Sinonimo di una scarsa scorrevolezza del materiale al di sotto del rullo compattatore.

Nella successiva Figura 5.4 si mostra un particolare della mescola al termine della procedura di mescolazione. Sebbene i tempi di mescolazione siano quasi duplicati rispetto ad un normale ciclo di mescolazione per materiali in assenza di fibre, si nota che anche dopo 5 minuti di mescolazione intensiva, spesso, permangono agglomerati di fibre non disperse.



Figura 5.4 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA05 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61) – Dispersione delle fibre durante le operazioni di mescolazione

Di particolare interesse anche l'eccessivo aumento della pressione di esercizio della macchina, evento questo, che si è verificato solo nel caso di elevati rapporti s/c ed in presenza di quantitativi in frazione di volume di fibre pari al 2%.

Nelle immagini sottostanti (Figura 5.5) si mostra un supporto di alluminio crepato nelle zone in cui la pressione di esercizio della macchina ha superato il valore limite della resistenza del supporto.



Figura 5.5 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA05 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61) – Supporto di alluminio crepato a causa delle elevate pressioni di esercizio

La pressione eccessiva e la non completa dispersione delle fibre nell'impasto sono notoriamente causate dalla scarsa lavorabilità della miscela. La prevalenza del contenuto d'inerti sulla quantità di cemento rende, di fatto, l'azione degli additivi meno efficace, influenzando negativamente sulla fluidità e scorrevolezza del materiale all'interno dell'estrusore. Questo evento è di norma accettabile nella realizzazione di piastre piane per l'esecuzione di test di laboratorio, ma evidentemente risulta essere problematico nel momento in cui si passa all'estrusione di profili non piani. A supportare tale assunzione di seguito si mostrano ulteriori immagini di tegole realizzate con diversi rapporti s/c.



Figura 5.6 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA14 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61) – Miglioramento dell'aspetto superficiale e della zona di interlocking per merito della riduzione della frazione inerte nella miscela

Come mostrato in Figura 5.6 la riduzione del rapporto s/c ha consentito all'additivo superfluidificante di aumentare la fluidità e la scorrevolezza dell'impasto. Sebbene permangano i problemi di dispersione delle fibre, in questo caso si può osservare una superficie più regolare e una zona di interlocking senza disomogeneità eccessive.



Figura 5.7 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA19 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61) – Aumento eccessivo della lavorabilità a causa dell'aumento della quantità di cemento nella miscela

Tuttavia un aumento eccessivo del superfluidificante a fronte di un aumento della quantità di cemento (Figura 5.7) provoca una notevole variazione di lavorabilità che, contrariamente a quanto ci si attenderebbe, riduce la scorrevolezza del materiale della cassa di estrusione impedendo la fuoriuscita del materiale. Sebbene in questo caso la qualità della superficie sia localmente accettabile non è possibile affermare che lo stesso valga anche per la qualità del prodotto estruso nella sua interezza.

I risultati sopra esposti permettono di considerare che, sebbene la qualità del materiale sia ottima e consenta di raggiungere livelli di duttilità e resistenza ultima elevati, è necessario intervenire ulteriormente su diversi fronti al fine di realizzare un prodotto estruso a profilo ondulato.

I principali fronti sui quali si è deciso di operare sono i seguenti:

- modifica della meccanica dell'estrusore al fine di migliorare l'afflusso di materiale sul supporto di alluminio;
- modifica marginale dei componenti della miscela anche per mezzo dell'inserimento di nuovi additivi;
- modifica della sequenza e dei tempi di mescolazione;

5.2. INTERVENTI INERENTI LA MECCANICA DELL'ESTRUSORE

L'esperienza decennale della società Vortex Hydra s.r.l. nella progettazione e realizzazione di estrusori ha consentito di affinare nel tempo la qualità e le proprietà delle macchine al fine di ottimizzare i tempi di costruzione, semplificare le operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria e soprattutto di consentire le operazioni di estrusione con l'impiego di materie prime facilmente reperibili sul territorio.

Ciò ha comportato ad esempio che la cassa di estrusione dei modelli di macchine a bassa capacità produttiva (come ad esempio il modello UNO300), nel caso di profili sagomati piani, sia equipaggiata di un rullo piano avente diametro di 140 millimetri.

In linea di massima le dimensioni indicate consentono di realizzare tegole di ottima qualità, sia dal punto di vista dell'aspetto superficiale sia dal punto di vista della

resistenza finale. Affinché ciò avvenga la pressione di esercizio della centralina idraulica a servizio del sistema di spinta deve attestarsi intorno ai 50 bar.

Variazioni di ± 15 bar sono in ogni caso accettabili e possono essere dovute ad una lieve variazione della quantità di acqua nell'impasto, di granulometria degli inerti impiegati o un diverso profilo estruso.

Nella sottostante Figura 5.8 viene mostrata una vista laterale della testata di estrusione normalmente installata sulla macchina utilizzata per la realizzazione delle piastre piane sino ad ora analizzate.

La cassa è caratterizzata da un rullo regolabile in altezza e da una controsagoma ad altezza ed inclinazione variabili. Entrambi i componenti sono solidali alla struttura rigida costituita dalle pareti laterali.

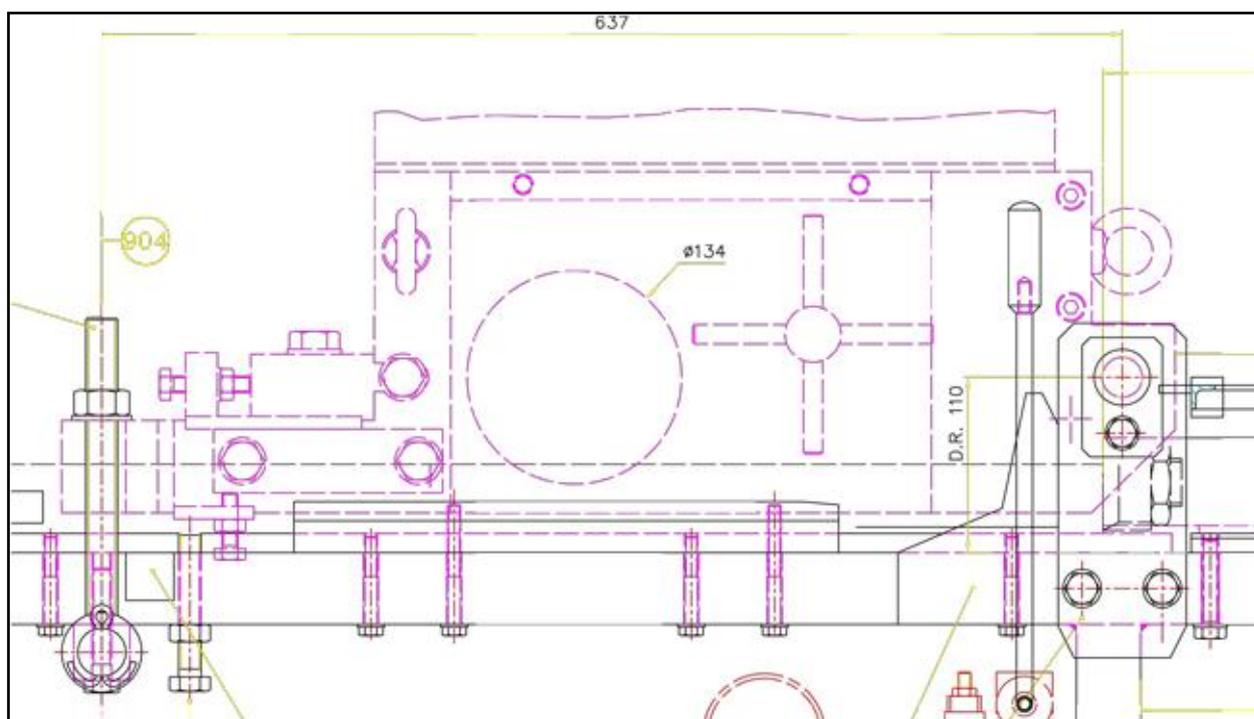


Figura 5.8 – Testata di estrusione tradizionale per profili piani installata su UNO300

La consistenza dei materiali generalmente impiegati a livello industriale per la produzione dei manufatti, unita all'angolo di "invito" che nasce tra il piano del supporto di alluminio e la tangente al rullo passante per un punto di ampiezza definita, è tale da garantire il corretto afflusso di materiale al di sopra del supporto di alluminio. La buona compattazione del materiale fresco è infatti strettamente legata alla pressione che il rullo, in fase iniziale, e la controsagoma, successivamente, esercitano su di esso.

Tale circostanza non si verifica nel momento in cui nella miscela a base cementizia vengono aggiunti additivi, o fibre, tali da modificarne la capacità di scorrimento in corrispondenza delle pareti verticali (Figura 5.9).

In tale circostanza il prodotto estruso mostra delle zone discontinue sia a livello superficiale sia internamente, tali da comprometterne l'impermeabilità agli agenti atmosferici e la funzionalità estetica (Figura 5.10).



Figura 5.9 – scorrimento non ottimale del materiale all'interno della cassa di estrusione e conseguente risultato di estrusione di una miscela viscosa

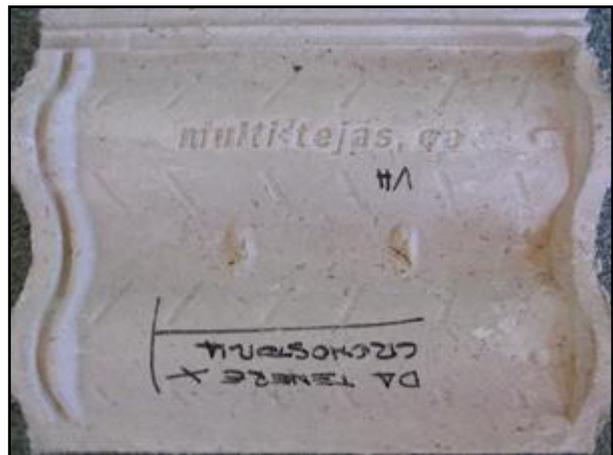


Figura 5.10 – Imperfezioni superficiali su provini induriti causate da uno scorrimento non ottimale del materiale all'interno della cassa di estrusione

Al fine di incrementare il livello di compattazione del materiale, anche aumentandone l'afflusso attraverso la sezione trasversale, sono state effettuate modifiche sia al diametro del rullo sia alla struttura della cassa di estrusione.

La nuova cassa di estrusione è stata concepita in grado di alloggiare tre rulli di dimensioni diverse. Il primo della serie è costituito dal valore di diametro standard pari a 140 millimetri, il secondo pari a 200 millimetri ed infine il terzo pari ad un diametro di 280 millimetri.

