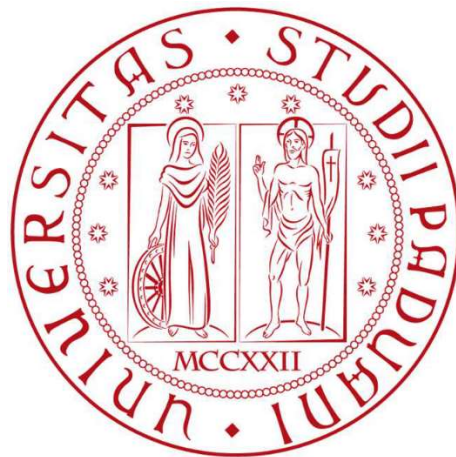


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

Analisi critica di elementi piani in c.a. prefabbricati

Critical analysis of prefabricated reinforced concrete flat elements

Relatore: prof. CARLO PELLEGRINO

Correlatore: ing. PAOLO ZAMPIERI

Laureando: EMANUELE DELLA PUPPA-ZORZ

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Indice

1.	Introduzione	1
2.	Sistemi tecnologici presenti nel mercato	3
2.1	Dual Solution.....	3
2.2	Bilastra e Bilbot.....	6
3.	Riferimenti normativi	10
3.1	Solai compositi.....	10
3.1.1	Armature	11
3.1.2	Elementi di alleggerimento	14
3.1.3	Monolitismo di lastre composite	15
3.2	Muri compositi.....	17
3.2.1	Armature	17
3.2.2	Getto in situ.....	19
4.	Legame di interfaccia	21
4.1	Studio sperimentale 1.....	21
4.1.1	Preparazione e proprietà dei campioni.....	22
4.1.2	Metodo di test.....	26
4.2	Studio sperimentale 2.....	27
4.2.1	Preparazione e proprietà dei campioni.....	27
4.2.2	Metodi di test.....	30
4.2.3	Risultati attesi.....	31
4.3	Analisi dei risultati sperimentali	34
4.3.1	Effetto della resistenza del calcestruzzo gettato in opera.....	34
4.3.2	Effetto del tipo di interfaccia del calcestruzzo prefabbricato.....	35
4.3.3	Effetto dell'agente di adesione all'interfaccia.....	37
4.3.4	Effetto della rugosità del lavaggio degli aggregati esposti	38
4.3.5	Effetto del tempo di stoccaggio del calcestruzzo prefabbricato	41
4.3.6	Effetto della rigidità differenziale	42
4.3.7	Effetto del ritiro differenziale.....	45
4.3.8	Effetto combinato del ritiro differenziale e della rigidità differenziale	46
5.	Conclusioni	49
6.	Bibliografia e sitografia.....	52

1. Introduzione

Negli ultimi anni i progettisti sono sempre più alla ricerca di soluzioni rapide, sicure ed efficienti per i loro progetti. La prefabbricazione è una soluzione a queste richieste, è alla base di tante opere recenti ed è sempre più usata in tutti gli ambiti dell'ingegneria civile.

Un ambito in cui è in uso da tempo sono sicuramente i solai. In Italia la filosofia costruttiva si è sempre basata sui solai in latero-cemento che sono in parte prefabbricati e in parte completati da un getto in opera una volta posizionati in cantiere. All'estero, in particolare negli altri stati europei, invece è da molti anni in uso la filosofia dei solai a soletta monolitica gettata interamente in opera. In Italia solo ultimamente si sta diffondendo l'uso di queste soluzioni che garantiscono sicuramente prestazioni migliori ma che presentano alcune controindicazioni come il costo di costruzione (più calcestruzzo necessario, ampia cassetta e più manodopera richiesta) e tempistiche più lunghe.

Parallelamente si è quindi diffuso e migliorato l'uso dei solai detti bidirezionali, ossia solai costituiti da una piastra prefabbricata in calcestruzzo (tipo Predalles) che viene posizionata in situ e a cui vengono aggiunti l'armatura trasversale, eventualmente degli elementi di alleggerimento e un getto di completamento. Questo tipo di soluzione presenta dei vantaggi non indifferenti poiché si avvicina notevolmente alle prestazioni della soletta monolitica (che ovviamente rimane il punto di riferimento per quanto riguarda le caratteristiche di resistenza) ma con enormi vantaggi per quanto riguarda facilità di messa in opera e per i minori pesi in gioco, quest'ultima caratteristica fondamentale per quanto riguarda la resistenza antisismica.

Soluzioni miste di calcestruzzo prefabbricato-gettato in opera si trovano poi anche in altri ambiti, si stanno diffondendo per esempio setti murari ed opere di contenimento che utilizzano questa tecnologia. Anche in queste situazioni troviamo, infatti, delle parti prefabbricate gettate in stabilimento che vengono poi completate in situ con un nuovo getto che rende l'insieme un tutt'uno monolitico.

La tendenza però è quella di progettare con questo tipo di soluzioni considerando unicamente la parte gettata in opera come sezione resistente, relegando quindi la componente prefabbricata al mero compito di cassero a perdere.

È però evidente come anche le parti prefabbricate, anche se solo in minima parte, contribuiscano alla resistenza di questo tipo di soluzione tecnologica. Si pone quindi l'attenzione su come si possa considerare la parte prefabbricata nel calcolo delle resistenze, cosa che avrebbe sicuramente un impatto positivo sui costi di costruzione in quanto, per esempio, andrebbe a diminuire la sezione di calcestruzzo gettato in opera garantendo un notevole risparmio di materiale.

Per capire come considerare la parte prefabbricata nel calcolo delle resistenze è fondamentale però analizzare nel dettaglio il legame che sussiste tra i due strati di calcestruzzo, per poter poi determinare una resistenza di legame all'interfaccia. Questa resistenza è infatti la chiave per garantire alla soluzione composita un comportamento molto simile ad una soluzione monolitica ed è necessario che sia perlomeno pari a quella del calcestruzzo più debole tra i due.

Questo elaborato si pone quindi l'obiettivo di analizzare questo particolare costruttivo di fondamentale importanza per soluzioni composite in calcestruzzo prefabbricato-gettato in opera. Verrà fatto un breve excursus su alcune soluzioni attualmente presenti sul mercato, alcuni cenni su ciò che si trova in normativa a riguardo ed infine verranno presentati due studi sperimentali che analizzano nel dettaglio le problematiche della resistenza di legame.

2. Sistemi tecnologici presenti nel mercato

2.1 Dual Solution

La soluzione DUAL Solution®, prodotta dall'azienda "Esse Team", permette di coniugare gli standard qualitativi, l'economicità e la praticità tipici della prefabbricazione, basandosi infatti sull'utilizzo di lastre tralicciate ("Predalles"). È una valida alternativa ai solai ad armatura incrociata interamente gettati in opera.

Lo schema di solaio "a fungo" permette di eliminare le travi tra i pilastri nelle due direzioni in favore di una lastra estesa sorretta puntualmente in corrispondenza dei pilastri, caratterizzata da un'armatura trasversale ottimizzata, permettendo quindi di coprire luci piuttosto estese facendo ricorso a impalcati di ridotto spessore.

In prossimità dei pilastri viene posizionata l'armatura resistente a taglio e a punzonamento, che può essere realizzata mediante posa di ferri piegati e tralici, come mostrato in Figura 2.1.1 e Figura 2.1.2. Questi possono anche rivestire la funzione di distanziale nei confronti dell'armatura superiore e della rete elettrosaldata. In alternativa è possibile ricorrere a chiodature e tralici speciali.



Figura 2.1.1 – armatura in prossimità di un pilastro



Figura 2.1.2 – armatura a punzonamento

Nelle campate, non in prossimità dei pilastri, vengono inseriti gli elementi di alleggerimento (Figura 2.1.3), che vengono dimensionati a seconda delle necessità. Gli elementi di alleggerimento possono essere posizionati nell'impianto di prefabbricazione oppure direttamente in situ, dopo la posa dei ferri trasversali. Quest'ultima opzione, in cantiere, permette di rendere più facile la lavorazione di messa in posa delle armature. Due sono le necessità che devono essere affrontate con l'utilizzo di elementi di alleggerimento: la resistenza al fuoco e il copriferro per l'armatura superiore. La resistenza al fuoco viene garantita tramite appositi sfiati che sono garantiti dai dispositivi di fissaggio degli elementi di alleggerimento. Per garantire invece un adeguato copriferro per l'armatura superiore è possibile inserire dei distanziatori in PVC da posizionare sopra gli alleggerimenti.



Figura 2.1.3 – elementi di alleggerimento

Un'ultima problematica che dev'essere affrontata riguarda l'accumulo di acqua. Con l'utilizzo di elementi di alleggerimento in materiale plastico o EPS vergine (in luogo dei consueti blocchi in polistirene espanso rigenerato normalmente utilizzati) è possibile prevenire il potenziale accumulo di acqua per quei manufatti che, durante lo svolgersi delle fasi costruttive dell'edificio, si siano ritrovati esposti agli agenti atmosferici.

Infine, la tecnologia DUAL Solution® garantisce una forte riduzione del peso proprio dell'impalcato. Tale riduzione varia in funzione dello spessore complessivo dell'impalcato e tende ad aumentare con esso, riflettendosi in una minor quantità di calcestruzzo da gettare in opera e in un minor onere di puntellamento.

In Figura 2.1.4 vengono presentate le fasi costruttive, mentre le Figura 2.1.5, 2.1.6 e 2.1.7 rappresentano delle sezioni del solaio.

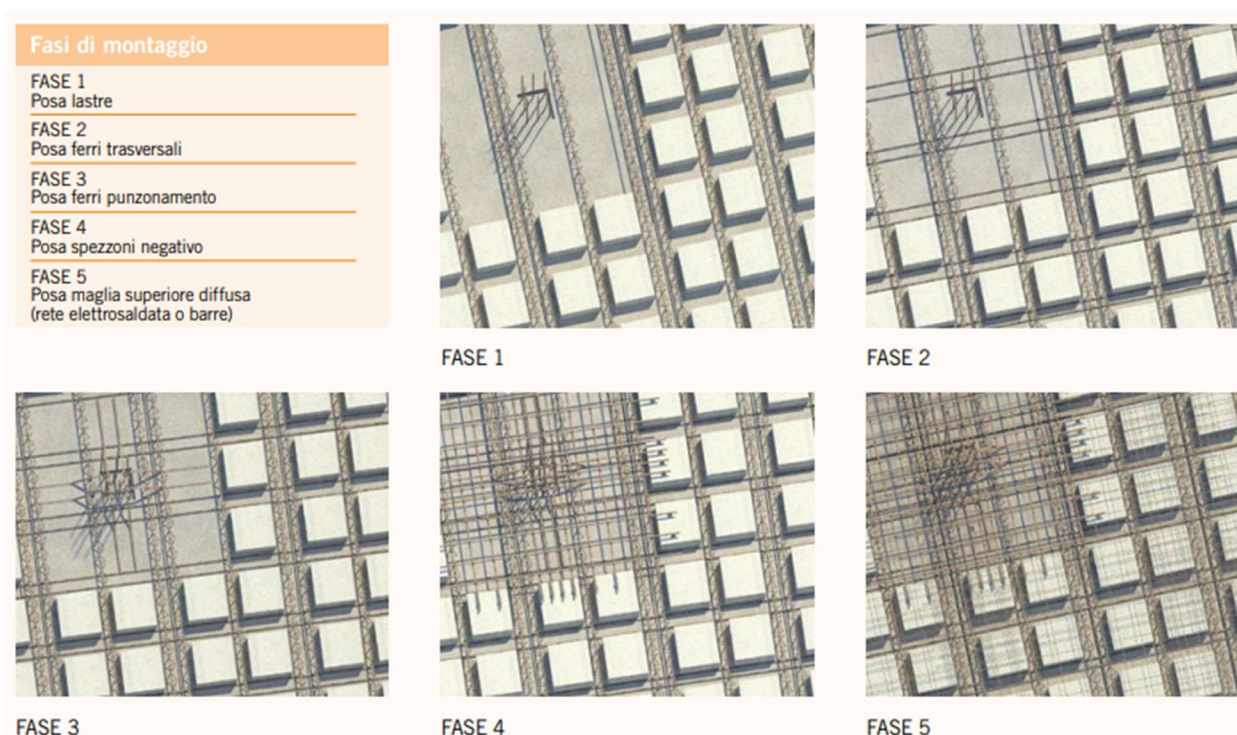


Figura 2.1.4 – fasi costruttive del sistema DUAL Solution®

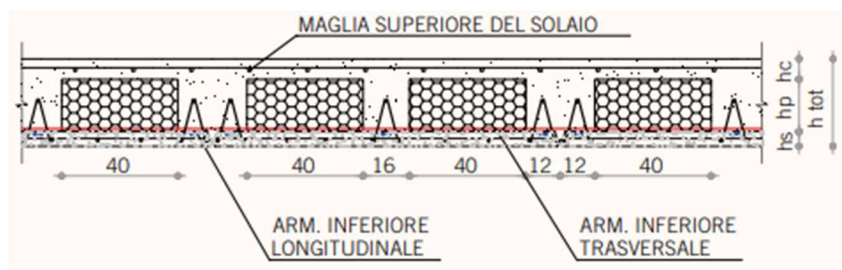


Figura 2.1.5 – sezione trasversale

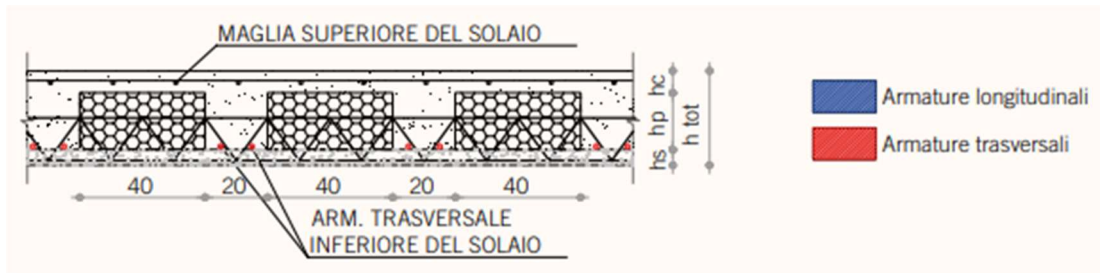


Figura 2.1.6 – sezione longitudinale

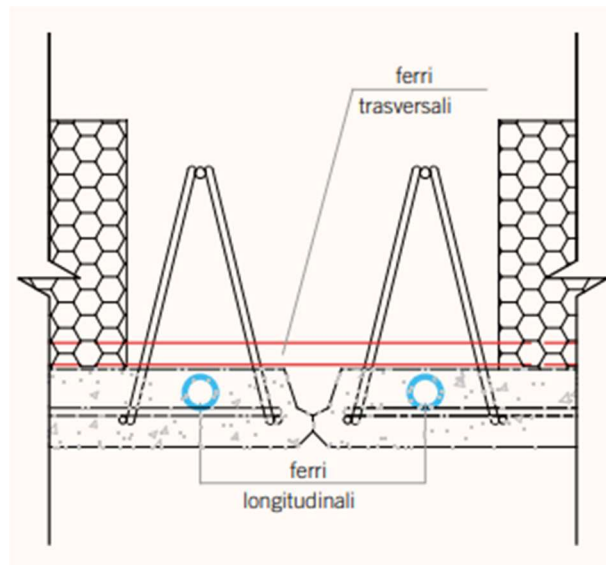


Figura 2.1.7 – particolare del giunto tra due lastre

2.2 Bilastra e Bilbot

Il muro BILASTRA®, Figura 2.2.1, è un manufatto prodotto sempre dall'azienda "Esse Team" adatto alla realizzazione di pareti, muri di sostegno autoreggenti, muri portanti, recinzioni, argini di fiumi e pareti di contenimento del ciglio stradale.

Questo sistema garantisce una serie di vantaggi, quali: rapidità di posa in opera, risparmio economico (per i casseri e la manodopera), getto di riempimento che crea una parete portante continua, eliminazione dell'armamento per il contenimento del getto dei cordoli, flessibilità dimensionale, funzionale e strutturale, facile realizzazione di aperture nel muro in fase di prefabbricazione ed infine elevata sicurezza in fase di montaggio.



Figura 2.2.1 – BILASTRE® stoccate in cantiere

La BILASTRA® è un elemento prefabbricato costituito da due lastre in cemento armato vibrato (con R_{ck} 30 N/mm²), che costituiscono i setti portanti, tenute assieme da un traliccio elettrosaldato metallico all'interno.

Lo spessore delle lastre dipende dallo spessore del manufatto finale e varia quindi a seconda delle esigenze di progetto.

Se gli spessori del muro superano i 40 cm al posto del traliccio elettrosaldato viene inserita una gabbia debitamente dimensionata. Sia il traliccio che la gabbia hanno lo scopo di assorbire sia le sollecitazioni a taglio, che si manifestano in fase di montaggio, sia le spinte orizzontali date dal getto di calcestruzzo quando è ancora fresco.

Mentre le gabbie fungono sia da armatura longitudinale che trasversale, i tralicci elettrosaldati devono essere accompagnati da una apposita armatura trasversale che viene inserita in fase di posa del manufatto.

Per dare continuità ai singoli elementi verticali di parete vengono inserite tra gli stessi o delle barre trasversali o delle gabbie di rete elettrosaldata come rappresentato in Figura 2.2.2 e Figura 2.2.3.

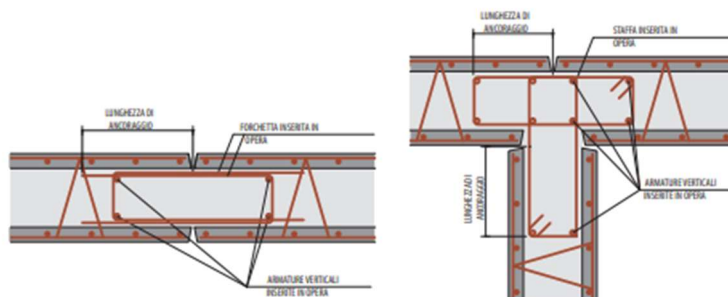


Figura 2.2.2 – collegamenti tra BILASTRA® adiacenti

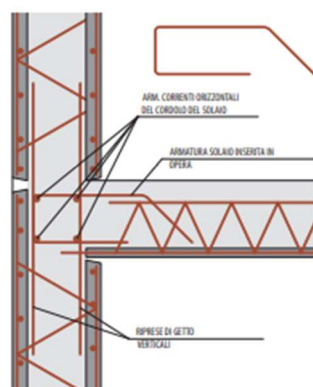


Figura 2.2.3 – collegamenti verticali tra due BILASTRA® e solaio prefabbricato

Poiché l'armatura della BILASTRA® è caratterizzata da un certo intervallo di posa, i ferri di ripresa della fondazione su cui poggia la BILASTRA® devono essere posti secondo i medesimi intervalli, come mostrato in Figura 2.2.4.

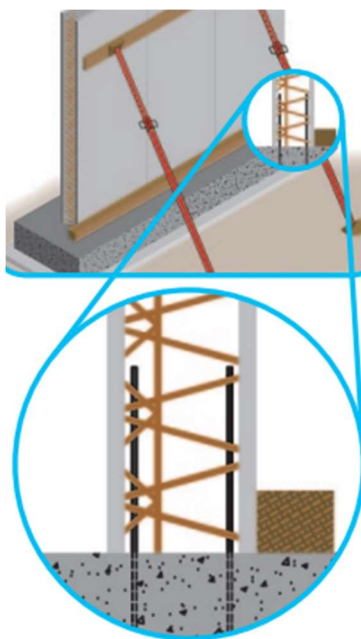


Figura 2.2.4 – collegamento tra BILASTRA® e ferri di ripresa della fondazione

Infine, vi è una variante del sistema BILASTRA®, denominata BILBOT®, in cui le lastre delle BILASTRA® hanno incorporata la fondazione, come rappresentato in Figura 2.2.5. Questo garantisce una maggior stabilità ma soprattutto l'esatta collocazione dell'armatura di fondazione. Il getto di completamento non avviene in un'unica fase ma il getto della fondazione ed il getto della parete interna sono svolti in due fasi successive.

I vantaggi di questa soluzione sono: assenza del cassero per la fondazione, assenza dell'armatura della fondazione con staffe e correnti ed infine l'assenza dei ferri di ripresa per il collegamento fondazione-muro.

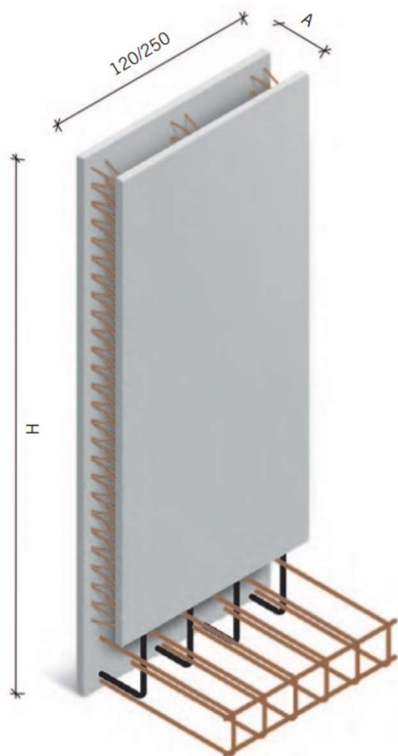


Figura 2.2.5 – esempio di BILBOT®

3. Riferimenti normativi

La normativa italiana non è esaustiva per quanto riguarda le caratteristiche che devono avere gli elementi piani prefabbricati e rimanda alla più precisa normativa europea.

Nelle “Norme Tecniche per le Costruzioni” emanate il 20 gennaio 2018 l’unico riferimento al tipo di soluzioni trattate in questo approfondimento si trova al capitolo 4.1.9.3, denominato “*solai realizzati con l’associazione di componenti prefabbricati in c.a. e c.a.p.*” di cui vengono riportate le parti più importanti:

“I componenti devono essere provvisti di opportuni dispositivi e magisteri che assicurino la congruenza delle deformazioni tra i componenti stessi accostati, sia per i carichi ripartiti che per quelli concentrati. In assenza di soletta collaborante armata o in difformità rispetto alle prescrizioni delle specifiche norme tecniche europee, l’efficacia di tali dispositivi deve essere certificata mediante prove sperimentali.”

“Quando si voglia realizzare una redistribuzione trasversale dei carichi è necessario che il solaio così composto abbia dei componenti strutturali ortogonali alla direzione dell’elemento resistente principale.”

“Qualora il componente venga integrato da un getto di completamento all’estradosso, questo deve avere uno spessore non inferiore a 40 mm ed essere dotato di una armatura di ripartizione a maglia incrociata e si deve verificare la trasmissione delle azioni di taglio fra elementi prefabbricati e getto di completamento, tenuto conto degli stati di coazione che si creano per le diverse caratteristiche reologiche dei calcestruzzi, del componente e dei getti di completamento.”

È quindi necessario approfondire la normativa analizzando le norme EN emanate dall’Unione Europea, atte ad armonizzare i vincoli costruttivi in tutti i paesi dell’unione. In questo studio vengono prese in considerazione in particolare due normative, entrambe inerenti ai prodotti prefabbricati in calcestruzzo: EN 13747 (piastre per solai) ed EN 14992 (elementi per muri).

3.1 Solai compositi

I solai compositi sono trattati nel dettaglio nella normativa “*EN 13747-2005+A2-2010 – Prodotti prefabbricati in calcestruzzo – Piastre per solai*”.

La normativa definisce le piastre per solai degli elementi usati come cassaforma per il getto in opera, denominato topping, e che vanno a formare con esso, una volta indurito, una lastra composita con comportamento simile ad una lastra monolitica. Solitamente la classe del calcestruzzo gettato in opera è di almeno C20/25 con uno spessore al di sopra della superficie della piastra di almeno 40 mm. Viene specificato che il compito di queste lastre può essere quello di cassero a perdere, senza contributo alla resistenza della struttura finale.

È richiesto che la piastra debba contenere tutta o parte dell’armatura principale necessaria nella lastra composita. Se la parte prefabbricata viene considerata nel calcolo della resistenza, allora

la normativa esige una valutazione sull'associazione tra calcestruzzo prefabbricato e calcestruzzo gettato in situ e, se le forze di taglio possono essere trasferite attraverso l'interfaccia allora la normativa permette di progettare le lastre composite allo stesso modo di come vengono progettate le lastre monolitiche che hanno la medesima configurazione.

3.1.1 Armature

In una piastra rinforzata troviamo diversi tipi di armatura, tra cui le travi a traliccio. Queste sono costituite da due o tre corde (una superiore e una o due inferiori) saldate tra loro, come mostrato in Figura 3.1.1.1 e Figura 3.1.1.2. Le travi a traliccio sono di solito inserite in direzione longitudinale alla piastra ed hanno lo scopo di aumentare la resistenza a flessione e a taglio.



Figura 3.1.1.1 – esempio di travi a traliccio con diagonali continue

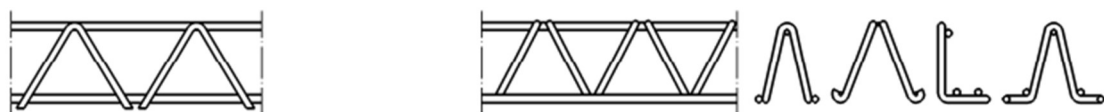


Figura 3.1.1.2 – esempio di travi a traliccio con diagonali discontinue

Le corde sono unite tramite le diagonali, ossia le componenti dell'armatura resistenti a taglio, che hanno la fondamentale caratteristica di essere ancorate ad entrambi i lati dell'interfaccia, quindi sia nel calcestruzzo prefabbricato che in quello gettato in opera. Generalmente gli angoli di inclinazione rispetto al piano, α e β , sono compresi tra 45° e 90° . Possono essere eventualmente anche a forma di anello, come mostrato in Figura 3.1.1.3.



Figura 3.1.1.3 – esempio di armatura diagonale di collegamento

Per quanto riguarda il posizionamento delle armature sopra descritte questa normativa va decisamente più nel dettaglio rispetto la normativa italiana.

In particolare, la distanza libera nominale tra le barre per l'armatura principale e quelle per l'armatura trasversale deve rispettare i limiti imposti in Figura 3.1.1.4, in cui d_g è il massimo spessore degli aggregati e ϕ il diametro della barra.

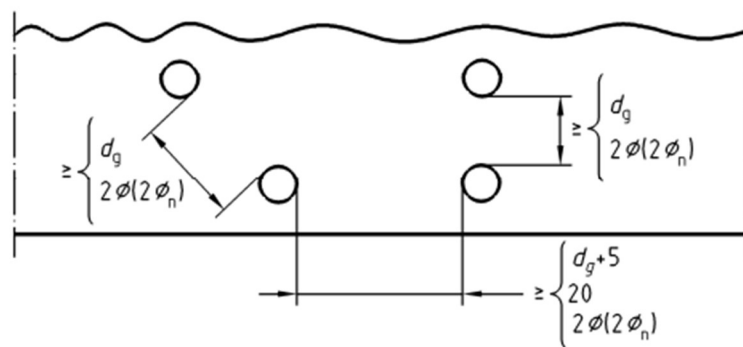


Figura 3.1.1.4 – distanze minime tra le armature longitudinali

Per quanto riguarda l'armatura che rimane esterna alla piastra prefabbricata, viene richiesta una distanza minima tra la superficie della piastra e la parte inferiore dell'armatura, pari a 35 mm per gli anelli e 20 mm per la barra longitudinale, come rappresentato in Figura 3.1.1.5.

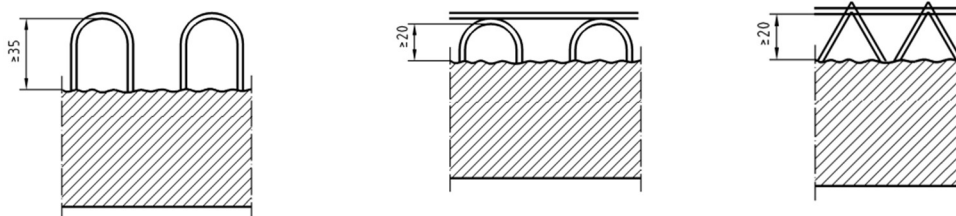


Figura 3.1.1.5 – distanze minime tra le armature e la superficie della lastra

C'è anche un limite per quanto riguarda la profondità minima a cui devono essere incorporate le corde inferiori, pari ad almeno 10 mm, come rappresentato in Figura 3.1.1.6.

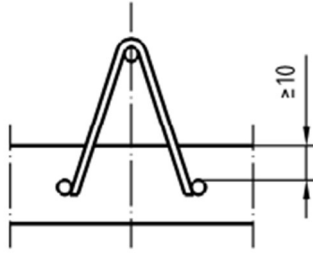


Figura 3.1.1.6 – minima profondità a cui deve essere posta la corda inferiore

Vengono infine richieste delle distanze minime tra i tralicci e tra i tralicci e i bordi esterni della piastra prefabbricata. In Figura 3.1.1.7 troviamo la distanza nominale tra gli assi dei tralicci, pari al minore tra:

$$a \leq [835 \text{ o } (15 h_p + 125)] \text{ mm}$$

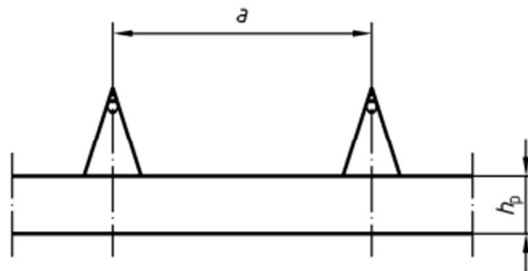


Figura 3.1.1.7 – distanza tra travi reticolari

In Figura 3.1.1.8 è rappresentata la distanza nominale tra l'asse del traliccio ed il bordo più vicino della lastra, che deve essere pari al minore tra:

$$a_2 \leq 0,5 [835 \text{ o } (15 h_p + 125)] \text{ mm}$$

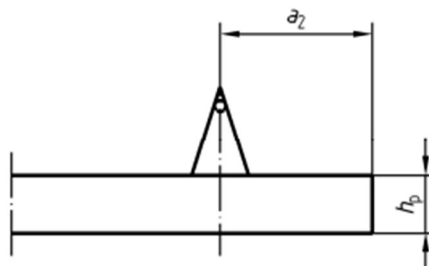


Figura 3.1.1.8 – distanza tra la trave più esterna ed il bordo della piastra

Per quanto riguarda la distanza agli estremi della trave a traliccio, viene richiesto che il giunto inferiore di tale trave sia più distante di 250 mm dal bordo più vicino della piastra, come evidenziato in Figura 3.1.1.9.

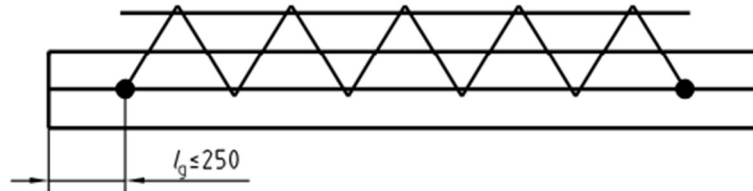


Figura 3.1.1.9 – posizionamento longitudinale della trave a traliccio

3.1.2 Elementi di alleggerimento

Un' elemento di alleggerimento è un elemento incollato o in altro modo collegato, anche incorporato alla piastra prefabbricata (Figura 3.1.2.1). L'inserimento di questo elemento può avvenire in fase di prefabbricazione o in cantiere, prima del getto in situ. Hanno lo scopo di diminuire il peso complessivo dell'impalcato.



Figura 3.1.2.1 – esempio di elementi di alleggerimento (incollati, a sinistra, e incastrati, a destra)

Lo spazio tra questi elementi deve poter garantire la formazione di una costola di calcestruzzo una volta indurito il getto effettuato in opera. Questa costola deve avere uno spessore adeguato a poter trasferire la forza di taglio tra i due calcestruzzi, garantendo anche un adeguato copriferro. In particolare, come evidenziato in Figura 3.1.2.2, la normativa richiede uno spazio minimo tra le facce degli elementi pari a $b_v \geq 85$ mm (in generale) o il maggiore tra $b_v \geq [85$ o $(b_o + 2c)]$ mm nel caso di travi a traliccio dove b_o è la larghezza del traliccio alla faccia superiore della piastra del pavimento, in mm, mentre c è il copriferro.