L'intercambiabilità dei rulli è stata studiata in modo da non compromettere il riflusso di materiale che avviene nella zona di contatto tra controsagoma e rulli. A seconda degli inerti impiegati infatti può essere necessario aumentare o talvolta diminuire la distanza del punto di contatto dei due componenti. Una elevata distanza tra le due

parti consente al materiale soggetto ad elevate pressioni di defluire nel canale libero riducendo quindi il potere compattante della controsagoma.

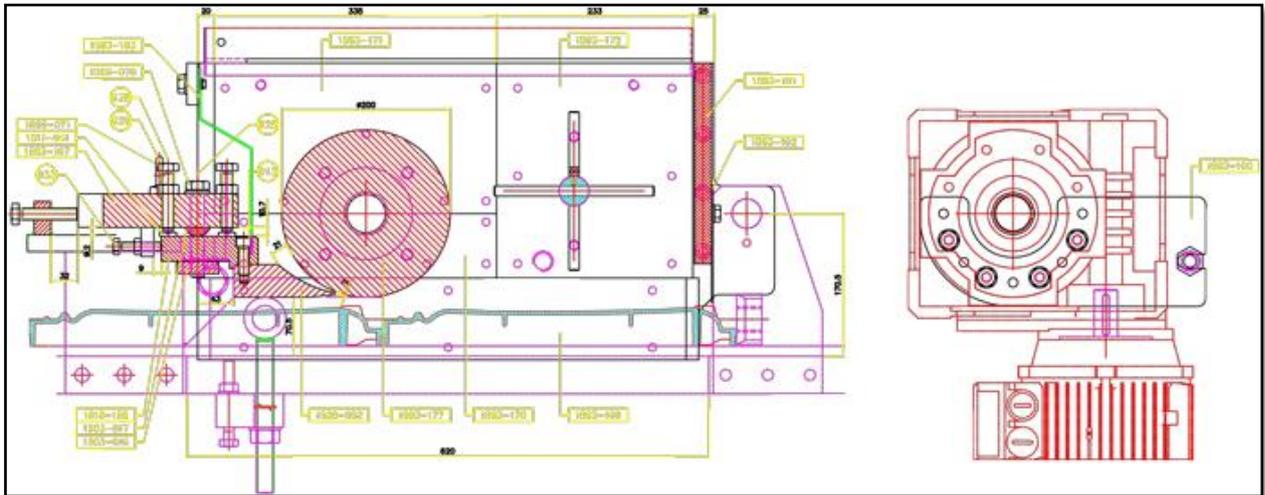


Figura 5.11 - Sezione laterale della cassa di estrusione con predisposizione per rullo di diametro 200 millimetri

In previsione di elevati sforzi di compressione generati dal maggior afflusso di materiale è stata rivista la logica di fissaggio della conto sagoma, la quale non è più solidale alla cassa di estrusione ma al bancale di sostegno.

In questo modo risulta possibile variare l'assetto della cassa e dei relativi rulli senza intervenire di volta in volta sul riposizionamento della controsagoma.

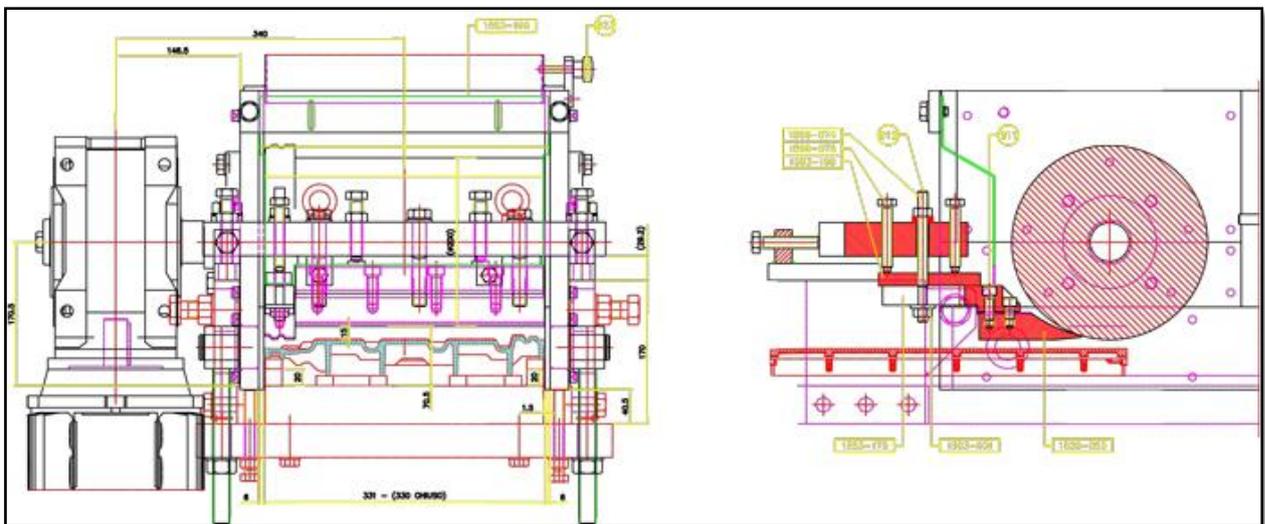


Figura 5.12 - Sezione laterale della cassa di estrusione con predisposizione per rullo di diametro 280 millimetri

La separazione strutturale della controsagoma dalla cassa di estrusione (Figura 5.13) ha inoltre consentito di rafforzarne i supporti di base ed aumentarne il grado di mobilità con conseguente beneficio sulle operazioni di settaggio che ora possono avvenire in modo autonomo e non risentono delle oscillazioni della struttura della cassa.

Le immagini sottostanti mostrano diversi particolari della cassa di estrusione modificata per alloggiare rulli di diverso diametro.

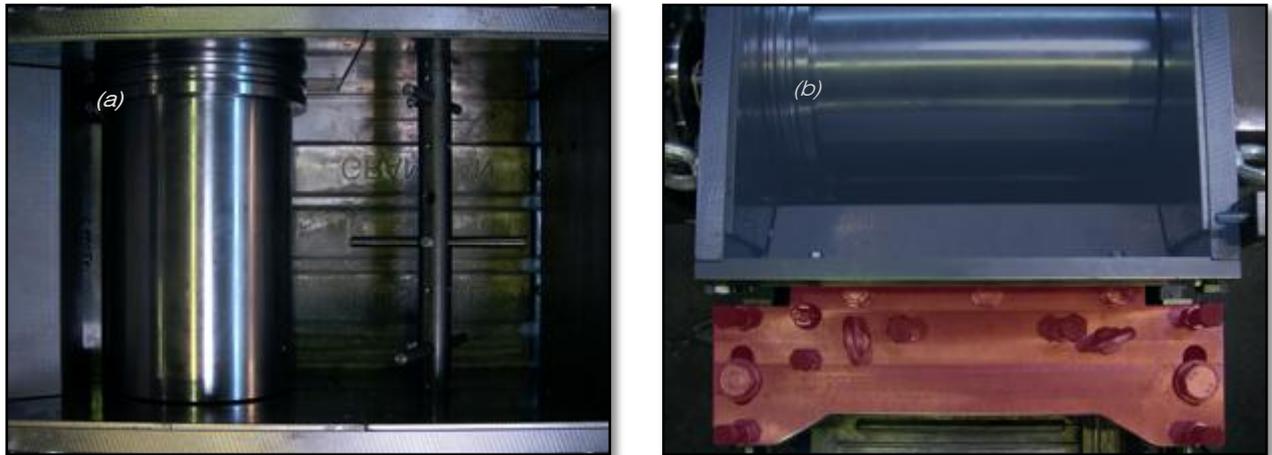


Figura 5.14 – Cassa di estrusione modificata alloggiare rulli piani di diverso diametro, (b) con diversi colori vengono evidenziate il supporto di contro sagoma (rosso) e il rullo compressore (blu)

In Figura 5.15 si mostrano il particolare del rullo (a) e un vista globale della cassa (b) nella zona in cui sono alloggiati il riduttore e la motorizzazione elettrica.

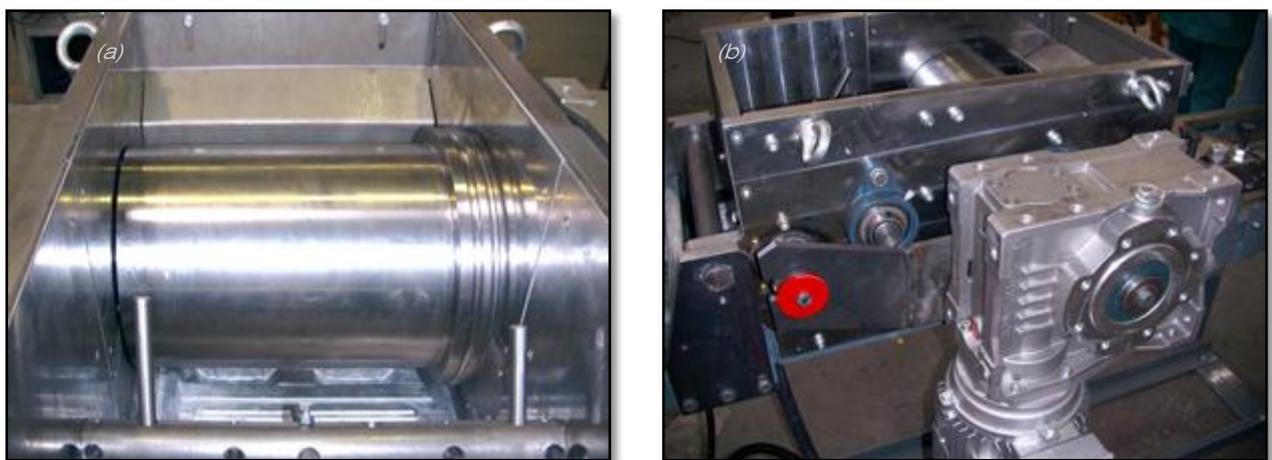


Figura 5.15 – Cassa di estrusione, (a) particolare del rullo e (b) zona di alloggiamento della motorizzazione con riduttore di giri

5.3. INTERVENTI INERENTI I MATERIALI COMPONENTI LA MISCELA

Gli studi di laboratorio effettuati nel corso della ricerca hanno definito quali possono essere i parametri che possono essere fissati al fine di garantire un incremento di duttilità e di momento ultimo:

- granulometria degli inerti;
- tipologia di fibre impiegate;
- quantitativo di fibre inserito in termini di frazione di volume.

Gli aspetti principali sui quali si è deciso di intervenire al fine di migliorare il comportamento della miscela durante le operazioni di estrusione sono i seguenti:

- modifica del quantitativo o della tipologia di additivi impiegati, al fine di variare la scorrevolezza del materiale durante il processo di estrusione;
- modifica del contenuto di acqua nell'impasto;
- variazione del rapporto s/c.