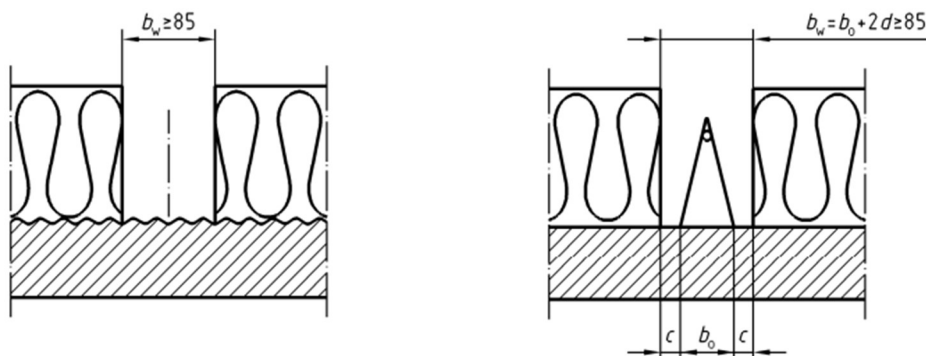


Figura 3.1.2.2 – distanza minima tra gli elementi di alleggerimento

3.1.3 Monolitismo di lastre composite

La clausola di riferimento per lo sforzo di taglio è la 6.2.5 della EN 1992, che richiede quanto segue:

$$v_{Edi} \leq v_{Rdi}$$

con v_{Edi} il taglio agente all'interfaccia e v_{Rdi} la resistenza a taglio all'interfaccia, calcolate rispettivamente come segue:

$$v_{Edi} = \beta V_{Ed} / (z b_i)$$

con β il rapporto tra la forza longitudinale nell'area di calcestruzzo nuovo e la forza longitudinale totale, V_{Ed} il taglio agente, z il braccio della sezione composita, b_i la larghezza dell'interfaccia (Figura 3.1.3.1);

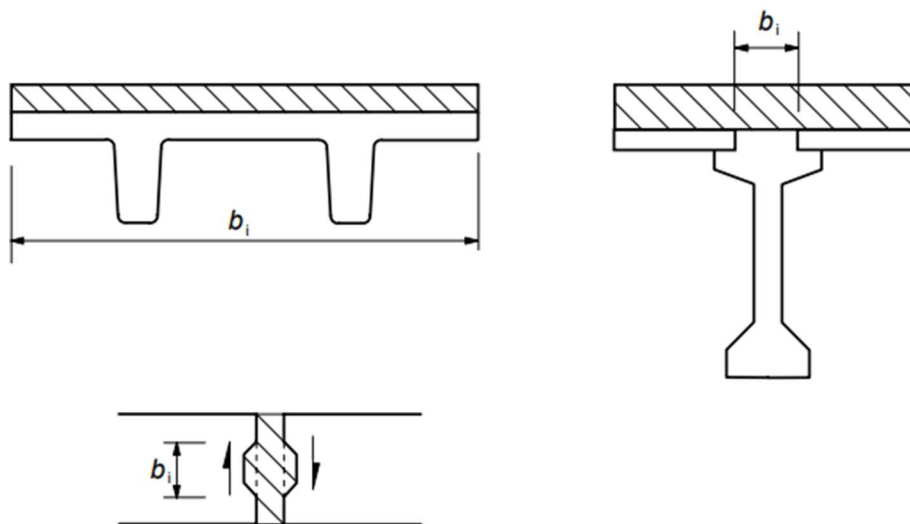


Figura 3.1.3.1 – esempi larghezza di interfaccia

$$V_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd}$$

con c e μ fattori che dipendono dalla ruvidità dell'interfaccia, f_{ctd} definita alla clausola 3.1.6 della normativa, σ_n sforzo per unità di superficie causato dalla forza normale esterna che agisce contemporaneamente al taglio, $\rho = A_s / A_i$ con A_s l'area dell'armatura che attraversa l'interfaccia e A_i l'area del giunto, α compreso tra 45° e 90° (Figura 3.1.3.2), v un fattore di sicurezza.

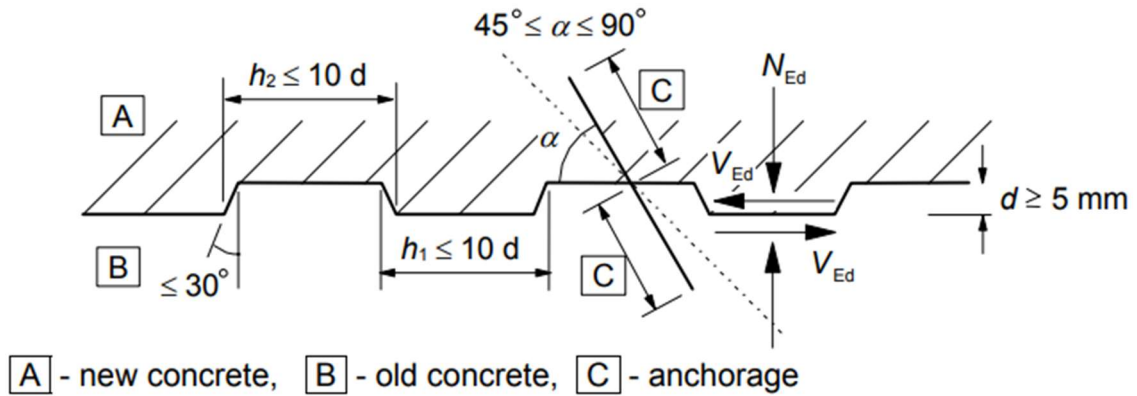


Figura 3.1.3.2 – giunto dentellato

La resistenza di progetto dell'armatura di collegamento tra i due strati di calcestruzzo è pari a:

$$F_{Rwd} = A_{sw} f_{ywd} (\mu \sin \alpha + \mu \sin \alpha' + \cos \alpha)$$

con A_{sw} la sezione trasversale della barra, in mm^2 , F_{ywd} la resistenza di progetto dell'acciaio della barra, in Mpa, μ il coefficiente di attrito (calcolato secondo 6.2.5 della EN 1992-1-1:2004), α e α' gli angoli di inclinazione delle barre, in radianti, con $\pi/4 \leq \alpha \leq \pi/2$ e $\cos \alpha \geq 0$; $\pi/2 \leq \alpha' \leq 3\pi/4$. Tutte queste informazioni sono riportate in Figura 3.1.3.3.

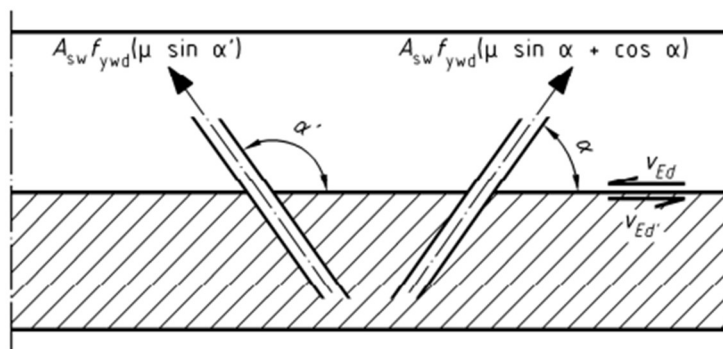
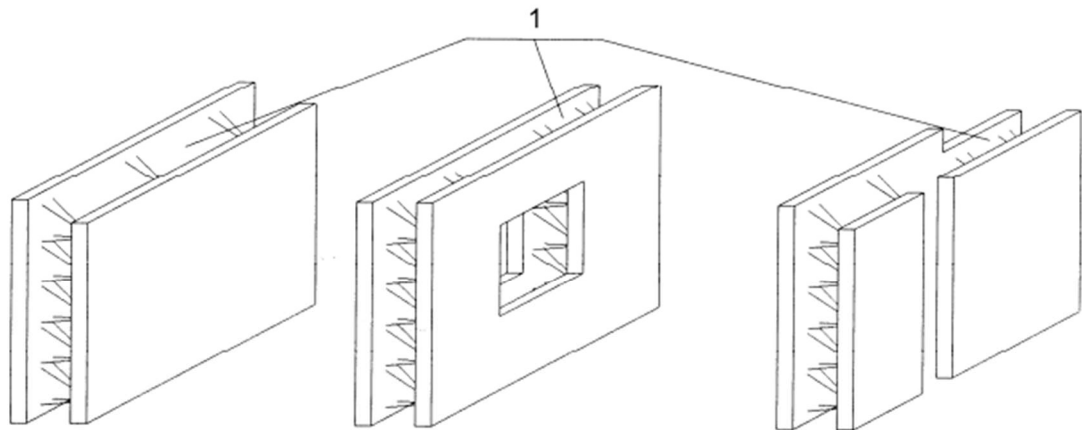


Figura 3.1.3.3 – resistenza di progetto dell'armatura di collegamento

3.2 Muri compositi

I muri compositi sono trattati nello specifico nella normativa “EN 14992-2007+A1-2012 – Prodotti prefabbricati in calcestruzzo – Elementi per muri”.

Un muro composito (Figura 3.2.1) è un elemento costituito da due lastre prefabbricate unite tramite travi a traliccio o gabbie che lasciano un vuoto all’interno dove verrà poi gettato il calcestruzzo in situ che andrà a creare una parete continua e monolitica con gli elementi adiacenti.



Key

1 in-situ concrete

Figura 3.2.1 – esempi di muri compositi

La normativa non cita specifiche tecniche di progettazione per questo tipo di muri poiché ritiene che debbano essere progettati come un muro monolitico mentre sottolinea come dovrebbe essere presa in considerazione la resistenza minima del calcestruzzo prefabbricato.

3.2.1 Armature

L’armatura è composta da travi a traliccio o gabbie che sono in parte immerse nelle lastre prefabbricate ed in parte vengono avvolte dal calcestruzzo gettato in situ. Per la progettazione di tale armatura è bene considerare la resistenza dei giunti ed è quindi di particolare interesse la profondità effettiva d , riportata in Figura 3.2.1.1.

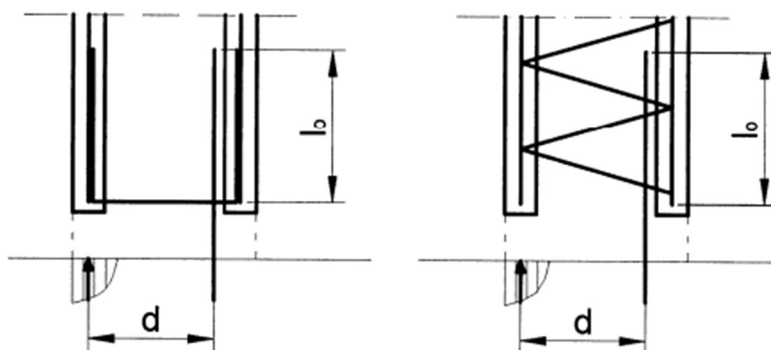


Figura 3.2.1.1 – spessore effettivo e lunghezza di sovrapposizione

Nel caso in cui le travi a traliccio siano utilizzate come rinforzo trasversale il diametro massimo delle barre che le compongono è opportuno sia inferiore a 16 mm con una massima sezione trasversale sovrapposta limitata a 1200 mm².

Alla base della parete composita è opportuno mantenere uno spessore di solo calcestruzzo gettato in situ maggiore o uguale a 30 mm, come rappresentato in Figura 3.2.1.2.

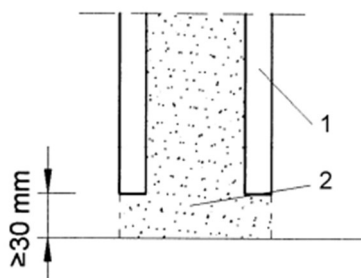


Figura 3.2.1.2 – giunto di un muro composito (1, calcestruzzo prefabbricato, 2, calcestruzzo in situ)

Per quanto riguarda il taglio all'interfaccia la normativa rimanda alla stessa clausola 6.2.5 dell'Eurocodice 2 sopra citata al capitolo 3.1.3.

Una parete composita può essere considerata portante in tutta la sua sezione (lastre prefabbricate comprese) solo se il giunto ha una larghezza pari a o superiore a 30 mm, altrimenti la sezione resistente è considerata pari esclusivamente alla sezione gettata in opera, relegando di fatto le lastre prefabbricate alla funzione di cassero a perdere.

3.2.2 Getto in situ

Vengono specificate alcune accortezze da tenere durante il getto in situ. In primis durante il getto è opportuno che la temperatura delle lastre prefabbricate sia maggiore di 5°C e mentre il calcestruzzo fresco non dovrebbe avere una temperatura inferiore a 10°C per almeno 3 giorni (è opportuno che la resistenza del calcestruzzo fresco sia almeno di 5 Mpa quanto la sua temperatura scende sotto 0°C prima dei 3 giorni).

La normativa specifica un carico di getto per metro di traliccio L_c raccomandato (Figura 3.2.2.1): $L_c = 15,6$ kN/m con copriferro maggiore di 15 mm e $L_c = 18,4$ kN/m con copriferro maggiore di 17 mm.

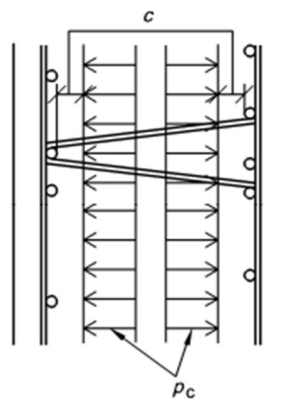


Figura 3.2.2.1 – spinta del getto sulle lastre prefabbricate

In funzione della pressione sulla cassaforma la normativa individua, infine, le velocità di getto consigliate, riportate in Figura 3.2.2.2, con V_c il tasso, e la distanza tra le travi tralicciate e L_c il carico di getto.

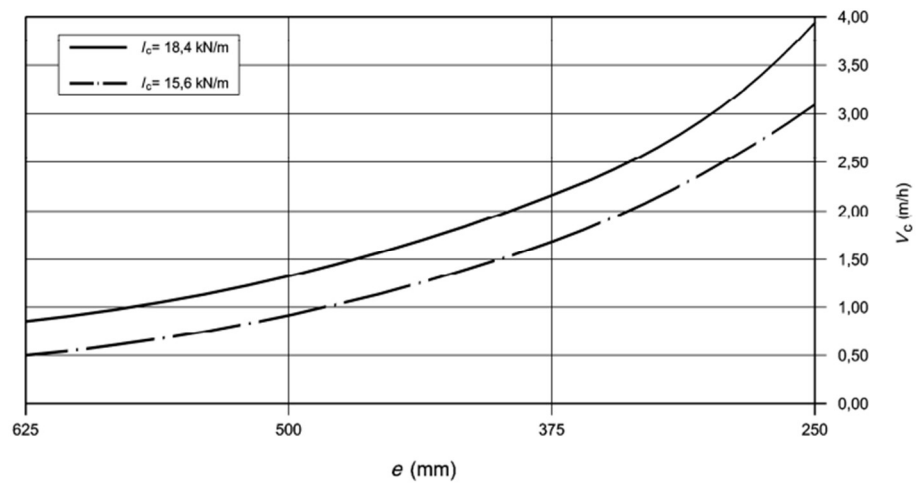


Figura 3.2.2.2 – massimi tassi di messa in opera del calcestruzzo

4. Legame di interfaccia

Come citato nell'introduzione, la facilità e la rapidità di esecuzione dei lavori con piastre prefabbricate rende queste ultime un'ottima soluzione commerciale. La problematica principale però è da ricercare nel legame di interfaccia, che influisce notevolmente sulle caratteristiche di resistenza della soluzione tecnologica nel suo complesso. La forza di legame all'interfaccia è infatti fondamentale per garantire il più alto grado di monolitismo possibile tra la piastra prefabbricata ed il getto di calcestruzzo in situ.

I codici di calcolo attualmente permettono di calcolare la resistenza a taglio all'interfaccia considerando fattori basati sulla teoria del taglio-attrito, quali: resistenza a compressione del calcestruzzo più debole, sforzo normale all'interfaccia, la quantità di armatura che attraversa l'interfaccia e la rugosità dell'interfaccia stessa. Non vengono però considerate le condizioni di indurimento che, a causa del ritiro differenziale dei due calcestruzzi gettati in epoche diverse, hanno un'influenza significativa sulla resistenza all'interfaccia.

Inoltre, la resistenza del legame interfacciale tra calcestruzzo prefabbricato e calcestruzzo gettato in opera dipende da altri fattori come: la qualità dell'interfaccia, le condizioni all'interfaccia ed il degrado dovuto alle azioni ambientali.

Alcuni studi sperimentali hanno dimostrato come la resistenza del legame interfacciale aumenti con l'aumentare della resistenza del calcestruzzo, soprattutto di quello gettato in opera, e come la resistenza del legame tragga un beneficio, seppur minimo, anche dall'applicazione di pasta cementizia sulla superficie della lastra prefabbricata.

4.1 Studio sperimentale 1

In letteratura non sono presenti numerosi studi legati al legame interfacciale tra calcestruzzo prefabbricato e calcestruzzo gettato in opera. Una ricerca sperimentale attendibile è stata effettuata da Changyong Li, Yabin Yang, Jiuzhou Su, Huidi Meng, Liyun Pan e Shunbo Zhao della North China University, Zhengzhou (China), nel loro articolo "Experimental Research on Interfacial Bonding Strength between Vertical Cast-In-Situ Joint and Precast Concrete Walls", di cui si riportano le fasi principali e l'analisi dei risultati ottenuti.

Questo studio analizza la resistenza del legame in funzione di vari fattori: tipo di interfaccia, resistenza del calcestruzzo gettato in opera, ruvidità all'interfaccia, aggiunta di un agente di adesione all'interfaccia e tempo di stoccaggio del calcestruzzo prefabbricato.