Di seguito, con il supporto del materiale fotografico a disposizione, verranno esposte le diverse soluzioni sviluppate in collaborazione con Kuraray Co Japan all'interno dei laboratori di Vortex Hydra s.r.l.

Il materiale fotografico è riferito alla sola attività di ricerca sviluppata all'interno delle strutture sopraccitate e per mezzo dei macchinari messi a disposizione della società Vortex Hydra s.r.l., in quanto non si ritiene opportuno mostrare la documentazione delle sole prove di mescolazione effettuate presso i laboratori della società Kuraray Co.

Si premette che l'esperienza accumulata, nel tempo, nel campo del fibrocemento dalla società partner per lo sviluppo ed ingegnerizzazione del prodotto fibrorinforzato è stata di grande aiuto al fine di definire possibili nuovi additivi in grado di modificare la reologia della malta cementizia durante le operazioni di mescolazione ed estrusione. In particolare nel corso delle ricerca svoltesi nell'arco di tempo di un anno sono state definite diverse formulazioni basate sull'impiego di due additivi che in questa sede definiamo ADD1, ADD2 e ADD3.

La fase iniziale dei test è da considerarsi come fase conoscitiva della reazione dell'impasto all'introduzione dei differenti additivi in differenti quantità. Pertanto verranno analizzati i risultati dell'estrusione di diversi profili solo dal punto di vista qualitativo, rinunciando alle analisi di resistenza e permeabilità.



Figura 5.16 – Test di mescolazione con l'introduzione di ADD1

La prima tipologia di additivo testata è un viscosizzante che in questa sede verrà nominato ADD1. L'azione viscosizzante si può notare già durante il processo di mescolazione (Figura 5.16). L'impasto, anche a bassi contenuti di acqua, diventa

estremamente viscoso velocizzando di fatto il processo di dispersione delle fibre che altrimenti non avverrebbe.

L'introduzione dell'impasto nell'estrusore, come si evince dalle sottostanti immagini, comporta gravi discontinuità nella superficie del prodotto estruso.

Inoltre, il prodotto finale indurito, risulta essere estremamente poroso e poco compatto (Figura 5.18).



Figura 5.17 – Test di estrusione su profilo SW5 con l'introduzione di ADD1

Si ritiene che le difficoltà incontrate durante il processo di estrusione, sebbene la dispersione delle fibre sia apparentemente ottimale, siano causate dalla eccessiva viscosità dell'impasto, il quale mostra attitudine ad attaccarsi alle pareti metalliche della cassa di estrusione e dei componenti meccanici diminuendo quindi l'affluenza e la scorrevolezza del prodotto attraverso la sezione di formatura.

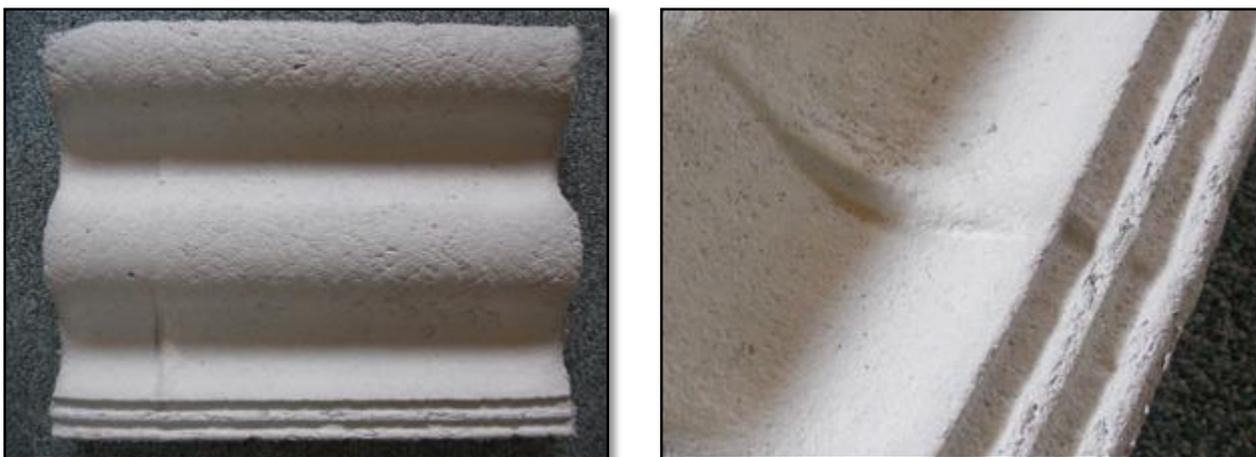


Figura 5.18 – Test di estrusione su profilo SW5 con l'introduzione di ADD1 – Tegole indurite

Mantenendo le medesime proporzioni tra i componenti della miscela si è valutata l'influenza del settaggio della cassa di estrusione sulla qualità del prodotto estruso.

Notoriamente infatti, la diminuzione dello spessore della tegola, a seguito di una riduzione della distanza tra rullo e supporto di alluminio, comporta un aumento notevole della pressione di esercizio della macchina con conseguente aumento della compattazione del prodotto estruso.

Il risultato della diminuzione di spessore della tegola è mostrato nelle sottostanti figure. Da quanto è possibile osservare il prodotto estruso non mostra significativi miglioramenti della qualità superficiale, evidenziando, di conseguenza, ancora considerevoli problemi di afflusso di materiale durante il processo di estrusione.



Figura 5.19 – Test di estrusione su profilo SW5 con l'introduzione di ADD1 – Spessore ridotto

Al fine di migliorare la resa nel tempo dell'azione viscosizzante e aumentarne l'efficacia, nella fase successiva della ricerca sono state valutate diverse sequenze di mescolazione. La sequenza di mescolazione standard (SQM1), è quella che in genere viene impiegata per mescole tradizionali, in cui in ultima fase vengono aggiunte le fibre di rinforzo:

- proporzionamento di cemento e sabbia..... mix 1 min;
- aggiunta di acqua di impasto mix 1 min;
- aggiunta di ADD1 mix 1 min;
- aggiunta di fibre di rinforzo mix 2 min;

Nella sequenza di mescolazione modificata (SQM2), ADD1 è stato inserito prima dell'introduzione dell'acqua, permettendone così una diffusione allo stato secco. In questo caso la qualità della superficie della tegola risulta essere migliorata. Non si notano infatti grandi discontinuità superficiali e rigonfiamenti dovuti ad un eccesso di fluidità(Figura 5.20).

Sebbene l'insieme delle diverse soluzioni adottate, quali additivi viscosizzanti, settaggio della macchina e sequenze di mescolazione, abbiano migliorato notevolmente l'aspetto superficiale della tegola non è possibile affermare che vi siano stati miglioramenti anche dal punto di vista della resistenza massima.

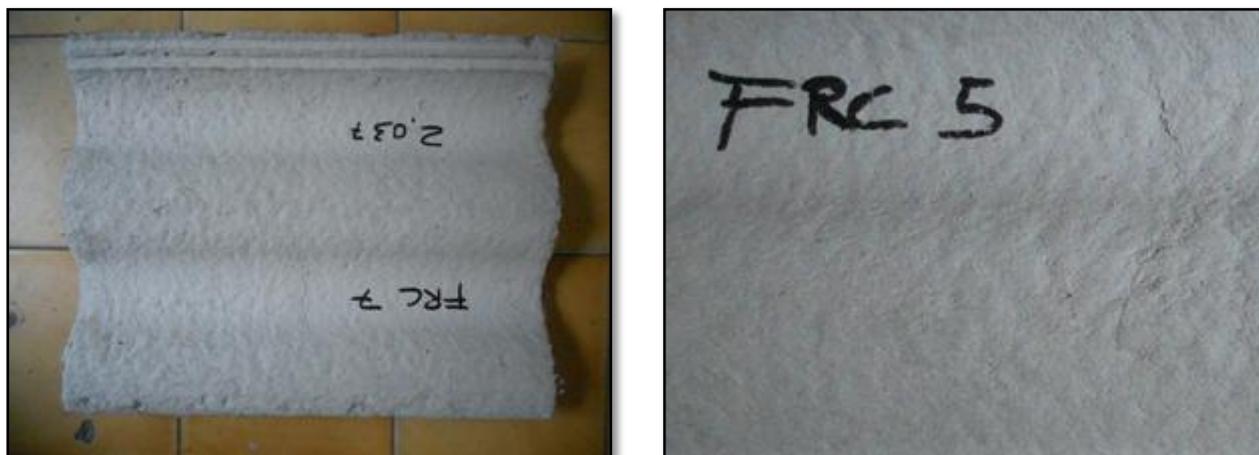


Figura 5.20 – Test di estrusione su profilo SW5 con l'introduzione di ADD1 – Modifica della mescolazione (SQM2)

In Figura 5.21 si mostrano i primi risultati per le prove di flessione a tre punti secondo la normativa attualmente in vigore [23] e [24]. Le prove sono eseguite sui campioni di tegole realizzati secondo le indicazioni riportate in precedenza. La tabella sottostante riepiloga i valori numerici misurati durante i test con indicazione di deviazione standard, valore medio e coefficiente di variazione per il campione di valori analizzato.

Tabella 5.1 – Valori misurati durante i test di flessione a tre punti

Nr	Specimen	TPBT span	Fmax (A)	dS @ Fmax	Weight (B)	Tile Thickness (C)	Specific Strength (A/B)	Specific Weight (B/C)
-	-	mm	N	mm	kg	mm	N/kg	kg/mm
126	FRC-01	260	969	3,2	2,073	8,52	467	0,243
127	FRC-02	260	916	2,7	2,050	8,57	447	0,239
128	FRC-03	260	938	3,4	2,025	8,21	463	0,247
129	FRC-04	260	989	2,7	2,075	8,07	477	0,257
130	FRC-05	260	938	2,7	2,122	8,50	442	0,250
131	FRC-06	260	899	2,8	2,032	8,04	442	0,253
132	FRC-07	260	913	2,8	2,037	8,40	448	0,243
133	FRC-08	260	947	3,1	2,099	8,60	451	0,244
		Std Dev	29,9	0,271	0,034	0,226	12,8	0,006
		Average	939	2,9	2,064	8,36	455	0,247
		Coeff. Var.	3,2%	9,3%	1,7%	2,7%	2,8%	2,4%

I dati mostrano chiaramente come sia necessario lavorare ulteriormente sulla composizione della miscela, ed eventualmente sulla sequenza di mescolazione, al fine di trovare il giusto compromesso tra qualità della superficie, peso e resistenza ultima del manufatto.