La ruvidità in questo studio è stata analizzata per tre casi differenti: superficie originale, superficie ruvida formata tramite l'utilizzo di un cassero con protuberanze ed infine superficie ruvida ottenuta con lavaggio con acqua in pressione.

In ogni caso, l'irruvidimento dell'interfaccia della componente prefabbricata è preferibile sia un processo industrializzato in fabbrica per garantire standard più elevati, ed in questo caso è opportuno tenere conto delle tempistiche di stoccaggio tra la produzione e la messa in opera.

4.1.1 Preparazione e proprietà dei campioni

Il cemento utilizzato per la prova sperimentale è un cemento ordinario ai silicati.

La sua lavorabilità da fresco è stata migliorata aggiungendo additivi quali ceneri volanti e calcare macinato, assieme ad un agente espansivo utilizzato per il calcestruzzo nei giunti gettati in opera, le cui proprietà sono presentate nella Tabella 4.1.1.1. Tutte le altre composizioni chimiche (ceneri volanti, FA, calcare macinato, GL) sono presentate nella Tabella 4.1.1.2.

Density (g/cm ³)	Water for Standard Consistency (%)	Specific Surface Area (m ² /kg)	Setting Time (min)		Compressive Strength (MPa)		Flexural Strength (MPa)	
			Initial	Final	3d	28d	3d	28d
3.09	27	360	170	215	27.8	58.4	5.2	8.3

Tabella 4.1.1.1 – proprietà fisiche e meccaniche del cemento

Material	Apparent Density (kg/m ³)	Specific Surface Area (m ² /kg)	Activity Index (%)	Water Demand Ratio (%)	Mobility Ratio (%)	Fineness: Residual on Sieve (%)	
						80 μm	45 μm
FA	2350	406	73.3	84	-	5.48	21.75
GL	2780	428	61.6	-	103	1.2	25

Tabella 4.1.1.2 – proprietà di ceneri volanti e calcare macinato

Per il calcestruzzo prefabbricato è stato utilizzato il calcestruzzo convenzionale con lo slump della miscela fresca mantenuto a 80-100 mm. A causa degli spazi limitati di cassetta si è reso necessario utilizzare un calcestruzzo autocompattante che evitasse di dover essere vibrato. Per questo calcestruzzo sono state preparate quattro classi di resistenza.

In Tabella 4.1.3 sono presentate le percentuali della miscela dei vari calcestruzzi.

Concrete	Water to Binder Ratio	Dosage of Raw Materials (kg/m ³)							
		Water	Cement	FA	GL	Crushed Limestone	Sand	Water Reducer	EA
Precast	0.47	175	335	37	-	1086	786	3.7	-
compo- nents	0.57	185	292	32	-	1060	831	3.2	-
Cast-in- situ	0.37	190	308	51	103	885	816	5.6	51.4
joints	0.34	185	326	54	109	873	806	5.4	54.4
	0.31	185	358	60	119	851	786	7.2	59.7
	0.28	185	396	66	132	816	754	7.3	66.1

Tabella 4.1.1.3 – percentuali delle miscele di calcestruzzo

Le proprietà meccaniche dei calcestruzzi (convenzionale e autocompattante) sono state misurate utilizzando i metodi di prova specificati nella normativa cinese.

Le proprietà misurate, a 28 giorni di maturazione, sono la resistenza cubica alla compressione e la resistenza alla trazione per spacco, per le quali la normativa in questione richiede di produrre sei cubi con dimensioni di 150 mm (tre per ogni tipo di calcestruzzo). La normativa richiede inoltre sei cilindri di diametro 150 mm e altezza di 300 mm (tre per ogni calcestruzzo) per misurare la resistenza a compressione cubica e la resistenza a trazione per spacco e il modulo di elasticità.

La velocità di carico è stata controllata a 0,5 MPa/s per le prove di resistenza alla compressione cubica e assiale, mentre è stata di 0,05 MPa/s per le prove di resistenza alla compressione assiale.

I risultati delle prove sono presentati nella Tabella 4.1.1.4. I valori di prova soddisfano il requisito del grado di resistenza richiesto e tendono a una regolarità comune che aumenta con la diminuzione del rapporto acqua/legante.

Concrete	Water to Binder Ratio	Strength Grade	Cubic Compressive Strength (MPa)	Axial Compressive Strength (MPa)	Splitting Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Precast	0.57	C30	33.1	28.7	2.38	30.5
	0.47	C40	48.4	35.5	3.18	31.7
	0.37	C30	37.5	28.7	2.08	28.9
Cast-in-situ	0.34	C35	43.6	30.1	2.77	30.5
	0.31	C40	47.0	32.4	2.94	31.3
	0.28	C45	54.7	35.7	3.71	33.3

Tabella 4.1.1.4 – proprietà meccaniche dei calcestruzzi

Come anticipato, uno dei fattori che più influisce la resistenza del legame interfacciale è il tipo di interfaccia della parte prefabbricata. Per analizzare ciò, in questo studio le verifiche sono state fatte su tre tipi di interfaccia differenti: superficie originale, superficie ruvida lavata con aggregati esposti e superficie ruvida formata da una rete di chiusura a nervatura rapida.

La prima, la superficie originale, era piatta con alcuni piccoli pori derivanti dal disarmo (Figura 4.1.1.1 (a)).

La seconda presentava una superficie ruvida lavata con acqua in pressione per esporre gli aggregati, dopo il disarmo (Figura 4.1.1.1 (b)). Un agente è stato spennellato sulla cassaforma di interfaccia (l'agente è una sostanza viscosa omogenea solubile in acqua e composta da sostanze organiche non tossiche, con densità pari a 1,10 g/cm³).

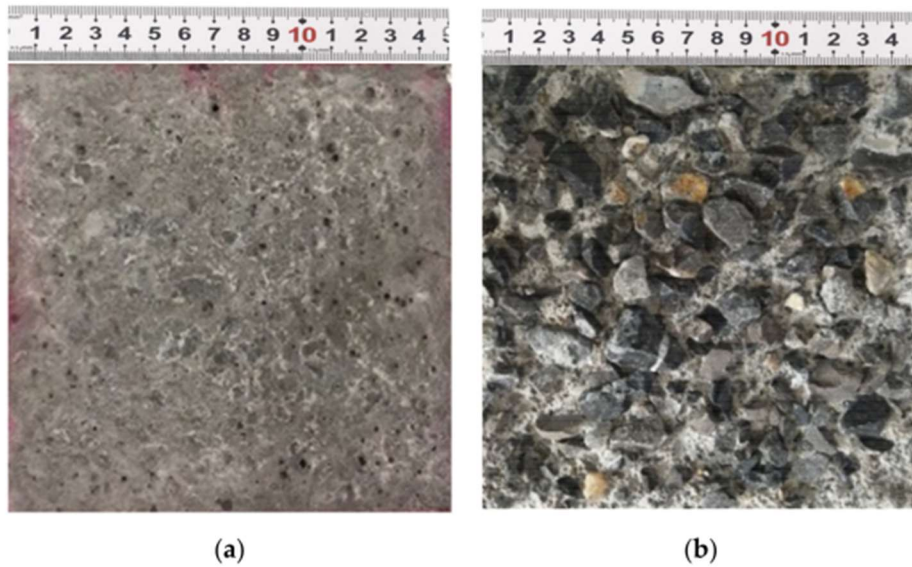


Figura 4.1.1.1 – superficie originale (a) e superficie lavata (b)

La terza è la superficie ruvida formata con una rete di chiusura a nervatura rapida (Figura 4.1.1.2) che è stata utilizzata come cassaforma per il calcestruzzo prefabbricato. La rete di chiusura a nervatura rapida è composta da una lamiera laminata in acciaio zincato sottile con profondità di 0,2 mm e rigonfiamento di 5 mm, il quale genera poi le protuberanze nella superficie del calcestruzzo.

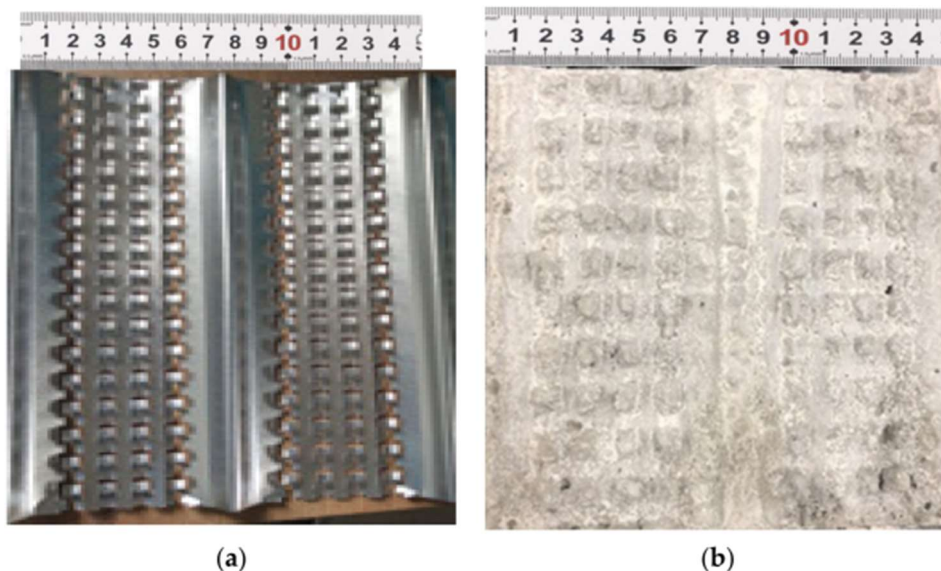


Figura 4.1.1.2 – rete di chiusura (a) ed il suo effetto sulla superficie (b)

La rugosità della superficie del calcestruzzo prefabbricato è stata determinata utilizzando il seguente test, rappresentato in Figura 4.1.1.3.

Il provino di calcestruzzo prefabbricato viene avvolto con quattro fogli di plastica trasparente posta aderente alle pareti lisce laterali. I fogli di plastica sporgono dalla superficie superiore fino alla stessa altezza della protuberanza più alta. A questo punto i vuoti tra le protuberanze vengono riempiti con della sabbia e questa viene livellata con un righello seguendo la superficie dei fogli di plastica.

La quantità iniziale di sabbia viene definita come m_1 , mentre la quantità di sabbia scartata dal livellamento della superficie viene definita come m_2 (m_1 e m_2 sono masse). Definito ciò si può quindi definire la massa della sabbia rimasta sulla superficie e che serve a riempire i vuoti, ossia:

$$M = m_1 - m_2$$

Nota quest'ultima si può ricavare la rugosità, che è definita come la profondità media della sabbia lungo tutta la superficie. Questa è data dal rapporto tra volume totale e area di studio (in mm^2) che, sostituendo V con M (massa sabbia rappezzata, in grammi) diviso per ρ (densità della sabbia, in $\text{grammi}/\text{cm}^3$), dà la seguente:

$$y = M / \rho A$$

dove y è la profondità media della sabbia in mm.

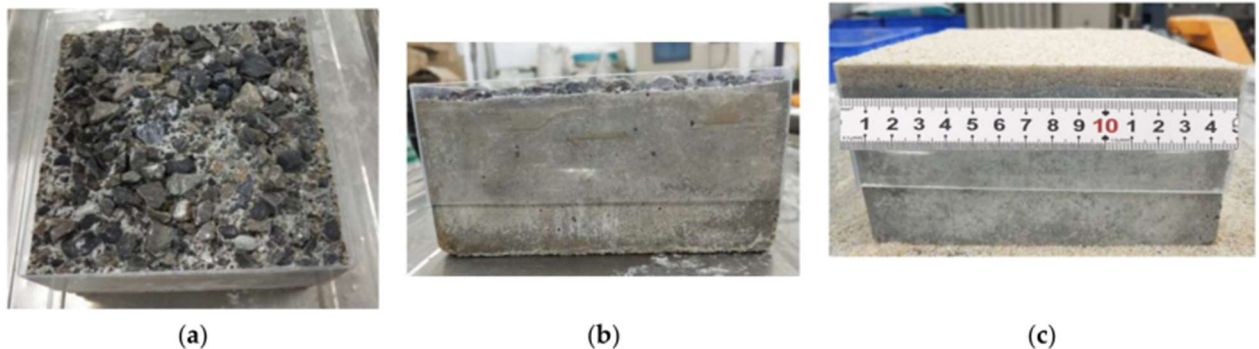


Figura 4.1.1.3 – test per misurare la rugosità dell'interfaccia

L'ultimo passaggio è consistito nel creare i provini finali da utilizzare per le prove di resistenza (Figura 4.1.1.4), creati gettando il calcestruzzo nuovo sulla superficie di quello vecchio (prefabbricato). Il provino di calcestruzzo prefabbricato descritto al punto precedente ha dimensioni $150 \times 150 \times 75 \text{ mm}^3$ e di conseguenza la parte gettata nuova avrà le medesime dimensioni, per dare un provino finale di dimensioni pari a $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ come richiesto dalla normativa. La superficie di interfaccia ha quindi dimensioni pari a $150 \times 150 \text{ mm}^2$.

Come richiesto dalla normativa il tempo di maturazione del calcestruzzo è pari a 28 giorni, e pertanto il campione prefabbricato è stato mantenuto in un locale standard a temperatura $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ e umidità 65% per tale periodo. Dopo di che la superficie è stata trattata secondo i requisiti richiesti. Ad eccezione dei sei gruppi di calcestruzzo prefabbricato utilizzati per la ricerca dell'effetto dell'età di getto a 14, 56 e 90 giorni, gli altri sono stati stagionati per 28 giorni.

Il provino è stato formato inserendo la parte prefabbricata nuovamente nelle casseforme e gettandovi sopra il calcestruzzo nuovo. Il tutto è stato lasciato maturare per 28 giorni.

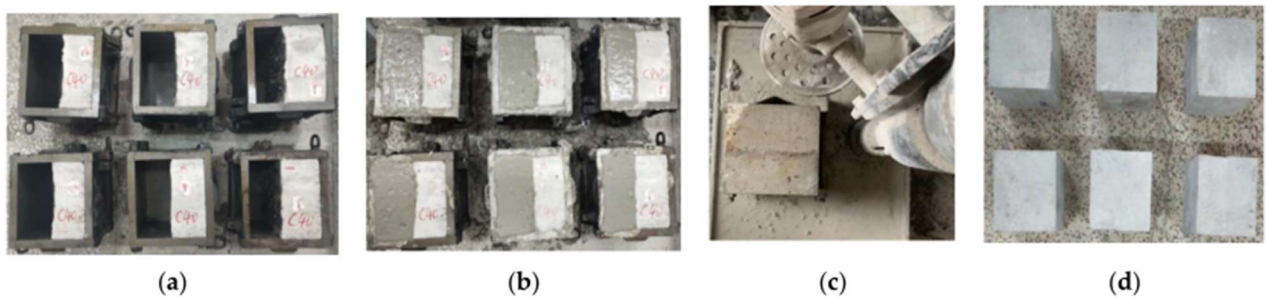


Figura 4.1.1.4 – creazione dei provini finali

4.1.2 Metodo di test

Dalla normativa cinese, l'espressione usata per calcolare la resistenza del legame interfacciale è la seguente:

$$f_b = 0,637 P/A$$

con f_b la forza di adesione interfacciale, MPa; P è il carico di picco alla rottura, N; A è l'area della sezione di rottura, mm².

Il carico è stato esercitato direttamente lungo la sezione di interfaccia, come mostrato in Figura 4.1.2.1. Questo è stato possibile tramite l'utilizzo di strisce di acciaio poste sulle superfici inferiore e superiore della macchina di prova universale (con capacità 600kN e velocità di carico di 0,05 Mpa/s). L'accortezza da adottare è lucidare la superficie di carico per ottenere un carico il più uniforme possibile.

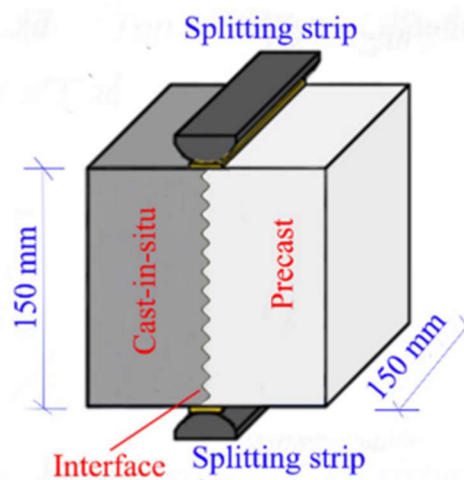


Figura 4.1.2.1 – modalità di carico all'interfaccia per il test di trazione per spacco

I dati di prova della forza di adesione per tre campioni sono trattati con i seguenti criteri:

- la resistenza del gruppo di provini è data dalla media aritmetica dei tre dati di prova;
- se la differenza tra uno dei valori massimi o minimi e la mediana supera il 15% del valore mediano, i valori massimo e minimo vengono scartati insieme e la resistenza del gruppo di provini viene assunta pari al valore mediano;
- se la differenza tra i valori massimi e minimi è superiore al 15% del valore mediano, i risultati del test di questo gruppo non sono validi.