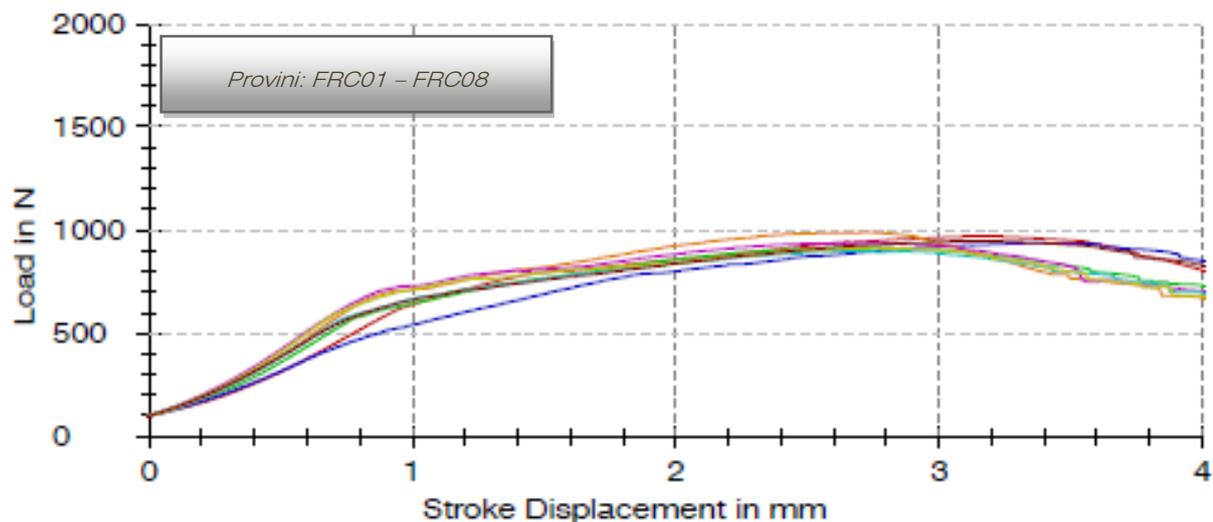


Figura 5.21 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione di ADD1 – Modifica della mescolazione (SQM2)

5.4. PERFEZIONAMENTO DEL PRODOTTO ESTRUSO

Nei paragrafi seguenti si illustrano i passaggi della sperimentazione che hanno consentito di migliorare la qualità del prodotto estruso sia in termini di aspetto esteriore sia in termini di proprietà meccaniche.

È necessario sottolineare che non tutte le mescole riportate nel seguito hanno consentito di realizzare un numero di campioni sufficiente da poter essere analizzato in laboratorio. Talvolta infatti il prodotto estruso non presentava le caratteristiche idonee sia all'esecuzione dei test sia a giustificare un'analisi approfondita.

Ognuna delle tabelle seguenti illustra le tipologie di miscele sviluppate al fine di migliorare le proprietà del prodotto estruso, in particolare vengono messi in evidenza:

- profilo installato sull'estrusore e distanza di settaggio tra rullo e supporto di alluminio;
- composizione della miscela;
- tipologia di additivo impiegato;
- sequenza di mescolazione;
- valutazione dei processi di mescolazione e di estrusione
- valutazione del comportamento della miscela all'interno del mescolatore trascorso un tempo di 20 minuti.

I test di flessione effettuati fino alla tipologia di miscela VH-T09 hanno dimostrato scadenti proprietà di resistenza a flessione che unitamente alla bassa resa estetica del prodotto hanno determinato lo sviluppo di soluzioni alternative, sia dal punto di vista della mescolazione sia dal punto di vista dell'impiego di additivi in combinazione e quantità diverse.



Tabella 5.2 – Perfezionamento del prodotto estruso – Parte I

Date	9th Nov. 2011							
Test No.		VH-Test1	VH-Test1'	VH-Test1''	VH-Test2	VH-Test3	VH-Test4	VH-Test5
Profile		SW5	SW5	SW5	SW5	SW5	SW5	SW5
Setting thickness[mm]		7	7	7	7	7	7	7
Composition	S/C	2	2	2	2	2	2	2
	W/C	0,25	0,33	0,40	0,33	0,32	0.45	0,33
	Fiber	PVA	PVA	PVA	PVA	PVA	PVA	PVA
	Additives	ADD1	ADD1	ADD1	ADD1	ADD1	ADD1 (x2)	ADD1/ADD2 1/1
	Cement[kg]	17	17	17	17	17	17	13,6
	ADD3							
	ADD4							
Mixing process		SQM2	SQM2	SQM2	SQM2 +1,5min	SQM3	SQM2 +1,0min	SQM4
Mixing Result +++Good +Bad	Ball size (Small=good)	+	+	++	+	+	+	++
	Fiber dispersion	+	+	++	+	+	+	+++
	Softness (Soft=good)	+	+	++	+	+	+	+
Extrude Result +++Good +Bad	Surface	+++	++	++	++	++	+	?
	Interlock	+	+	++	+	+	+	?
	Distributivity in head box	++	++	++	++	++	++	++
	20-min stability							

Tabella 5.3 – Perfezionamento del prodotto estruso – Parte II

Date		10th Nov. 2011			
Test No.		VH-Test6	VH-Test7	VH-Test8	VH-Test9
Profile		SW5	SW5	SW5	SW5
Setting thickness[mm]		7	7	7	7
Composition	S/C	2	2	2	2
	W/C	0,40	0,40	0,33	0,40
	Fiber	PVA	PVA	PVA	PVA
ADD1 e ADD2	ADD1 &/or ADD2	ADD1	ADD1	ADD1	ADD1
	Cement[kg]	17,0	17	17	17,0
ADD3	ADD3				ADD3
	ADD4				
Mixing process		SQM4	SQM4	SQM4	SQM2+1,5min
Mixing Result +++Good +Bad	Ball size (Small=good)	++	++	++	+
	Fiber dispersion	++	++	+	+
	Softness (Soft=good)	++	++	+	+++
Extrude Result +++Good +Bad	Surface	++	++	+	+++
	Interlock	+	++	+	+++
	Distributivity in head box	++	++	++	+
	20-min stability				



Tabella 5.4 – Perfezionamento del prodotto estruso – Parte III

Date		Additional Test in Kuraray lab (Dec 2011)						Test in VH lab (Dec 2011)	
Test No.		K-Test1	K-Test2	K-Test3	K-Test4	K-Test5	K-Test6	VH-Test10	VH-Test11
Profile		SW5	SW5	SW5	SW5	SW5	SW5	SW5	SW5
Setting thickness[mm]		7	7	7	7	7	7	7	7
Composition	S/C	2	2	2	2	2	2	2	2
	W/C	0,40	0,40	0.50*	0.50*	0.50*	0.50*	0.4	0.4
	Fiber	PVA	PVA	PVA	PVA	PVA	PVA	PVA	PVA
ADD1 e ADD2	ADD1 &/or ADD2	ADD1	ADD2	ADD1	ADD1	ADD2	ADD2	ADD1	ADD2
	Cement[kg]								
ADD3	ADD3			ADD3	ADD3 (x3/5)	ADD3 (x3/5)	ADD3 (x2/5)	ADD3 (x3/5)	ADD3 (x3/5)
	ADD4								
Mixing process				SQM4	SQM4	SQM4	SQM4	SQM4	SQM4
Mixing Result	Ball size (Small=good)	++	++	+	+	++	++	++	+++
+++Good	Fiber dispersion	++	+++	+	++	++	++	++	+
+Bad	Softness (Soft=good)	++	++	+++	+++	+++	++	++	++
Extrude Result	Surface							++	+++
+++Good	Interlock							+	+++
+Bad	Distributivity in head box							+	+++
	20-min stability								

Tabella 5.5 – Perfezionamento del prodotto estruso – Parte IV

Date		Test in VH lab 25th Jan. 2012				Test in VH lab 26th Jan. 2012		
Test No.		VH-Test12	VH-test13	VH-test14	VH-test15	VH-Test16	Ref.-1	Ref.-2
Profile		SW5	SW5	SW5	SW5	SW5	SW5	SW5
Setting thickness[mm]		7	7	7	7	7	7	7
Composition	S/C	2	1,8	2	2	2	3	2
	W/C	0,40	0,40	0,50	0,40	0,37	(0.17)	(0.15)
	Fiber	PVA	PVA	PVA	PVA	PVA	-	-
ADD1 e ADD2	ADD1 &/or ADD2	ADD2	ADD2	ADD2	ADD2(x0,5)	ADD2	-	-
	Cement[kg]							
ADD3	ADD3	ADD3K (x3/5)	ADD3K (x3/5)	ADD3K (x3/5)	ADD3K (x3/5)	ADD3K (x3/5)	-	-
	ADD4	-	-	-	-	-	-	-
Mixing process		SQM5	SQM5	SQM5	SQM5	SQM5	SQM1	SQM1
Mixing Result +++Good +Bad	Ball size (Small=good)	+++	+++	+	+	++	+++	+++
	Fiber dispersion	+++	+++	+++	++(+)	++	-	-
	Softness (Soft=good)	++(-)	++	+++	+++	++(-)	++	++
Extrude Result +++Good +Bad	Surface	+++	+++	+	+	+(+)	+++	+++
	Interlock	+++	+++	+	+	+(+)	+++	+++
	Distributivity in head box	+++	+++	+	+	+++	+++	+++
	20-min stability	-	+++	-	-	-	-	-

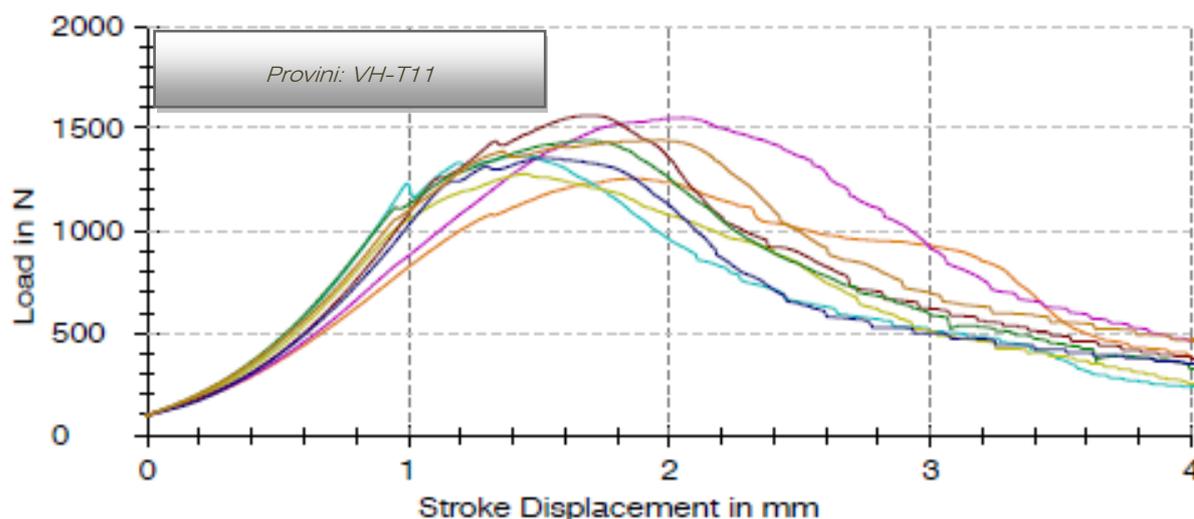


Figura 5.22 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3

L'impiego combinato di ADD2 e ADD3 (rif. VH-T11) ha apportato notevoli miglioramenti in termini di resistenza finale a flessione del prodotto. In Figura 5.22 si mostrano i risultati dei test di flessione eseguiti su di un campione costituito da n° 8 tegole. Il miglioramento conseguito dall'impiego combinato dei due additivi, in quantità diverse, ha consentito di raggiungere una resistenza media a flessione pari 1406 N, che rispetto al precedente valore medio pari a 939 N corrisponde ad un aumento del 49,7% (Tabella 5.6).