Per valutare l'efficienza di legame dell'interfaccia, viene definito il coefficiente equivalente della forza di legame, dato dalla forza di legame interfacciale divisa per la resistenza a trazione del calcestruzzo prefabbricato, ovvero:

$$\beta_e = f_b/f_{t,p}$$

dove β_e è il coefficiente equivalente di resistenza all'incollaggio; $f_{t,p}$ è la resistenza a trazione del calcestruzzo prefabbricato, MPa.

4.2 Studio sperimentale 2

Questo studio sperimentale “Factors Affecting Bond between New and Old Concrete”, effettuato da Pedro Miguel Duarte Santos and Eduardo Nuno Brito Santos Júlio, vuole approfondire gli effetti del ritiro differenziale e della rigidità differenziale tra due strati di calcestruzzo gettati in epoche diverse. Sono entrambi parametri che spesso non sono considerati nei codici di calcolo degli attuali software strutturali, che invece considerano altri effetti come il tipo di preparazione della superficie all'interfaccia e il livello di ruvidità su essa presente. Lo studio analizza differenti condizioni di indurimento e diversi tipi di preparazione dell'interfaccia.

4.2.1 Preparazione e proprietà dei campioni

L'indurimento del calcestruzzo è stato analizzato in due condizioni differenti: una serie di provini è stata lasciata maturare all'interno del laboratorio, mantenendo quindi delle condizioni di temperatura e umidità pressoché stabili, altri provini sono stati invece lasciati maturare all'esterno, rimanendo sottoposti agli agenti atmosferici con le conseguenti criticità (sole, pioggia e vento).

Lo studio degli effetti del ritiro differenziale si è basato sulla differenza di età tra i due getti di calcestruzzo. In particolare, sono stati considerati tre intervalli temporali: 28, 56 e 84 giorni tra il getto del primo strato ed il getto del secondo.

In totale sono stati prodotti sei campioni da analizzare: 3 per i tre diversi intervalli temporali per il calcestruzzo lasciato maturare all'esterno e 3 per i tre intervalli con calcestruzzo maturato all'interno.

Il calcestruzzo è stato creato utilizzando un cemento Portland di tipo 52.5R per poter raggiungere una classe di resistenza C50/60. Gli aggregati sono sabbia fine, sabbia grossolana, calcare frantumato, con un diametro massimo pari a 19.1 mm. Nella miscela è stato inserito anche un additivo atto ad aumentare la resistenza iniziale del calcestruzzo permettendo quindi di ridurre il fabbisogno idrico della miscela lasciando pressoché inalterata la sua lavorabilità da fresco. La miscela utilizzata è unica per tutti i tipi di calcestruzzo utilizzati nella prova sperimentale e le percentuali dei vari componenti sono riportate in Tabella 4.2.1.1.

Constituent	Diameter range, mm (in.)	Quantity, kg (lb)
Fine sand	0.074 to 9.52 (0.0029 to 0.375)	295 (650)
Coarse sand	0.074 to 9.52 (0.0029 to 0.375)	640 (1421)
Fine limestone	1.19 to 19.1 (0.047 to 0.752)	375 (827)
Coarse limestone	4.76 to 19.1 (0.187 to 0.752)	545 (1202)
Portland cement Type I 52.5R	—	350 (772)
Commercial admixture	—	3.675 (8.102)
Water	—	150 (331)

Tabella 4.2.1.1 – composizione della miscela di calcestruzzo

Il ritiro è stato registrato per entrambe le condizioni di indurimento (all'esterno e all'interno) su un provino 150x150x600 mm³ utilizzando due trasduttori (Figura 4.2.1.1), uno per ogni esemplare, e come valore finale è stata considerata la media tra le due letture. In Figura 4.2.1.2 viene presentata l'evoluzione del ritiro differenziale in funzione del tempo. Il valore finale è stato inoltre paragonato con il valore teorico calcolato tramite l'Eurocodice 2 (al capitolo 3.1.4) e ciò che se ne deduce è che il calcolo teorico è decisamente conservativo in entrambe le situazioni (esterno ed interno).

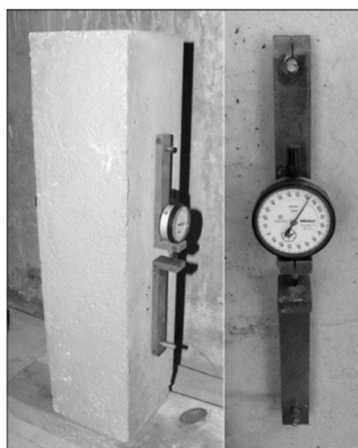


Figura 4.2.1.1 – trasduttore utilizzato per misurare il ritiro

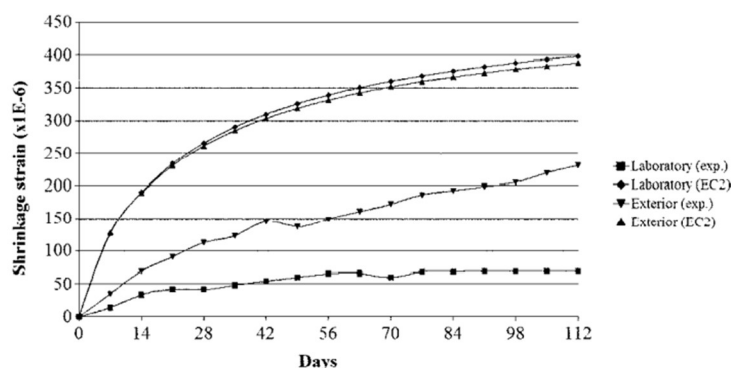


Figura 4.2.1.2 – evoluzione del ritiro differenziale con il tempo

Come per l'esperimento descritto nel capitolo precedente, anche in questo caso lo studio si è soffermato su diversi tipi di interfaccia, ottenuti con metodi differenti. In particolare, è stato scelto di analizzare quattro tipi di interfaccia oltre all'interfaccia originale (left as cast, LAC): spazzolatura a filo (wire-brushing, WB), sabbiatura (sandblasting, SAB), granigliatura (shotblasting, SHB) e lavaggio a mano (Hand-scrubbing, HS), tutti raffigurati in Figura 4.2.1.3. Tutte le tipologie sono state confrontate con l'interfaccia originale, presa appunto come riferimento. A differenza dell'esperimento descritto in precedenza, in questo caso la misura della rugosità dall'interfaccia è stata eseguita tramite un metodo più accurato, ossia tramite misuratore laser 2D, che prende come parametro da analizzare la profondità massima dei vuoti tra le protuberanze (R_v). Infatti, come d'altronde anche dimostrato dall'esperimento precedente, questo parametro influenza fortemente la resistenza di legame all'interfaccia.

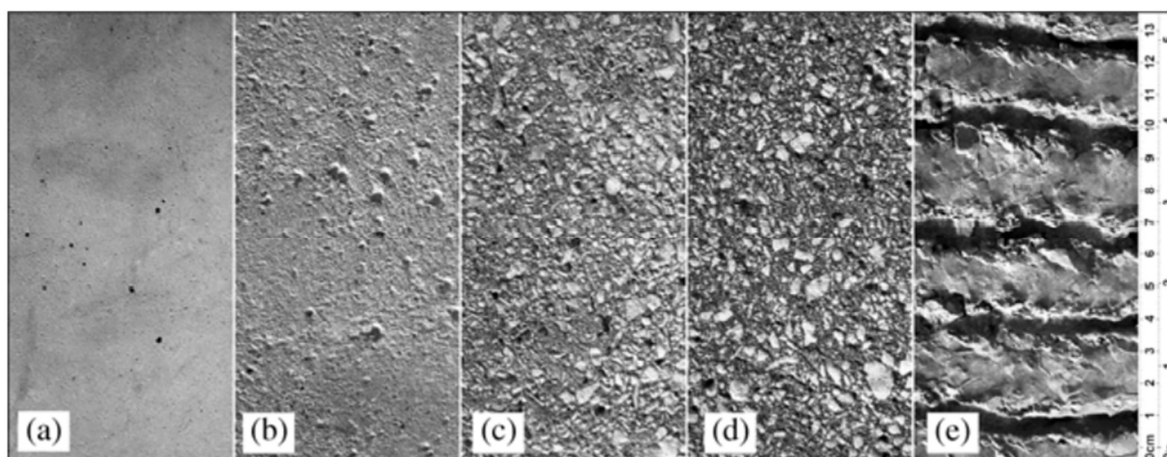


Figura 4.2.1.3 – diversi tipi di interfaccia analizzata: superficie originale (a), spazzolatura a filo (b), sabbiatura (c), granigliatura (d), lavaggio a mano (e)

Il lavaggio a mano è l'unico trattamento svolto quando il calcestruzzo di base è ancora fresco, mentre tutti gli altri vengono svolti con il calcestruzzo indurito. Al tempo di indurimento

desiderato (28, 56 o 84 giorni) viene poi gettato lo strato superiore di calcestruzzo (dopo aver pulito l'interfaccia per agevolare la presa). Dopo due giorni dal getto i campioni composti vengono rimessi nuovamente nelle condizioni di indurimento iniziali, quindi all'esterno o all'interno. Il campione composto viene lasciato maturare fino a che il getto nuovo raggiunge i 28 giorni, poi possono essere eseguiti i test spiegati in seguito.

4.2.2 Metodi di test

Sono stati effettuati due tipi di test per analizzare il comportamento a taglio e a trazione. Il primo è lo "Slant Shear Test" (prova di taglio obliqua), mentre il secondo è lo "Splitting Test" (prova di divisione), rappresentati in Figura 4.2.2.1. I due test vengono svolti su due provini differenti: per lo slant shear test viene formato un provino 150x150x450 mm con il piano di taglio inclinato di 30 gradi rispetto la verticale, per lo splitting test viene usato un provino di forma cubica di lato 150 mm.

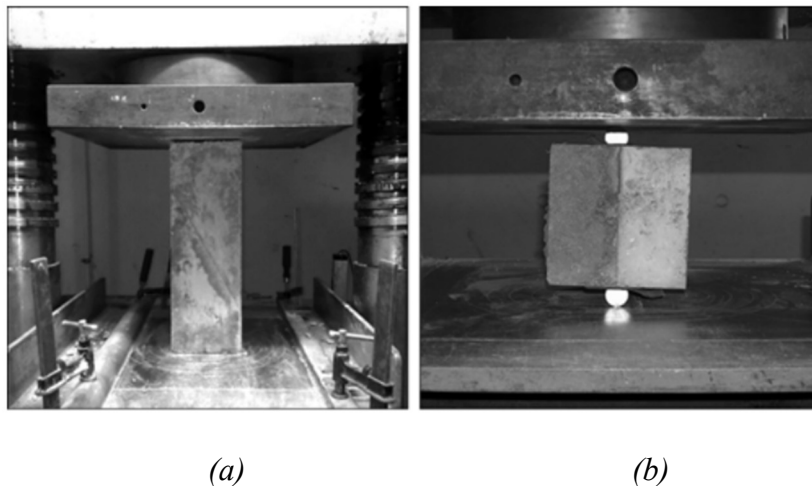


Figura 4.2.2.1 – slant shear test (a) e splitting test (b)

La macchina per il test è stata calibrata con una velocità di carico di 1kN/s per lo splitting test, 5 kN/s per lo slant shear test e 10 kN/s per il test a compressione (atto a verificare la resistenza a compressione dei vari provini).

Sono state eseguite cinque prove di ciascun test per ciascun tipo di situazione considerata, in funzione quindi della condizione di indurimento, del tipo di trattamento all'interfaccia e della differenza di età tra i due strati di calcestruzzo.

4.2.3 Risultati attesi

I test per la resistenza di legame al taglio (Figura 4.2.3.1) e alla trazione (Figura 4.2.3.2) hanno dato i seguenti risultati:

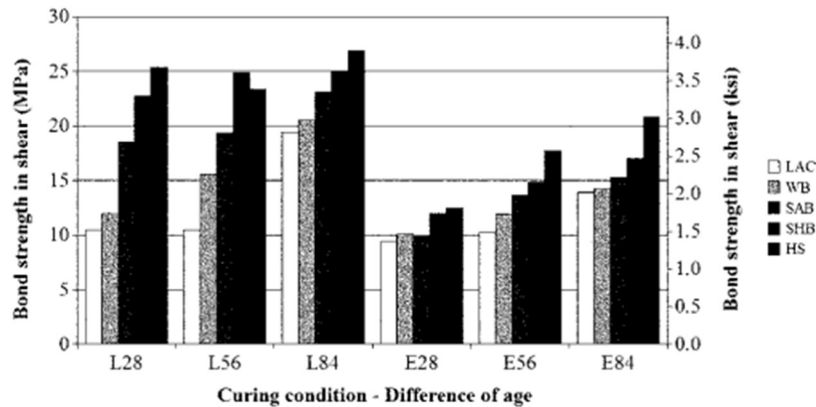


Figura 4.2.3.1 – resistenza di legame al taglio

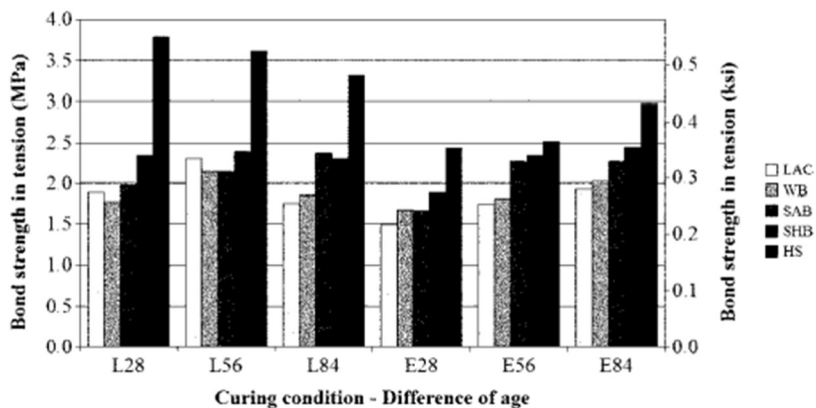


Figura 4.2.3.2 – resistenza di legame alla trazione

In generale, dai risultati sperimentali ci si aspetta un aumento della forza di legame sia all'aumentare della rugosità dell'interfaccia sia al diminuire della differenza di età tra i due calcestruzzi. Questo poiché l'aumento di rugosità genera un aumento della forza di incastro mentre una piccola differenza di età implica un minor ritiro differenziale tra i due calcestruzzi. Se invece la differenza di età tra i due calcestruzzi fosse elevata il ritiro differenziale sarebbe maggiore andando a generare tensioni aggiuntive all'interfaccia.

I risultati dei test, come mostrato in Figura 4.2.3.3, danno ragione alle ipotesi iniziali per quanto riguarda l'aumento di forza di legame all'aumentare della rugosità (ad eccezione di alcuni casi) mentre sorprendentemente danno un risultato contrario alle attese per quanto riguarda la differenza di età fra i due calcestruzzi. Viene infatti rilevato che all'aumentare della differenza

di età dei due getti la forza di legame aumenti invece che diminuire. Questa rilevazione del tutto inaspettata non è chiara e pertanto è stato svolto uno studio numerico per approfondire quanto rilevato.

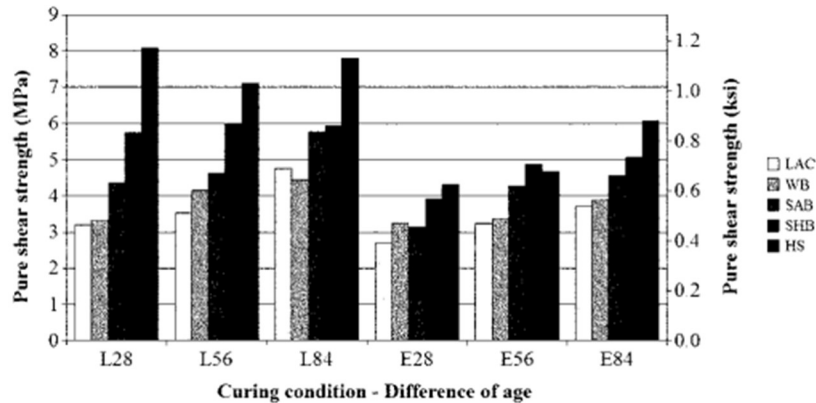


Figura 4.2.3.3 – risultati sperimentali per la resistenza al taglio

In media è stato rilevato che i campioni lasciati indurire all'esterno hanno una resistenza del 19% inferiore rispetto a quella registrata per i campioni induriti all'interno, cioè di circa 1,12 Mpa in meno.

La prova sperimentale ha evidenziato due tipi di rottura dei campioni: adesiva e coesiva, rappresentate in Figura 4.2.3.4. La frattura di tipo adesivo si manifesta all'interfaccia al raggiungimento della resistenza di legame. Questa, infatti, essendo molto minore rispetto alla resistenza di entrambi i calcestruzzi rende l'interfaccia l'anello debole del campione composito. Il fatto che avvenga all'interfaccia implica ovviamente la possibilità che possano fratturarsi i grani esposti del calcestruzzo vecchio a causa dell'effetto di ingranamento, come è stato infatti rilevato. La frattura di tipo coesivo, detta anche monolitica, si manifesta invece con una rottura del calcestruzzo più debole, sia esso quello vecchio o nuovo, a testimonianza dell'elevato grado di monolitismo garantito nei provini in cui la resistenza di legame è maggiore della resistenza di almeno uno dei due calcestruzzi.



(a)

(b)

Figura 4.2.3.4 – frattura adesiva (a) e coesiva (b)

Si evidenzia come per lo slant shear test sia siano rilevati entrambi i tipi di frattura, mentre per lo splitting test siano state rilevate solamente fratture di tipo adesivo. In particolare, è stato rilevato che per lo slant shear test il numero di fratture coesive aumenta all'aumentare della rugosità (e quindi della forza di legame) come presentato in Figura 4.2.3.5.

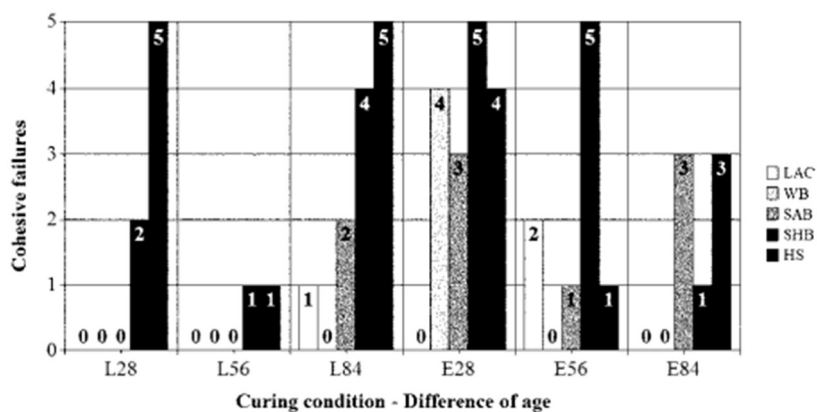


Figura 4.2.3.5 – numero di fratture coesive per i diversi tipi di rugosità

Allo scopo di capire l'influenza del ritiro differenziale e della rigidità differenziale sulla resistenza di legame all'interfaccia è stato condotto uno studio numerico utilizzando un software commerciale agli elementi finiti. Sono stati analizzati gli effetti dei due parametri in modo indipendente ed in seguito anche gli effetti dei due parametri combinati. È stato utilizzato un modello 3-D del campione per lo slant shear test costruito utilizzando una mesh (maglia) agli elementi finiti con esaedri a 20 nodi. Un modello 3-D del campione in cui è evidenziata la

posizione della linea mediana dell'interfaccia è presentato in Figura 4.2.3.6. È stata assunta l'ipotesi di materiale lineare.

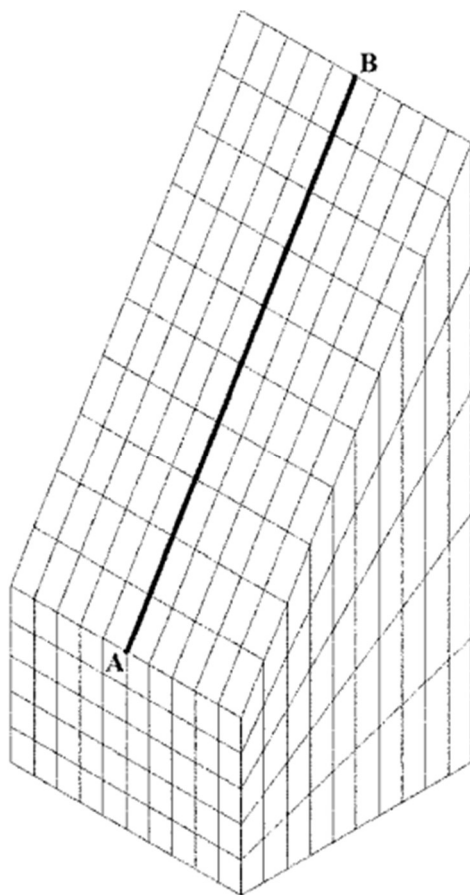


Figura 4.2.3.6 – mesh agli elementi finiti

4.3 Analisi dei risultati sperimentali

4.3.1 Effetto della resistenza del calcestruzzo gettato in opera

L'andamento in Figura 4.3.1.1 rappresenta la corrispondenza tra la forza di legame e la resistenza del calcestruzzo gettato in opera. Dal grafico si nota come la forza di legame interfacciale aumenti con l'aumentare della resistenza del calcestruzzo gettato in opera. In particolare, sono stati presi in considerazione 4 calcestruzzi con diverse classi di resistenza: C30, C35, C40 e C45, mentre per quanto riguarda la parte prefabbricata è stata fissata una classe di resistenza C40, con una rugosità all'interfaccia di 1,55 mm (calcolata con il metodo spiegato in precedenza).

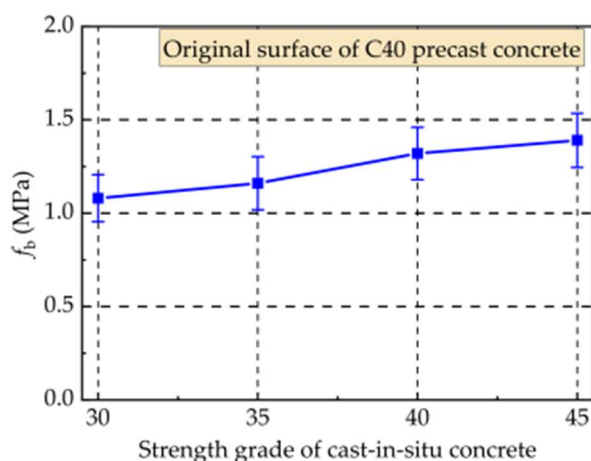


Figura 4.3.1.1 – forza di legame per diverse classi di calcestruzzo gettato in situ

Analizzando il tipo di rottura è stato notato come la spaccatura sia liscia e sia avvenuta nella sezione di interfaccia. Sulla sezione di spaccatura si è verificata una scrostatura di alcuni provini con la superficie originale del calcestruzzo prefabbricato ed in alcune interfacce di spacco è stato osservato l'ingresso della pasta legante nei pori del calcestruzzo prefabbricato.

Il fatto che la forza di legame interfacciale aumenti con l'aumentare della resistenza del calcestruzzo gettato in opera rappresenta la risposta macroscopica delle forze di ingranamento tra i cristalli di materiale (effetto microscopico), intrecciati tra loro, e formati dall'idratazione del calcestruzzo gettato in opera e del calcestruzzo prefabbricato. Nei pori e nei difetti del calcestruzzo prefabbricato crescono i prodotti di idratazione, in particolare $\text{Ca}(\text{OH})_2$, AFt e C-H-S. C-H-S e di AFt, più sottili e simili ad aghi, penetrano nei pori del calcestruzzo vecchio, mentre i composti non idratati e a idratazione incompleta del calcestruzzo vecchio idratano continuamente nel calcestruzzo nuovo gettato in opera.

Con l'aumento della resistenza del calcestruzzo gettato in opera, la pasta legante è risultata più resistente e con la necessità di meno pori aderenti all'interfaccia per migliorare il comportamento di adesione al calcestruzzo prefabbricato. Tuttavia, il coefficiente equivalente di resistenza all'adesione β_e si è rivelato pari solamente a 0,32~0,45. Ciò implica che la forza di adesione dell'interfaccia del giunto ha una grande differenza rispetto alla resistenza a trazione del calcestruzzo prefabbricato. I requisiti del calcestruzzo monolitico equivalente non sono di conseguenza soddisfatti.

4.3.2 Effetto del tipo di interfaccia del calcestruzzo prefabbricato

In questa prova sono stati confrontati i risultati ottenuti utilizzando i tre tipi di interfaccia menzionati in precedenza, ossia interfaccia originale (rugosità 1,55 mm), interfaccia formata dalla rete di chiusura formata (rugosità 5,25 mm) e del calcestruzzo prefabbricato lavato (rugosità 6,60 mm). Tutti i campioni hanno ceduto per spaccatura nella sezione di interfaccia.

Nei provini con l'interfaccia formata da una rete di chiusura la forza di legame interfacciale è ulteriormente favorita dall'effetto delle protuberanze del calcestruzzo prefabbricato che incrementano la presa del calcestruzzo gettato in opera, affiancato alle forze di ingranamento dei cristalli intrecciati derivanti dall'idratazione del calcestruzzo gettato in opera e di quello prefabbricato (come già citato in precedenza). Inoltre, alcune protuberanze di calcestruzzo sono state raschiate per esporre gli aggregati a causa del distacco della pasta legante.

Nell'ultimo tipo di provini analizzati, quelli con interfaccia ruvida lavata, gli aggregati del calcestruzzo gettato in opera si sono incastrati con quelli esposti sull'interfaccia del calcestruzzo prefabbricato, derivanti dal lavaggio con acqua in pressione, e legati dalla pasta legante. In questo caso la forza di ingranamento tra i cristalli è affiancata dalla forza d'incastro, che contribuisce a migliorare la forza di adesione superficiale. La prova di trazione per spacco ha generato in questi provini una modalità di rottura simile a quella del calcestruzzo monolitico, infatti, gli aggregati grossi interbloccati tra i due calcestruzzi si sono rotti sulla sezione di spaccatura.

L'analisi delle forze di legame per i tre casi studiati porta ad affermare che questa aumenti, in ordine, dall'interfaccia originale, all'interfaccia formata dalla rete di chiusura e infine nell'interfaccia lavata.

Questo aumento di resistenza dipende però anche dalla classe di resistenza del calcestruzzo gettato in opera. Considerando infatti un calcestruzzo C30 si nota, rispetto all'interfaccia originale, un aumento del 19,4% per l'interfaccia formata da una rete di chiusura e del 87,0% per l'interfaccia ruvida lavata con acqua in pressione. Se si utilizza invece un calcestruzzo di classe C40 le prove sperimentali hanno evidenziato un aumento del 26,5% per l'interfaccia formata da rete di chiusura e del 125,8% per l'interfaccia ruvida lavata. Tutto ciò è evidenziato in Tabella 4.3.2.1:

Surface of Precast Concrete	Strength Grade of Concrete		f_b (MPa)	β_e
	Precast	Cast-In-Situ		
Original surface	C40	C30	1.08	0.34
		C40	1.32	0.41
Closing net formed surface	C40	C30	1.29	0.40
		C40	1.67	0.53
Washed rough surface	C40	C30	2.02	0.64
		C40	2.98	0.94

Tabella 4.3.2.1 – forza di legame con diversi tipi di superficie del calcestruzzo prefabbricato

In particolare, l'aumento della classe di resistenza del calcestruzzo gettato in opera da C30 a C40 determina un incremento della forza di legame interfacciale del 22,2%, 29,4% e 47,5% rispettivamente per: la superficie originale, superficie formata dalla rete di chiusura e superficie lavata, del calcestruzzo prefabbricato.

Analizzando i provini con superficie ruvida lavata del calcestruzzo prefabbricato e con classe di resistenza del calcestruzzo gettato in opera C40 si ricava un coefficiente equivalente β_e pari

a 0,94, che implica una differenza abbastanza contenuta con la resistenza del calcestruzzo monolitico. Ciò significa che la superficie ruvida lavata è ottimale per aumentare la forza di legame interfacciale, mentre le altre interfacce difficilmente hanno ottenuto una resistenza a trazione equivalente a quella del calcestruzzo prefabbricato.

4.3.3 Effetto dell'agente di adesione all'interfaccia

La verifica dell'effetto dell'agente di adesione sull'interfaccia è più difficilmente studiabile poiché la differenza tra la forza di adesione con o senza agente di adesione è più piccola della tolleranza. Questo limite è dato dalla poca quantità di provini studiati, solo tre, che impedisce di osservare chiaramente delle differenze tra le due situazioni. Ad ogni modo, poiché le barre di errore sono quasi uguali per i provini con e senza agente di adesione a spruzzo, i risultati delle prove sono comparabili tra questi due tipi di provini utilizzando i risultati statistici.

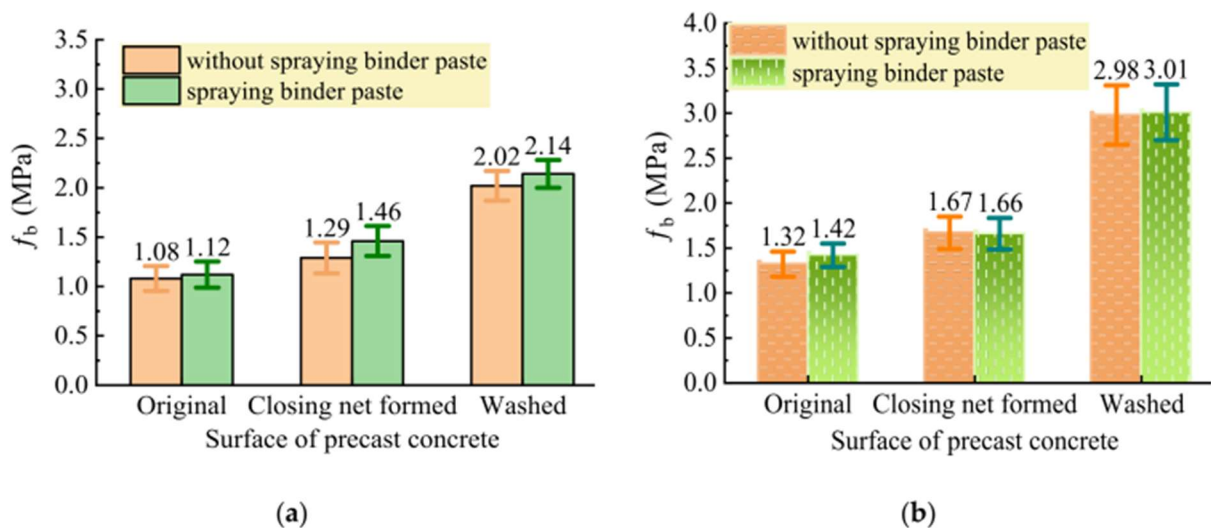


Figura 4.3.3.1 – comparazione tra forza di legame con e senza agente di adesione: calcestruzzo gettato in opera C30 (a) e C40 (b)

La prova è stata effettuata spruzzando l'agente di adesione sulla superficie del calcestruzzo prefabbricato prima del getto in opera. L'agente di adesione è una pasta di cemento con lo stesso rapporto acqua/legante del calcestruzzo gettato in opera, il legante era composto da 60% di cemento, 20% di calcare macinato (GL), 10% di FA e 10% di EA.

Lo studio è stato effettuato per due classi di calcestruzzo gettato in opera, C30 e C40. L'effetto migliore è stato nel primo, C30, in cui la presenza dell'agente di adesione ha determinato un aumento della forza di legame. L'aumento è stato diversificato per i tre tipi di superficie studiati in precedenza, ossia superficie originale (aumento del 3,7%), superficie formata con rete di chiusura (aumento del 13,2%) e superficie lavata (aumento del 5,9%). Per quanto riguarda il

calcestruzzo gettato in opera di classe C40 gli aumenti sono stati rispettivamente di: 7,6%, 0% e 1,0%.

Si deduce che l'agente di interfaccia svolga un ruolo di aiuto nella formazione dei cristalli intrecciati nell'idratazione del calcestruzzo gettato in opera con un'adeguata umidità sulla superficie del calcestruzzo prefabbricato. Infine, può essere migliorata anche la forza chimica poiché la spruzzatura di pasta di cemento contenente ceneri volanti va a reidratare il SiO₂ attivo delle ceneri volanti con il Ca(OH)₂ del calcestruzzo vecchio.

4.3.4 Effetto della rugosità del lavaggio degli aggregati esposti

La formazione di una superficie ruvida all'interfaccia del calcestruzzo prefabbricato dipende da quattro elementi: quantità di agente spennellato sulla cassaforma di interfaccia, età di maturazione del calcestruzzo prefabbricato, pressione dell'acqua di lavaggio e tempo di lavaggio.