Tabella 5.6 – Valori misurati durante i test di flessione a tre punti – VH-T11

Nr	Specimen	TPBT span	Fmax (A)	dS @ Fmax	Weight (B)	Tile Thickness (C)	Specific Strength (A/B)	Specific Weight (B/C)
-	-	mm	N	mm	kg	mm	N/kg	kg/mm
143	VH-T11-01	260	1250	1,9	3,40	-	368	-
144	VH-T11-02	260	1550	2,1	3,56	-	435	-
146	VH-T11-08	260	1370	1,4	3,52	-	389	-
148	VH-T11-04	260	1280	1,4	3,46	-	370	-
145	VH-T11-03	260	1560	1,7	3,54	-	441	-
151	VH-T11-07	260	1440	1,7	3,46	-	416	-
149	VH-T11-05	260	1360	1,5	3,48	-	391	-
150	VH-T11-06	260	1440	2	3,44	-	419	-
	Std Dev		113,6	0,270	0,054	-	28,2	-
	Average		1406	1,7	3,483	-	404	-
	Coeff. Var		8,1%	15,7%	1,5%	-	7,0%	-

In Figura 5.23 è possibile osservare la qualità della superficie della tegola profilata ottenuta modificando il contenuto di additivi. Si può pertanto osservare un notevole miglioramento della planarità della superficie ondulata che non presenta di fatto rigonfiamenti localizzati o avvallamenti provocati da una mancanza di materiale.

Permane tuttavia una problematica legata alla dispersione di fibre non ottimale che causa spesso la fuoriuscita di agglomerati in superficie.

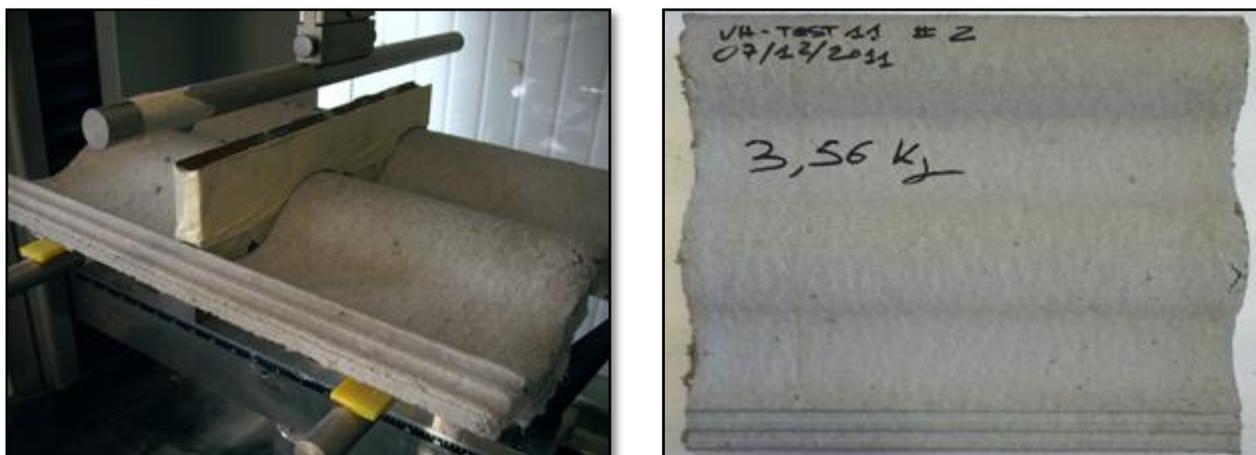


Figura 5.23 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3



Figura 5.24 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3 – Particolari che evidenziano la fuoriuscita superficiale di agglomerati di fibre

Si ritiene inoltre che la presenza di fibre non disperse nella matrice cementizia, che riduce il numero di fibre concorrenti attivamente allo sviluppo della resistenza a trazione del materiale, possa essere responsabile di una minore resistenza ultima a flessione.

La procedura di mescolazione è stata di conseguenza variata ulteriormente al fine di migliorare la dispersione delle fibre nell'impasto (rif. SQM5).

In Figura 5.25 si mostrano i risultati dei test di flessione eseguiti su di un campioni costituito da n° 3 tegole. L'ulteriore miglioramento conseguito dall'impiego combinato



dei due additivi, in concomitanza con una procedura di mescolazione in grado di consentire una maggiore dispersione delle fibre di rinforzo, ha consentito di raggiungere una resistenza media a flessione pari 1630 N, che rispetto al precedente valore medio pari a 1406 N (Tabella 5.6) corrisponde ad un aumento del 16% (Tabella 5.7).

In Figura 5.26 e Figura 5.27 è possibile osservare la completa assenza di agglomerati di fibre situati sulla superficie della tegola.

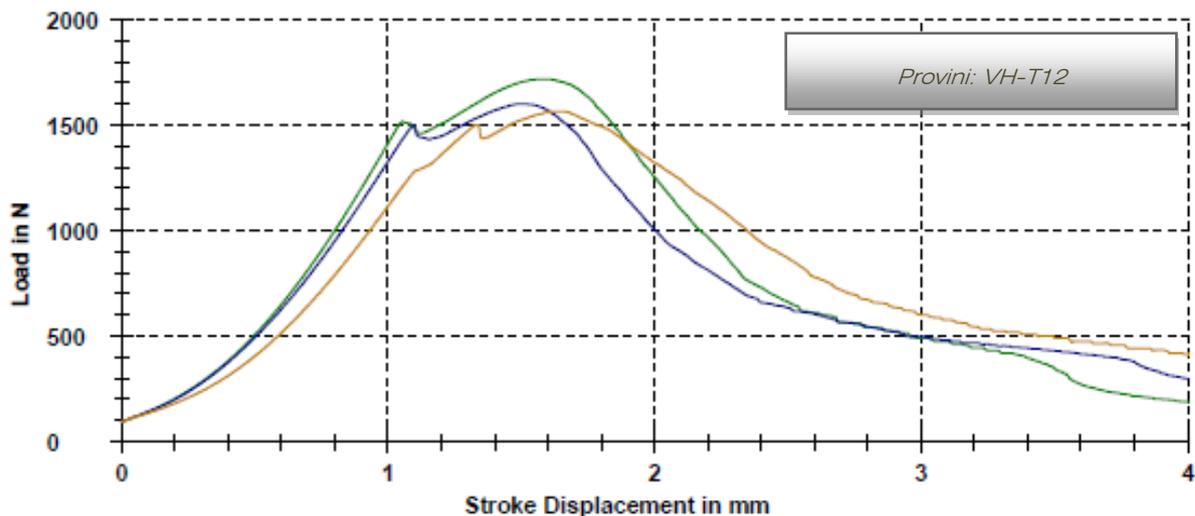


Figura 5.25 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3 – Procedura di mescolazione modificata (SQM5)

Tabella 5.7 – Valori misurati durante i test di flessione a tre punti – VH-T12

Nr	Specimen	TPBT span	Fmax (A)	dS @ Fmax	Weight (B)	Tile Thickness (C)	Specific Strength (A/B)	Specific Weight (B/C)
-	-	mm	N	mm	kg	mm	N/kg	kg/mm
163	VH-T12-03	260	1720	1,6	3,54	-	486	-
164	VH-T12-05	260	1600	1,5	3,54	-	452	-
165	VH-T12-04	260	1570	1,6	3,46	-	454	-
Std Dev			79,4	0,058	0,046	-	19,1	-
Average			1630	1,6	3,513	-	464	-
Coeff. Var.			4,9%	3,7%	1,3%	-	4,1%	-

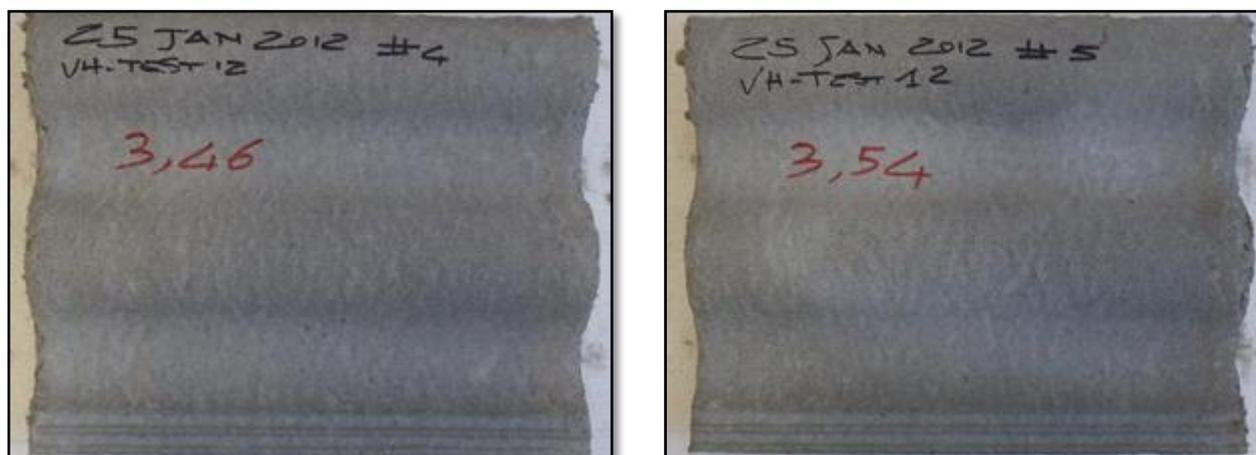


Figura 5.26 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3 – Procedura di mescolazione modificata (SQM5)



Figura 5.27 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3 – Particolari che evidenziano la buona qualità delle zone aventi forma complessa – Procedura di mescolazione modificata (SQM5)

5.5. CONCLUSIONI

La “ingegnerizzazione” svolta, sulla base delle attività sperimentali riportate nei capitoli precedenti, mostra grande importanza agli effetti prodotti dalle procedure di mescolazione e dalle tipologie di additivi impiegate.