Dall'esperienza di altri studi si evince che la rugosità (misurata con test di riempimento con sabbia, descritto in precedenza) è preferibile sia contenuta entro gli 8 mm. Da qui la decisione di studiare gli effetti della rugosità compresa tra 4 mm e 8 mm.

Le altre condizioni di lavoro sono:

- la quantità di agente ruvido per il lavaggio ad acqua era pari a 0,2-0,4 kg per metro quadro di superficie;
- Il lavaggio è iniziato 24 ore dopo la scasseratura a una temperatura ambiente di 20 ± 5 °C;
- La pressione di lavoro della macchina a getto era di 8-10 Mpa;
- Il tempo di lavaggio era di 12-15 min per metro quadrato di superficie.

In funzione delle diverse classi di resistenza dei due calcestruzzi, in Tabella 4.3.4.1 sono riportati i risultati dei test di rugosità della superficie ruvida lavata.

Roughness Range	Average Depth of Filled Sand (mm)					
	C40 Precast Concrete			C30 Precast Concrete		
	1	2	3	1	2	3
4~5 mm	4.57	4.73	4.81	4.20	4.44	4.73
5~6 mm	5.04	5.36	5.73	5.14	5.33	5.95
6~7 mm	6.30	6.73	6.94	6.13	6.36	6.92
7~8 mm	7.02	7.24	7.46	7.31	7.33	7.96

Tabella 4.3.4.1 – profondità media (mm) in funzione della classe

Come riportato in Tabella 4.3.4.1, è stato scelto di suddividere il test in quattro intervalli di rugosità, ossia 4-5 mm, 5-6 mm, 6-7 mm e 7-8 mm, le cui immagini sono rappresentate in Figura 4.3.4.1.

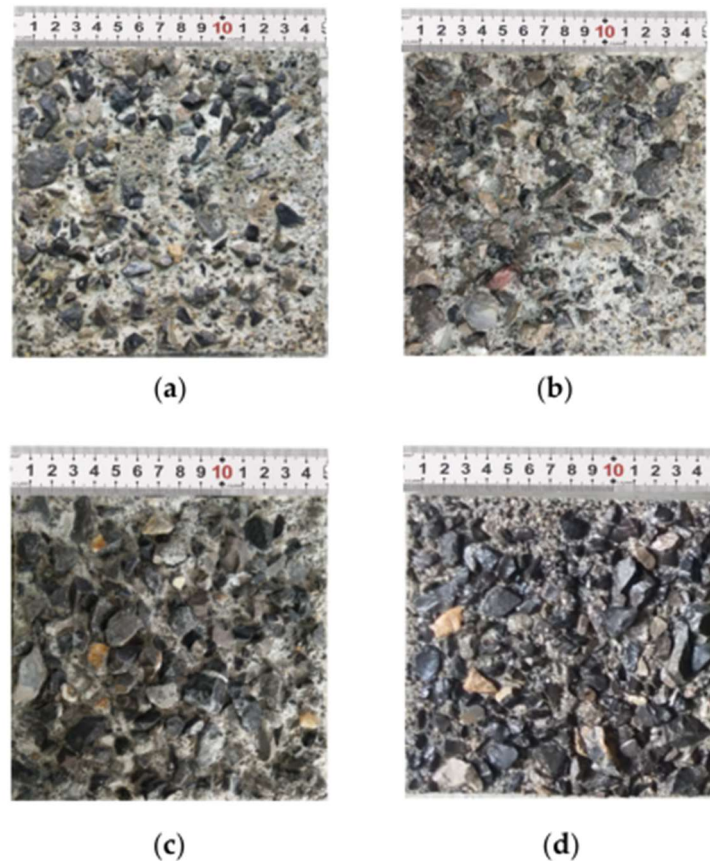


Figura 4.3.4.1 – superficie ruvida lavata per quattro livelli di rugosità: 4-5 mm (a), 5-6 mm (b), 6-7 mm (c), 7-8 mm (d)

Per studiare le modalità di rottura in funzione del tipo di rugosità e della classe di resistenza dei due calcestruzzi sono stati creati otto campioni: quattro per le classi C40 (prefabbricato) e C45 (gettato in opera) e quattro per le classi C30 (prefabbricato) e C35 (gettato in opera). Dallo splitting test si è notato come la maggioranza dei provini abbia ceduto lungo l'interfaccia, con parziale fratturazione degli aggregati esposti. Il cedimento lungo l'interfaccia si manifesta in quei provini che presentano scarsa resistenza di legame. Invece, nei provini con elevata resistenza di legame (derivante da una rugosità maggiore), il cedimento può avvenire anche in altre aree al di fuori dell'interfaccia. Questo fenomeno è infatti stato notato su alcuni campioni, dove si sono manifestate due fessure nella zona di compressione della superficie di carico: una nella zona di interfaccia e l'altra in prossimità di essa. Questi campioni si caratterizzavano per una rugosità elevata e di conseguenza si deduce che con l'aumento della rugosità dell'interfaccia, aumenta la possibilità che il cedimento del legame dell'interfaccia si trasferisca al lato debole del calcestruzzo prefabbricato o gettato in opera.

In figura 4.3.4.2 sono rappresentate le modalità di rottura appena descritte.

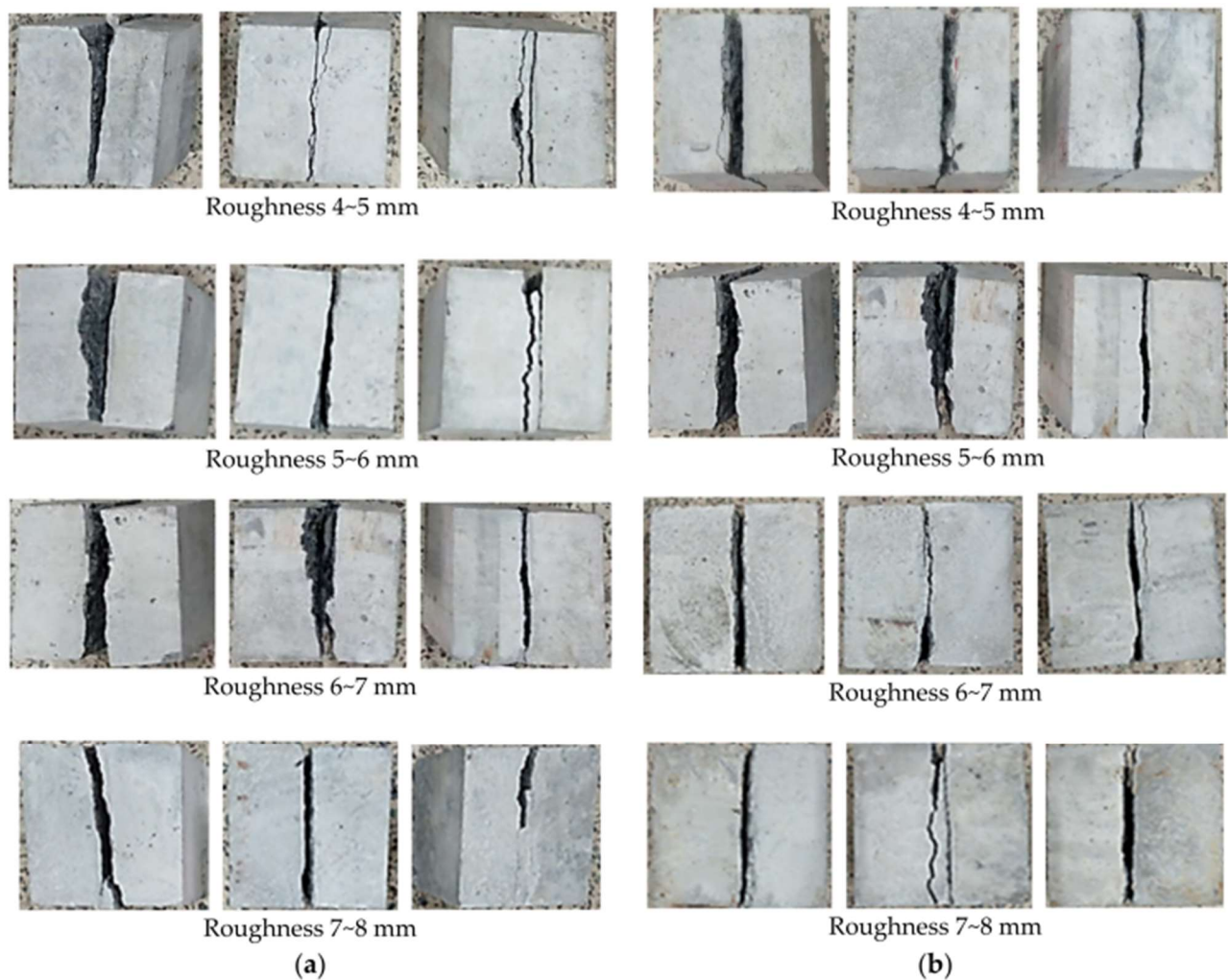


Figura 4.3.4.2 – modalità di rottura in funzione della rugosità dell'interfaccia

In Tabella 4.3.4.2 sono riportati i risultati delle prove di resistenza all'interfaccia, con il relativo coefficiente equivalente.

Strength Grade of Concrete	C40 Precast, C45 Cast-In-Situ		C30 Precast, C35 Cast-In-Situ	
Roughness of Precast Concrete	f_b (MPa)	β_e	f_b (MPa)	β_e
4~5 mm	2.69	0.85	1.99	0.84
5~6 mm	2.72	0.86	2.08	0.87
6~7 mm	3.09	0.97	2.32	0.97
7~8 mm	3.24	1.02	2.46	1.03

Tabella 4.3.4.2 – resistenza di legame in funzione della rugosità

Dai risultati in Tabella 4.3.4.2 si evince che la forza di adesione interfacciale aumenta all'aumentare della rugosità della superficie del calcestruzzo prefabbricato. Una rugosità maggiore implica infatti un aumento della dimensione esposta degli aggregati, che in questo caso è stato misurata pari a circa un terzo della dimensione massima delle particelle presenti nella miscela del calcestruzzo prefabbricato, ossia un terzo di 20 mm cioè circa 7 mm. Una maggiore esposizione genera quindi un effetto di interblocco decisamente elevato che giustifica l'aumento di forza di adesione.

Osservando i dati in tabella si nota in particolare come i campioni con una rugosità superiore di 6 mm presentino un coefficiente equivalente molto vicino a 1, che implica una forza di legame interfacciale quasi equivalente, se non addirittura di poco superiore, alla resistenza a trazione del calcestruzzo prefabbricato, determinando quindi un comportamento sempre più assimilabile ad una struttura monolitica.

4.3.5 Effetto del tempo di stoccaggio del calcestruzzo prefabbricato

Per lo studio di questo effetto è stato scelto di analizzare un provino la cui rugosità superficiale è pari a 7-8 mm (su superficie ruvida lavata).

In Tabella 4.3.5.1 sono riportati i risultati ottenuti per la forza di legame all'interfaccia per due tipi di struttura composita: calcestruzzo prefabbricato con classe di resistenza pari a C40 con calcestruzzo gettato in opera con classe di resistenza di C45 e prefabbricato in classe C30 con getto in opera in classe C35.

Strength Grade of Concrete	C40 Precast, C45 Cast-In-Situ		C30 Precast, C35 Cast-In-Situ	
Age of Precast Concrete (d)	f_b (MPa)	β_e	f_b (MPa)	β_e
14	3.24	1.02	2.46	1.03
28	3.16	0.99	2.40	1.01
56	2.88	0.91	2.08	0.87
90	2.68	0.84	1.93	0.81

Tabella 4.3.5.1 – forza di adesione per diversi tempi di stoccaggio del calcestruzzo prefabbricato

La prima osservazione immediatamente fornita dalla Tabella 4.3.5.1 è che la forza di legame interfacciale diminuisce all'aumentare dell'età di stoccaggio del calcestruzzo prefabbricato, in entrambe le classi di resistenza. Osservando i coefficienti equivalenti si nota come solamente per 14 e 28 giorni di stoccaggio essi siano in un intorno relativamente piccolo di 1, indicando quindi un comportamento monolitico della struttura composita. Per più giorni di stoccaggio il coefficiente è evidentemente troppo piccolo per poter garantire un comportamento monolitico.

Per quanto riguarda i modi di rottura, la prova sperimentale ha evidenziato come, per la maggior parte dei campioni, si sia verificata una rottura all'interfaccia con frammentazione degli

aggregati esposti, a testimoniare di come la forza di legame non fosse sufficientemente elevata per resistere al carico applicato. In un unico caso la rottura non è avvenuta all'interfaccia ma nel calcestruzzo prefabbricato, con spaccatura inclinata. Essendo infatti la classe del calcestruzzo gettato in opera più elevata di quella del calcestruzzo prefabbricato (sia nel caso di C30/C35 sia nel caso di C40/C45), ed essendo il campione caratterizzato da una bassa età di stoccaggio (quindi con un coefficiente equivalente molto vicino ad 1), è intuibile come la rottura avvenga più facilmente nella parte debole, ossia il calcestruzzo prefabbricato.

Anche in questo caso, analizzando studi precedenti, la prova sperimentale evidenzia come l'idratazione del calcestruzzo giochi un ruolo fondamentale nella resistenza all'interfaccia in funzione dell'età del calcestruzzo prefabbricato. Infatti, nel caso in cui l'idratazione sia assente o sia incompleta, sulla superficie del calcestruzzo prefabbricato vi è un'idratazione continua con i leganti del calcestruzzo gettato in opera con età di maturazione inferiore ai 28 giorni. Tuttavia, la carbonatazione precoce del calcestruzzo prefabbricato consuma l'idrato Ca(OH)_2 e riempie i pori e i difetti interfacciali, garantendo un vantaggio per i cristalli intrecciati formati dall'idratazione del calcestruzzo gettato in opera e del calcestruzzo prefabbricato.

In conclusione, lo studio con questa analisi evidenzia come, per il ciclo di produzione e posa in opera del calcestruzzo prefabbricato, si dovrebbe considerare un tempo di stoccaggio non superiore a 28 giorni.

4.3.6 Effetto della rigidità differenziale

I vari campioni sono stati gettati utilizzando la stessa miscela di calcestruzzo ma, nonostante ciò, sono stati ottenuti valori diversi per la resistenza a compressione. Pur essendo piccole, queste differenze generano delle variazioni del modulo di Young tra i diversi strati di calcestruzzo e quindi delle differenze sulla rigidità del campione composito. La distribuzione delle tensioni all'interfaccia, come dimostrato in diverse altre ricerche sperimentali, è influenzata dalla rigidità differenziale tra i vari strati di calcestruzzo e aumenta all'aumentare di quest'ultima con particolare concentrazione di tensione alle estremità. A prova di ciò in numerosi test di taglio obliquo sono state osservate rotture agli angoli, ossia agli estremi dell'interfaccia.

Infine, è stato registrato un aumento delle fratture coesive all'aumentare della differenza tra i moduli di Young (Figura 4.3.6.1) tra i due strati di calcestruzzo, derivanti da una differenza di rigidità tra questi, come spiegato in precedenza. Questa correlazione implica la possibilità di cambiare il tipo di rottura andando a modificare le rigidità dei due strati, il che è una deduzione di notevole importanza.

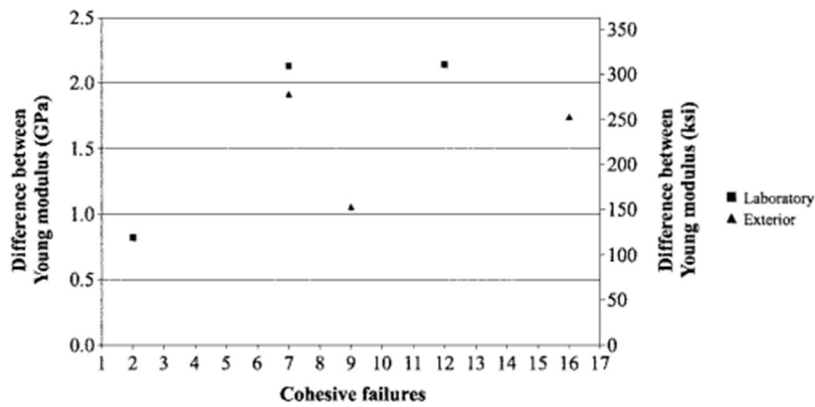


Figura 4.3.6.1 – correlazione tra il numero di fratture coesive e la rigidità differenziale

Lo studio dell'effetto della rigidità differenziale sulla distribuzione di tensione all'interfaccia è stato fatto analizzando quattro combinazioni differenti di resistenze tra i due calcestruzzi. Se per il calcestruzzo di base (vecchio) è stata mantenuta sempre la medesima classe di resistenza, C20/25, per il calcestruzzo aggiunto (nuovo) sono state analizzate quattro classi: C20/25, C25/30, C40/50, C90/105. Per queste quattro classi il coefficiente di Poisson è sempre stato considerato pari a 0,2 mentre il modulo di Young, calcolato come suggerito dall'Eurocodice 2, è risultato pari rispettivamente a: 30,31,35,44 GPa.