Infatti se questi aspetti risultano essere di marginale importanza nella realizzazione di campioni estrusi aventi sezione rettangolare, da impiegare in laboratorio, al contrario le procedure di estrusione con macchinari industriali si sono dimostrate essere estremamente sensibili sia alla variazione di composizione sia alla procedura di mescolazione.

Passo dopo passo quindi, prima modificando gli additivi impiegati e successivamente integrando questi test con modifiche della sequenza di mescolazione è stato possibile risolvere in modo esauriente le problematiche di: dispersione delle fibre nella matrice cementizia; di scorrevolezza del materiale mescolato all'interno della cassa di

estrusione e di qualità superficiale della tegola, sia per ciò che concerne l'assenza di asperità superficiali e localizzate nelle zone perimetrali sia per quanto riguarda la ripetibilità del risultato ottenuto.

In Figura 5.28 è possibile osservare l'evoluzione dei risultati ottenuti in termini di qualità superficiale a partire dalle miscele sviluppate in laboratorio (F09-PVA19) per finire con gli ultimi risultati dell'ingegnerizzazione del prodotto estruso (VH-T12)

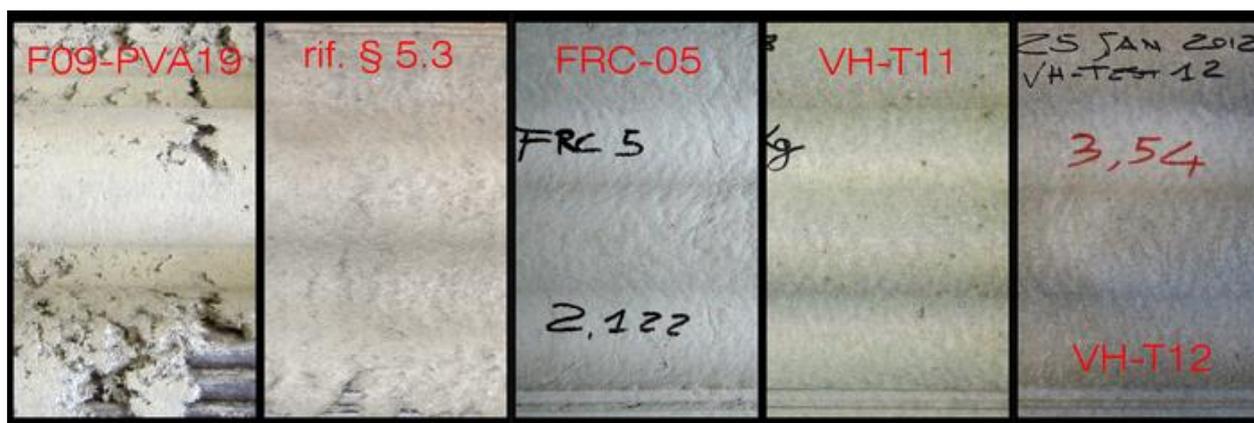


Figura 5.28 – Evoluzione della qualità della superficie del prodotto estruso a partire dai test preliminari effettuati con le miscele sviluppate in laboratorio (F09-PVA19) per finire con i risultati dell'ingegnerizzazione del prodotto estruso (VH-T12)

In termini di resistenza ultima a flessione è altrettanto possibile concludere che le modifiche effettuate alla miscela, prendendo come riferimento i test effettuati in fase preliminare (§5.3 Interventi inerenti i materiali componenti la miscela, rif. Tabella 5.1) hanno consentito di ottenere un aumento di forza ultima pari al 74%, corrispondente ad un valore medio misurato della forza pari a 1630 N. Il valore di resistenza finale sino ad ora raggiunto è estremamente promettente. Si ricorda infatti che l'obiettivo prescritto in base alle normative europee [23] e [24] per tegole profilate è pari a 2000 N.

I risultati ottenuti sono dunque incoraggianti al proseguimento del programma di ricerca che mira allo sviluppo di prodotti estrusi fibrorinforzati di peso ridotto ed aventi maggiore duttilità. Si può di fatto concludere che gli obiettivi di funzionalità del prodotto e di qualità della superficie estrusa sono stati perseguiti. Relativamente alle prospettive di commercializzazione del prodotto, pur avendo riscontrato un aumento del 74% in termini di resistenza ultima rispetto ai test preliminari, è da perseguire un ulteriore aumento di resistenza finale pari al 21% ed una diminuzione di peso pari al 15% che garantirebbe un esteso mercato per applicazioni in coperture civili alleggerite.

I futuri sviluppi della ricerca saranno dunque dedicati allo sviluppo di prodotti di maggiore resistenza, lavorando ulteriormente sulla composizione della miscela a base cementizia, sulla sequenza di mescolazione e sull'impiego di estrusori aventi casse di estrusione di dimensioni maggiorate (5.2 Interventi inerenti la meccanica dell'estrusore).

- [1] A. Bernini, A. Bucchi, D Capuani, A. Tralli, N. Tullini, "Primi risultati di una campagna sperimentale volta a caratterizzare lastre sottili estruse realizzate con malte rinforzate con fibre corte", *AIAS 2009*, Torino, 9-11 Settembre 2009.
- [2] A. Bernini, N. Tullini, A. Tralli, "Verifiche sperimentali di prodotti industriali a base cementizia rinforzati con microfibre polimeriche", *AIAS 2010*, Maratea (UNICAL), 7-10 Settembre 2010.
- [3] Fischer, G. and Li, V. C. (2002a). "Influence of matrix ductility on the tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC)." *ACI Structures J.*, 99 (1), 104-111;
- [4] Fukuyama, H., Masuda, Y., Sonobe, Y. and Tanigaki, M. (1995). "Structural performances of concrete frame reinforced with FRP reinforcement." Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, *Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2)*, E&FN Spon, London, 275-286.
- [5] Fischer, G. and Li, V. C. (2003a). "Deformation behavior of fiber-reinforced polymer reinforced engineered cementitious composite (ECC) flexural members under reversed cyclic loading conditions." *ACI Structures J.*, 100 (1), 25-35.
- [6] Li, V. C. (1997). "Damage tolerance of engineered cementitious composites." *Advances in Fracture Research, Proc. 9th ICF Conference on Fracture*, Sydney, Australia, Ed. B.L. Karihaloo, Y.W. Mai, M.I. Ripley and R.O. Ritchie, Pub. Pergamon, UK, 619-630.
- [7] Horii, H., Matsuoka, S., Kabele, P., Takeuchi, S., Li, V.C. and Kanda, T. (1998). "On the prediction method for the structural performance of repaired/retrofitted

- structures.” in: *Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceedings FRAMCOS-3*, AEDIFICATIO Publishers, D-79104 Freiburg, Germany, 1739-1750.
- [8] Parra-Montesinos, G. and Wight, J. K. (2000). “Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections.” *ASCE Journal of Structural Engineering*, 126 (10), 1113-1121.
- [9] Victor C. Li, “Advances in ECC research”, *The ACE-MRL, Department of Civil and Environmental Engineering* The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125, pp. 1-28.
- [10] Victor C. Li, “On Engineered Cementitious Composites (ECC)”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, November 2003 Vol. 1, No. 3, 215-230.
- [11] K.E. Kenser, S.L. Billington, K.S. Douglas, “Cyclic response of highly ductile fiberreinforced cement- based composite”, *ACI Materials Journal*, 2003, 100, (5), pp. 381-390.
- [12] Y. Mohammadi, S.P. Singh, S.K. Kaushik “ Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state”, *Construction and Building Materials*, 2008, 22, (5), pp. 956-965.
- [13] L.R.Betterman, C. Ouyang, S.P. Shah “Fiber-matrix interaction in microfiber reinforced mortar” *Advanced Cement Based Materials*, 1995, 2, (2), pp. 53-61.
- [14] N. Banthia and J. Sheng “Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites” *Cement and Concrete Composites*, 1996, 18, (4), pp. 250-269.
- [15] H. Stang, Victor C. Li, “Extrusion of ECC-material”, *Proceedings of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3 (HPFRCC 3)*, H. Reinhardt and A. Naaman, eds., Chapman & Hull, 1999, pp. 203-212.
- [16] Alva Peled, Michele F. Cyr, Surendra P. Shah, “High content of Fly Ash (Class F) in Extruded Cementitious Composites”, *Aci Materials Journal*, September/October 2000, pp. 509-517.
- [17] Don de Koker, Gpag van Zijl, “Extrusion of engineered cement-based composite material”, *6th RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (FRC)*, BEFIB 2004, pp. 1301-1310.
- [18] A. Schwartzentruber, M. Philippe G. Marchese “Effect of PVA, glass and metallic fibers, and of an expansive admixture on the cracking tendency of ultrahigh strength mortar” *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26, (5) , pp. 573-580.



- [19] CNR-DT 204, “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato”
- [20] UNI U73041440, “Progettazione, esecuzione e controllo degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con fibre d’acciaio”.
- [21] UNI EN 1992-1-1, “Progettazione delle strutture in calcestruzzo – Parte 1-1: Regole generali e e regole per gli edifici”.
- [22] UNI EN 1015–11:2001, “Metodi di prova per malte per opere murarie – Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita”.
- [23] UNI EN 490, “Tegole di calcestruzzo e relativi accessori per coperture e rivestimenti murari – Specifiche di prodotto”.
- [24] UNI EN 491, “Tegole di calcestruzzo e relativi accessori per coperture e rivestimenti murari – Metodi di prova”.
- [25] UNI EN 1015–11:2001, “Metodi di prova per malte per opere murarie – Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita”.
- [26] UNI EN 933–1:1999, “Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati – Determinazione della distribuzione granulometrica – Analisi granulometrica per stacciatura”.
- [27] UNI EN 933–2:1997, “Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati – Determinazione della distribuzione granulometrica – Stacci di controllo, dimensioni nominali delle aperture”.
- [28] UNI EN 1015–1:2000, “Metodi di prova per malte per opere murarie – Determinazione della distribuzione granulometrica (mediante stacciatura)”.
- [29] UNI EN 1097–5: 2002, “Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati – Determinazione del contenuto d'acqua per essiccazione in forno ventilato”.
- [30] UNI EN 1097–6:2002, “Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati – Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua”.
- [31] CNR-DT 204, “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato”



C

curva granulometrica 58

D

distribuzione granulometrica Vedi curva granulometrica

E

ECC 6; 33; 35

elementi di copertura 24

Engineered Cementitious Composites Vedi ECC

estrusione 24

estrusore 25; 57

F

First Crack Strength 72

H

Hatschek 12

K

Kuraray Co 4; 38

L

lastre piane Vedi tegole piane

Ludwig Vedi Hatschek

P

PAN 12; 60

poliacrilonitrili Vedi PAN

Polivinylalcohol Vedi PVA

Post Peak Strength 72

pressa a cordone 19

prima fessurazione Vedi *First Crack Strength*

PVA 5; 39; 46; 60

R

rullo rotante 50

S

sistema Hatschek 29

Strain Hardening 5; 72; Vedi

Strain Softening 37

T

tegole ondulate 52

tegole piane 52

U

UNO 300 Vedi Estrusore

<i>Figura 1 – Esempi di collasso strutturale della struttura di copertura di edifici in muratura avvenuti durante il terremoto dell’Aquila il 6 aprile 2009</i>	3
<i>Figura 1.1 – (a) Pressa per mattoni di Schlickeysen, (b) Marsigliese e coppo di Ludowici, 1881 e 1882</i>	11
<i>Figura 1.2 – (a) Struttura portante a capriata, (b) con aggiunta di controcatena</i>	14
<i>Figura 1.3 – (a) Struttura portante ad arcarecci, (b) particolare del nodo di connessione dei puntoni, (c) particolare dell’appoggio dei puntoni alla sottostruttura</i>	15
<i>Figura 1.4 – (a) Struttura portante massiccia, (b) particolare dello schema statico per il trasferimento dei carichi</i>	15
<i>Figura 1.5 – (a) Principio del rivestimento a superficie piana, (b) principio del rivestimento con impiego di coppi o tegole</i>	17
<i>Figura 1.6 – (a) Lastre quadrate e rettangolari, (b) lastre ad angolo acuto, (c) lastre ad arco, (d) lastre a squame</i>	17
<i>Figura 1.7 – Esempio di copertura doppia (a) Lastre quadrate e rettangolari, (b) lastre a squame</i>	18
<i>Figura 1.8 – Esempio di tegole in calcestruzzo a doppia conca</i>	19
<i>Figura 1.9 – Esempio di tegole sagomate a Doppia Romana (a) e (c) ed esempio di finitura superficiale liscia per applicazioni in paesi del Sud Est Asiatico (b)</i>	20
<i>Figura 1.10 – Esempio di disposizione di tegole sulla sottostruttura, (a) nella zona di colmo, (b) in pianta e sui travetti</i>	20
<i>Figura 1.11 – Diverse inclinazioni del tetto possibili con i sistemi di copertura a tegole, (a) per sistemi di copertura di tipo a superficie piana, (b) per sistemi di copertura a tegole o coppi piani o ondulati</i>	21
<i>Figura 1.12 – (a) esempio di lastra ondulata in fibrocemento, (b) particolare costruttivo per ancoraggio delle lastre nella zona di colmo, (c) sporgenza delle lastre nella zona di gronda del tetto</i>	22
<i>Figura 1.13 – Tipologia di elementi di copertura e loro materiali (parte a)</i>	23
<i>Figura 1.14 – Tipologia di elementi di copertura e loro materiali (parte b)</i>	24

<i>Figura 1.15 – Estrusori ad azione continua di moderna generazione</i>	25
<i>Figura 1.16 – Estrusori ad azione continua di moderna generazione, particolare della testa di estrusione (a) e particolare del motore di azionamento della spinta (b)</i>	25
<i>Figura 1.17 – (a) Testata dell'estrusore con stampo metallico di formatura in uscita, (b) particolare del coltello ad azione alternativa successivamente alla fase di formatura e (c) rullo formatore dei manufatti</i>	26
<i>Figura 1.18 – (a) Sistema di taglio automatico per estrusori ad alta capacità produttiva</i>	26
<i>Figura 1.19 – Disegno tecnico con indicate dimensioni di massima di un estrusore a 40 tegole per minuto</i>	27
<i>Figura 1.20 – Tecnologia odierna impiegata per la produzione di pannelli ondulati per mezzo del sistema Hatschek</i>	29
<i>Figura 2.1 – Principali fasi dalla produzione e vendita dei prodotti industriali</i>	34
<i>Figura 2.2 – Curva sforzi-deformazioni per la prova di trazione uniassiale di provini realizzati in ECC rinforzati con fibre in PVA al 2% in frazione di volume</i>	35
<i>Figura 2.3 – Curva $\sigma - \delta$ (Li 1992b; Li et al.1993; Lin and Li 1997</i>	37
<i>Figura 2.4 – Confronto tra la propagazione della frattura di tipo Griffith e Steady State Crack Opening</i>	38
<i>Figura 2.5 – Effetto dei diversi trattamenti superficiali sulle fibre al termine di una prova di trazione diretta</i>	39
<i>Figura 2.6 – Effetto dei diversi trattamenti superficiali sulle fibre al termine di una prova di trazione diretta</i>	39
<i>Figura 2.7 – Effetto di protezione da danni superficiali da sfilamento ottenuto applicando gli agenti chimici modificatori di aderenza. (a) in assenza di agente modificatore di resistenza allo sfilamento e (b) in presenza del giusto quantitativo di agente modificatore</i>	40
<i>Figura 2.8 – Comportamento ad isteresi di una colonna soggetta a carico ciclico rinforzata tradizionalmente (a) e con materiali ECC in assenza di staffe trasversali. Maggiore assorbimento di energia, comportamento ad isteresi stabile e minori danni osservabili nel secondo caso (b) anche in assenza di armature di rinforzo</i>	41
<i>Figura 2.9 – Comportamento a rottura di un pilastro rinforzato con tradizionali armature metalliche (a) e di un pilastro rinforzato con materiali ECC senza staffe trasversali. In tutti e due i casi è stato imposto uno spostamento laterale che nel primo caso ha comportato l'espulsione del calcestruzzo superficiale e la disgregazione dello stesso anche nella zona interna alle staffe di rinforzo, mentre nel secondo caso (b) il pilastro presenta una fessurazione diffusa</i>	42
<i>Figura 2.10 – Test di trazione diretta di un provino in calcestruzzo tradizionale al quale sono stati applicati rinforzi esterni costituiti di materiale ECC. La grande capacità di deformazione del materiale ECC è in grado di sopperire alla deformazione imposta alla struttura composta riflettendosi nella generazione di multi fessure avvicinate</i>	43
<i>Figura 2.11 – Compatibilità delle deformazioni tra matrice ECC e rinforzo metallico (a) rispetto al rinforzo metallico inserito nel calcestruzzo tradizionale (b). Nel primo caso il carico può essere trasferito all'interno della matrice e di conseguenza alle armature metalliche per mezzo delle fibre, nel secondo caso la rottura fragile del calcestruzzo concentra gli sforzo in prossimità della zona di interfaccia causando la disconnessione tra armatura e matrice</i>	44
<i>Figura 2.12 – Comportamento a rottura di travi parete dopo l'applicazione di carico ciclico. La colonna con rinforzo metallico tradizionale a sinistra mostra l'espulsione di calcestruzzo nelle</i>	



<i>zone laterali nelle zone in cui la trave in acciaio si connette. Si possono inoltre osservare le fratture che si originano durante la rottura. Al contrario la colonna realizzata in materiale ECC non presenta zone di espulsione del calcestruzzo e giunge a rottura mostrando una fessurazione diffusa.</i>	45
<i>Figura 3.1 – Estrusore con cilindro conformato per la realizzazione di tegole ondulate – particolare della testata di estrusione</i>	51
<i>Figura 3.1 – Estrusore di tegole ondulate – particolare dei coltelli per il taglio trasversale</i>	51
<i>Figura 3.2 – Estrusore con cilindro conformato per la realizzazione di lastre piane – particolare della testata di estrusione</i>	51
<i>Figura 3.3 – Estrusore con cilindro conformato per la realizzazione di lastre piane – particolare dei coltelli per il taglio trasversale e della tramoggia di carico</i>	52
<i>Figura 3.4 – Esempio di tegola in calcestruzzo ondulata profilata a Doppia Romana (a) ed esempio di tegola piana in calcestruzzo del tipo Self Stacking (b)</i>	52
<i>Figura 3.5 – Mescolatore planetario di 250 lt (a), planetario e pale del rotore all'interno della vasca di mescolazione (b)</i>	53
<i>Figura 3.6 – Ugelli per l'introduzione dell'acqua all'interno della vasca di mescolazione</i>	53
<i>Figura 3.7 – Sistema di mescolazione a vite continuo (installato presso Vortex Hydra s.r.l.)</i>	54
<i>Figura 3.8 – Sistema di mescolazione a vite continuo – particolare della zona di mescolazione (installato presso Vortex Hydra s.r.l.)</i>	54
<i>Figura 3.9 – Mescolatore impiegato nella sperimentazione</i>	55
<i>Figura 3.10 – Mescolatore impiegato nella sperimentazione – fase di introduzione delle fibre e omogeneizzazione</i>	55
<i>Figura 3.11 – Estrusore a spinta alternativa ed azionamento semi-automatico modello UNO 300, particolare del rullo compressore (a) e dei coltelli per l'esecuzione del taglio trasversale (b)</i>	56
<i>Figura 3.12 – Estrusore a spinta alternativa ed azionamento semi-automatico modello UNO 300, vista generale (a) e particolare della zona di spinta (b)</i>	56
<i>Figura 3.13 – Estrusore modello UNO 300 (per gentile concessione di Vortex Hydra s.r.l.)</i>	57
<i>Figura 3.14 – Confronto tra la distribuzione granulometrica impiegata per la realizzazione dei manufatti e la distribuzione granulometrica generalmente impiegata per la realizzazione delle malte ECC</i>	58
<i>Figura 3.15 – Fase di estrusione di piastre piane</i>	62
<i>Figura 3.16 – Fase di taglio delle piastre in uscita dall'estrusore</i>	62
<i>Figura 3.17 – Preparazione delle piastre all'immersione in vasca termostata</i>	63
<i>Figura 3.18 – Maturazione delle piastre in acqua a 20°C</i>	63
<i>Figura 3.19 – Sega a disco diamantato impiegata per il taglio delle piastre e disposizione dei provini per le operazioni di pesatura e misurazione</i>	64
<i>Figura 3.20 – Catalogazione dei provini e pesatura</i>	64
<i>Figura 3.21 – Zwick/Roell Allround line Z100 Material Testing Machine (a) e Instron 4467 (b)</i>	65
<i>Figura 3.22 – Prove di flessione a tre punti con lettura dell'abbassamento del punto di applicazione della forza</i>	66

<i>Figura 3.23 – Prove di flessione a tre punti con lettura dell'abbassamento del punto di applicazione della forza e dell'apertura della bocca di intaglio.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 3.24 – Prove di flessione a tre punti con lettura dell'abbassamento del punto di applicazione della forza e dell'apertura della bocca di intaglio – zona di mezzeria del provino in cui è stato applicato il trasduttore di spostamento</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3.25 – Prove di compressione retta su prismi</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3.26 – Prove di compressione retta su prismi – particolare del provino al termine del test</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.27 – Prove di trazione diretta, vista generale (a) e particolare del provino fessurato al termine della prova (b).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.28 – Prove di trazione diretta – particolare della zona di ancoraggio del provino ai supporti di acciaio.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.29 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=2$.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.30 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=1.5$.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.31 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=1$.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 3.32 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=0.75$.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 3.33 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=0.50$.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.34 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=2$.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3.35 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=1.5$.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3.36 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=1,00$.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.37 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=0.75$.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.38 – Curve tensione nominale/spostamento al variare della percentuale di fibre per i provini con rapporto $s/c=0.50$.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.39 – Curve forza/spostamento al variare del rapporto s/c per i provini con quantità di fibre pari a 1.5%.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 3.40 – Curve forza/spostamento al variare del rapporto s/c per i provini con quantità di fibre pari a 2.0%.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.41 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=1.0$.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.42 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=0.75$.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 3.43 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=0.5$.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 3.44 – Curve tensione nominale/spostamento per provini aventi rapporto $s/c=0.75$ e frazione di volume di fibre pari al 2%.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 3.45 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=1.0$.....</i>	<i>82</i>



<i>Figura 3.46 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=0.75$.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 3.47 – Grafici tensione nominale/percentuale di fibre per valori $s/c=0.5$.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 3.48 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di compressione retta per valori del rapporto $s/c=1,00$ – base di misura pari a 60 mm.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 3.49 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di compressione retta per valori del rapporto $s/c=0,75$ – base di misura pari a 60 mm.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 3.50 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di compressione retta per valori del rapporto $s/c=0,50$ – base di misura pari a 60 mm.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 3.51 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di flessione a tre punti per valori del rapporto $s/c=1,00$ – base di misura pari a 20 mm.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 3.52 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di flessione a tre punti per valori del rapporto $s/c=0,75$ – base di misura pari a 20 mm.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 3.53 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di flessione a tre punti per valori del rapporto $s/c=0,50$ – base di misura pari a 20 mm.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 3.54 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di trazione diretta per valori di $s/c=1,00$ – base di misura pari a 160 mm.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 3.55 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di trazione diretta per valori di $s/c=0,75$ – base di misura pari a 160 mm.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 3.56 – Curve tensione nominale/spostamento per le prove di trazione diretta per valori di $s/c=0,50$ – base di misura pari a 160 mm.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4.1 – Definizione della resistenza residua puntuale e media in una prova di flessione (a, sinistra) e soluzione grafica delle equazioni di equilibrio per la sezione soggetta a prova di flessione (b, destra).....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.2 – Modello A, viene ipotizzata una distribuzione rettangolare delle tensioni nella zona tesa della sezione. La forza di compressione che garantisce l'equilibrio della sezione alla traslazione si suppone sia concentrata al lembo compresso della stessa, conseguenza anche della buona resistenza a compressione.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4.3 – Modello B, viene ipotizzata una distribuzione triangolare delle tensioni nella zona tesa della sezione. La forza di compressione che garantisce l'equilibrio della sezione alla traslazione si suppone sia concentrata al lembo compresso della stessa, conseguenza anche della buona resistenza a compressione.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4.4 – Modello C, viene ipotizzata una distribuzione triangolare delle tensioni nella zona tesa della sezione. La forza di compressione che garantisce l'equilibrio della sezione alla traslazione si suppone sia concentrata al lembo compresso della stessa, conseguenza anche della buona resistenza a compressione.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4.5 – Confronto tra i dati sperimentali e risultati dei due modelli interpretativi nel caso del Modello A.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4.6 – Confronto tra i dati sperimentali e risultati dei due modelli interpretativi nel caso del Modello B.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4.7 – Confronto tra i dati sperimentali e risultati dei due modelli interpretativi nel caso del Modello C.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 5.1 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA05 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61).....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5.2 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA05 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61).....</i>	<i>103</i>

<i>Figura 5.3 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA05 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61) – (a) particolare della zona di taglio, (b) particolare della zona di interlock della tegola.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5.4 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA05 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61) – Dispersione delle fibre durante le operazioni di mescolazione.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5.5 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA05 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61) – Supporto di alluminio crepato a causa delle elevate pressioni di esercizio</i>	<i>105</i>
<i>Figura 5.6 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA14 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61) – Miglioramento dell'aspetto superficiale e della zona di interlocking per merito della riduzione della frazione inerte nella miscela</i>	<i>105</i>
<i>Figura 5.7 – Test preliminari di estrusione - F09-PVA19 (rif. Tabella 3.3 a pagina 61) – Aumento eccessivo della lavorabilità a causa dell'aumento della quantità di cemento nella miscela</i>	<i>106</i>
<i>Figura 5.8 – Testata di estrusione tradizionale per profili piani installata su UNO300.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 5.9 – scorrimento non ottimale del materiale all'interno della cassa di estrusione e conseguente risultato di estrusione di una miscela viscosa</i>	<i>108</i>
<i>Figura 5.10 – Imperfezioni superficiali su provini induriti causate da uno scorrimento non ottimale del materiale all'interno della cassa di estrusione.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 5.11 – Sezione laterale della cassa di estrusione con predisposizione per rullo di diametro 200 millimetri</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5.12 – Sezione laterale della cassa di estrusione con predisposizione per rullo di diametro 280 millimetri</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5.13 – Vista in pianta della cassa di estrusione con predisposizione per rulli di tre diametri diversi.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 5.14 – Cassa di estrusione modificata alloggiare rulli piani di diverso diametro, (b) con diversi colori vengono evidenziate il supporto di contro sagoma (rosso) e il rullo compressore (blu).....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 5.15 – Cassa di estrusione, (a) particolare del rullo e (b) zona di alloggiamento della motorizzazione con riduttore di giri</i>	<i>111</i>
<i>Figura 5.16 – Test di mescolazione con l'introduzione di ADD1</i>	<i>112</i>
<i>Figura 5.17 – Test di estrusione su profilo SW5 con l'introduzione di ADD1.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 5.18 – Test di estrusione su profilo SW5 con l'introduzione di ADD1 – Tegole indurite</i>	<i>113</i>
<i>Figura 5.19 – Test di estrusione su profilo SW5 con l'introduzione di ADD1 – Spessore ridotto</i>	<i>114</i>
<i>Figura 5.20 – Test di estrusione su profilo SW5 con l'introduzione di ADD1 – Modifica della mescolazione (SQM2).....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 5.21 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione di ADD1 – Modifica della mescolazione (SQM2).....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 5.22 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 5.23 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 5.24 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3 – Particolari che evidenziano la fuoriuscita superficiale di agglomerati di fibre.....</i>	<i>122</i>



- Figura 5.25 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3 – Procedura di mescolazione modificata (SQM5) 123*
- Figura 5.26 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3 – Procedura di mescolazione modificata (SQM5) 124*
- Figura 5.27 – Test di flessione a tre punti su profilo SW5 con l'introduzione combinata di ADD2 e ADD3 – Particolari che evidenziano la buona qualità delle zone aventi forma complessa– Procedura di mescolazione modificata (SQM5) 124*
- Figura 5.28 – Evoluzione della qualità della superficie del prodotto estruso a partire dai test preliminari effettuati con le miscele sviluppate in laboratorio (F09-PVA19) per finire con i risultati dell'ingegnerizzazione del prodotto estruso (VH-T12) 125*

DICHIARAZIONE DI CONFORMITÀ

Come specificato dalle regolamentazioni di Ateneo, di seguito viene riportata la dichiarazione di conformità con embargo, firmata e inserita come parte integrante della tesi in formato cartaceo.

Indirizzo e-mail: alessandro.bernini@unife.it

Oggetto: Dichiarazione di conformità della tesi di Dottorato

Io sottoscritto Dott. (Cognome e Nome): Bernini Alessandro

Nato a: Mantova

Provincia: Mantova

Il giorno: 02/05/1981

Avendo frequentato il Dottorato di Ricerca in: [706] - SCIENZE DELL'INGEGNERIA

Ciclo di Dottorato: 24

Titolo della tesi (in lingua italiana): Progetto ed ingegnerizzazione di prodotti industriali estrusi a base cementizia rinforzati con microfibre polimeriche

Titolo della tesi (in lingua inglese): -

Tutori: Proff. (Cognome e Nome):

Prof. Tralli Antonio e Prof. Tullini Nerio

Settore Scientifico Disciplinare (S.S.D.): ICAR 08

Parole chiave della tesi (max 10): ECC FRC PVA MICROFIBRE POLIMERICHE

Consapevole, dichiara:

CONSAPEVOLE: (1) del fatto che in caso di dichiarazioni mendaci, oltre alle sanzioni previste dal codice penale e dalle Leggi speciali per l'ipotesi di falsità in atti ed uso di atti falsi, decade fin dall'inizio e senza necessità di alcuna formalità dai benefici conseguenti al provvedimento emanato sulla base di tali dichiarazioni; (2) dell'obbligo per l'Università di provvedere al deposito di legge delle tesi di dottorato al fine di assicurarne la conservazione e la consultabilità da parte di terzi; (3) della procedura adottata dall'Università di Ferrara ove si richiede che la tesi sia consegnata dal dottorando in 4 copie di cui una in formato cartaceo e tre in formato pdf, non modificabile su idonei supporti (CD-ROM, DVD) secondo le istruzioni pubblicate sul sito : <http://www.unife.it/studenti/dottorato> alla voce ESAME FINALE – disposizioni e modulistica; (4) del fatto che l'Università sulla base dei dati forniti, archiverà e renderà consultabile in rete il testo completo della tesi di dottorato di cui alla presente dichiarazione attraverso l'Archivio istituzionale ad accesso aperto "EPRINTS.unife.it" oltre che attraverso i Cataloghi delle Biblioteche Nazionali Centrali di Roma e Firenze. DICHIARO SOTTO LA MIA RESPONSABILITA': (1) che la copia della tesi depositata presso l'Università di Ferrara in formato cartaceo, è del tutto identica a quelle presentate in formato elettronico (CD-ROM, DVD), a quelle da inviare ai Commissari di esame finale e alla copia che produrrà in seduta d'esame finale. Di conseguenza va esclusa qualsiasi responsabilità dell'Ateneo stesso per quanto riguarda eventuali errori, imprecisioni o omissioni nei contenuti della tesi; (2) di prendere atto che la tesi in formato cartaceo è l'unica alla quale farà riferimento l'Università per rilasciare, a mia richiesta, la dichiarazione di conformità di eventuali copie. PER ACCETTAZIONE DI QUANTO SOPRA RIPORTATO

Dichiarazione per embargo: 36 mesi

Richiesta motivata embargo: 5. Tutela della proprietà intellettuale

Liberatoria consultazione dati Eprints: Consapevole del fatto che attraverso l'Archivio istituzionale ad accesso aperto "EPRINTS.unife.it" saranno comunque accessibili i metadati relativi alla tesi (titolo, autore, abstract, ecc.)

Ferrara, li: 22/01/2012

Firma del Dottorando (Ing. Alessandro Bernini)

Firma dei Tutori

Visto: Il Tutore Si approva

Prof. Antonio Tralli,

Prof. Nerio Tullini