Nel definire il modello numerico sono state prese alcune accortezze per simulare al meglio la situazione reale. Sono stati controllati gli spostamenti nodali alle facce superiore e inferiore al fine di simulare gli effetti della frizione tra le piastre della macchina per i test e il campione di calcestruzzo. Inoltre, sulla faccia inferiore del modello, è stata posta un'unità di spostamento verticale per simulare l'azione della macchina per il test.

Quello che viene analizzato in questa modellazione numerica sono le distribuzioni degli sforzi di taglio (Figura 4.3.6.2) e sforzo normale (Figura 4.3.6.3) all'interfaccia, al fine di valutare la resistenza di quest'ultima.

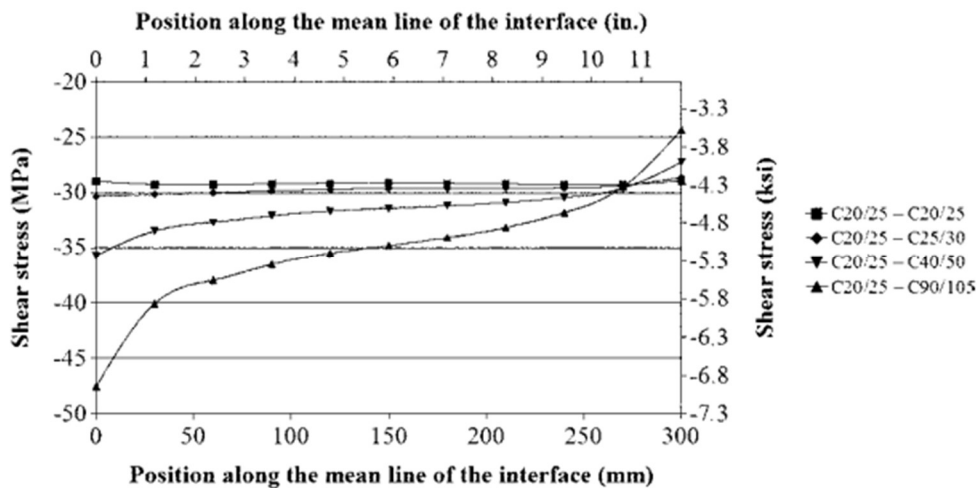


Figura 4.3.6.2 – andamento della distribuzione di sforzo di taglio

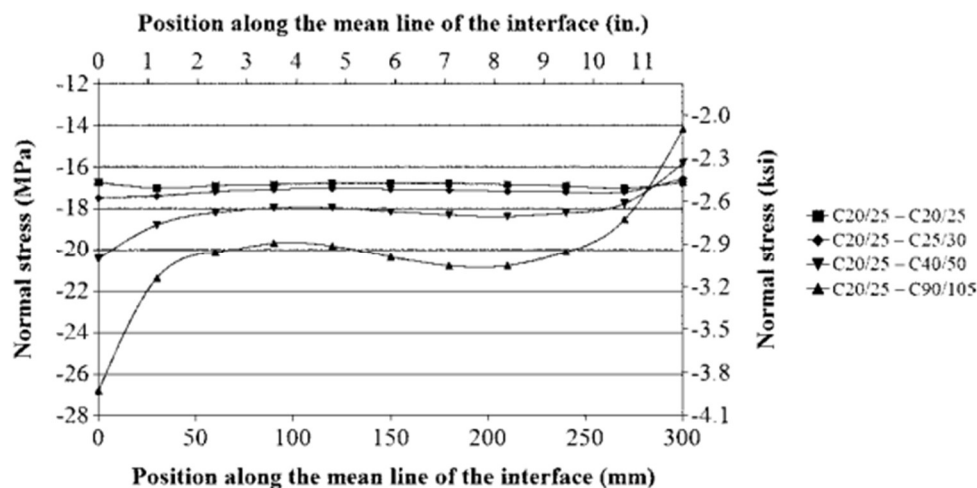


Figura 4.3.6.3 – andamento della distribuzione di sforzo normale

Come evidenziato bene in Figura 4.3.6.2 e 4.3.6.3, la distribuzione di tensioni all'interfaccia, sia di taglio che di sforzo normale, è influenzata dalla rigidità differenziale. In particolare, come citato anche in precedenza, all'aumentare della rigidità differenziale vi è un aumento di concentrazione di tensione in entrambi gli estremi ed entrambe le distribuzioni assumono sempre più un andamento a "s" (ben visibile in particolare per il campione composito C20/25 – C90/105).

È interessante notare anche il legame che c'è tra le distribuzioni di tensioni da taglio e da sforzo normale al variare della rigidità differenziale. Come evidenziato in Figura 4.3.6.4, in cui è riportato l'andamento dello sforzo di taglio in funzione dello sforzo normale, si nota come per uno stesso sforzo di taglio lo sforzo normale aumenti con l'aumentare della rigidità differenziale. È una deduzione importante poiché può spiegare i diversi modi di rottura che si sono registrati nel test di taglio obliquo.

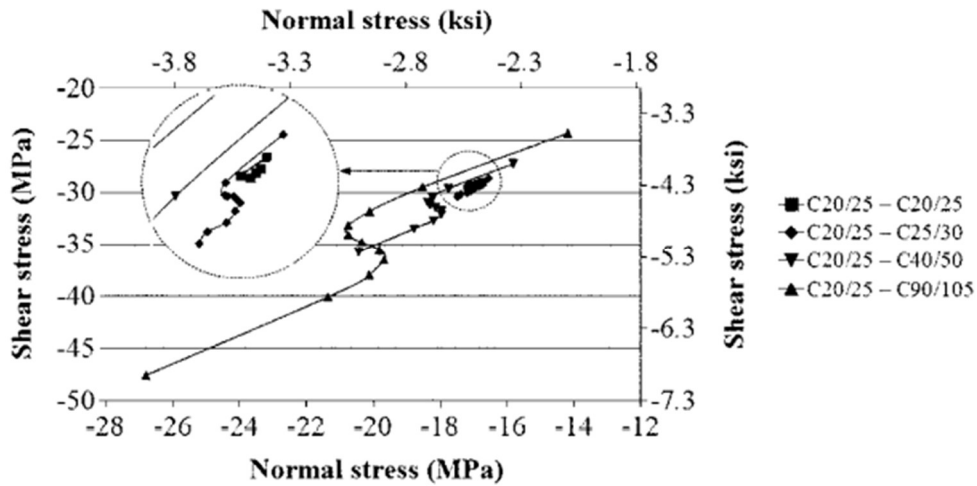


Figura 4.3.6.4 – correlazione tra sforzo di taglio e sforzo normale in funzione della rigidità differenziale

4.3.7 Effetto del ritiro differenziale

L'effetto del ritiro differenziale è stato rappresentato nel modello numerico andando a inserire lo sforzo dovuto al ritiro, registrato sperimentalmente, a ciascuna delle due metà del campione composito.

Il riscontro dato dal modello numerico va a confermare l'ipotesi iniziale, ossia che lo sforzo all'interfaccia aumenti all'aumentare del ritiro differenziale. L'aumento maggiore di sforzo si ha agli angoli, come evidenziato in Figura 4.3.7.1 e Figura 4.3.7.2, in cui sono rappresentati rispettivamente gli andamenti dello sforzo di taglio e dello sforzo normale lungo la linea mediana dell'interfaccia.

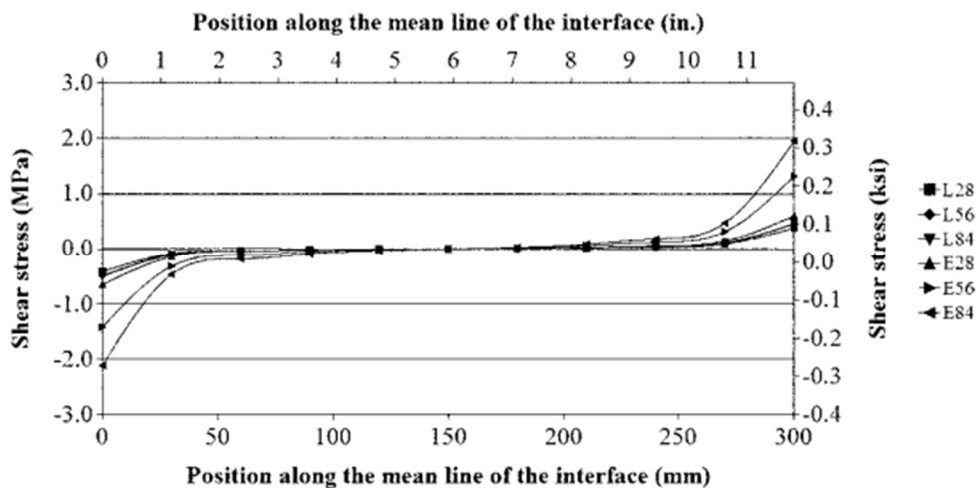


Figura 4.3.7.1 - distribuzione delle tensioni da taglio dovute al ritiro differenziale

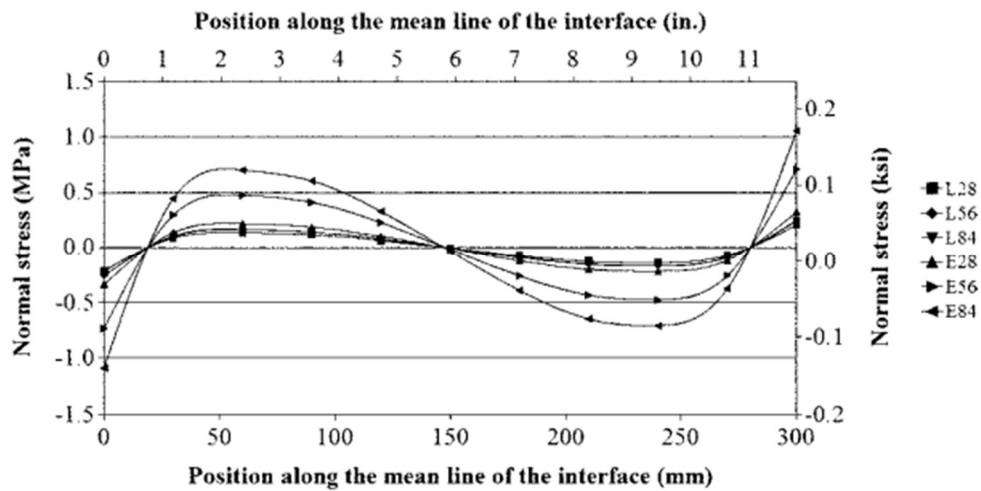


Figura 4.3.7.2 - distribuzione delle tensioni da sforzo normale dovute al ritiro differenziale

4.3.8 Effetto combinato del ritiro differenziale e della rigidità differenziale

Per analizzare gli effetti combinati del ritiro differenziale e della rigidità differenziale il modello 3-D è stato costruito tenendo conto di tutte le proprietà del calcestruzzo dipendenti dal tempo, considerate nello studio sperimentale. Per simulare la compressione della macchina di prova è stato imposto uno spostamento verticale.

Al momento del test i campioni erano già soggetti ad uno stato tensionale dovuto al ritiro differenziale dato alla differenza di età tra i due calcestruzzi. Questo stato tensionale scompare quando viene applicato il carico di compressione.

Ciò che è stato ottenuto da questo test è che il carico a rottura aumenta con la differenza di età tra i due calcestruzzi e di conseguenza con il ritiro differenziale (che dipende dal tempo), contrariamente a quanto ci si poteva inizialmente aspettare. L'aumento di resistenza è dato dagli effetti combinati del ritiro differenziale, della rigidità differenziale e del carico a compressione, come evidenziato in Figura 4.3.8.1, Figura 4.3.8.2 e Figura 4.3.8.3 in cui sono rispettivamente rappresentate le distribuzioni delle tensioni da taglio, sforzo normale e la tensione equivalente di Von Mises, tutte lungo la linea mediana dell'interfaccia.

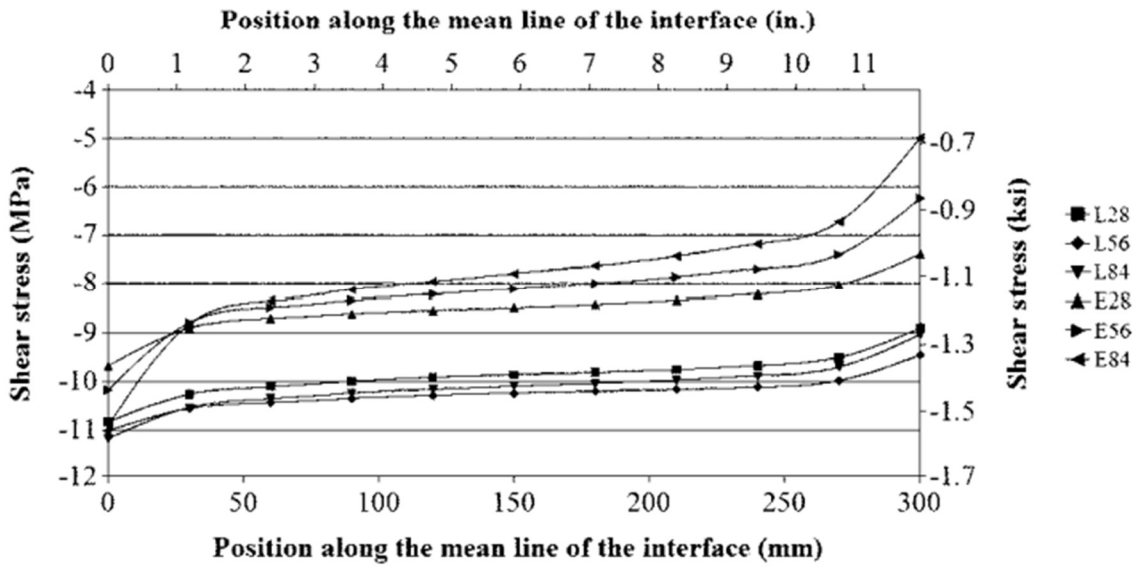


Figura 4.3.8.1 – distribuzione delle tensioni da taglio lungo la linea mediana all'interfaccia

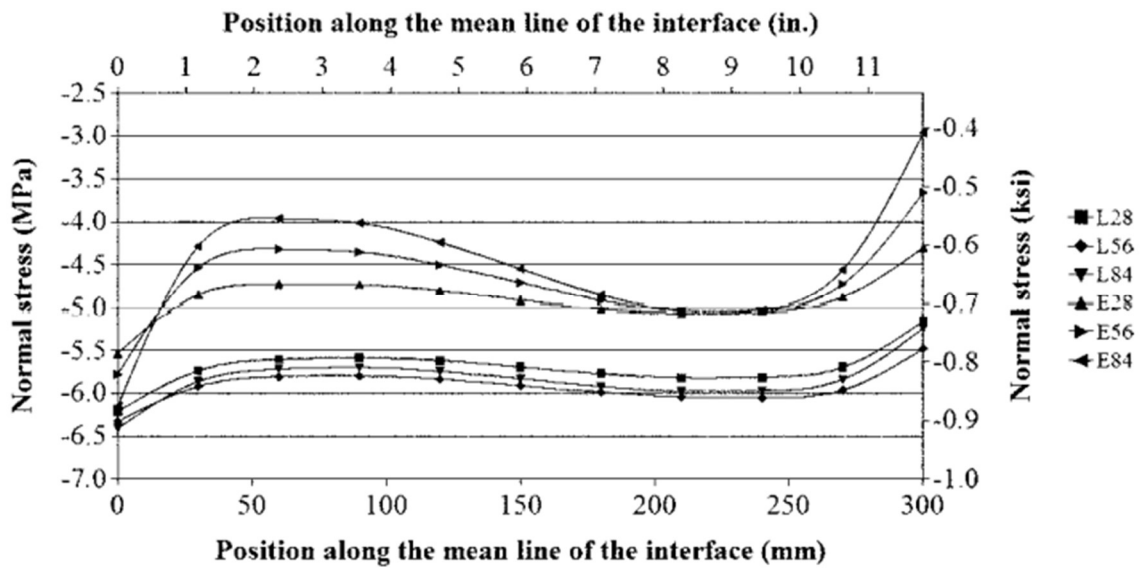


Figura 4.3.8.2 – distribuzione delle tensioni da sforzo normale lungo la linea mediana all'interfaccia

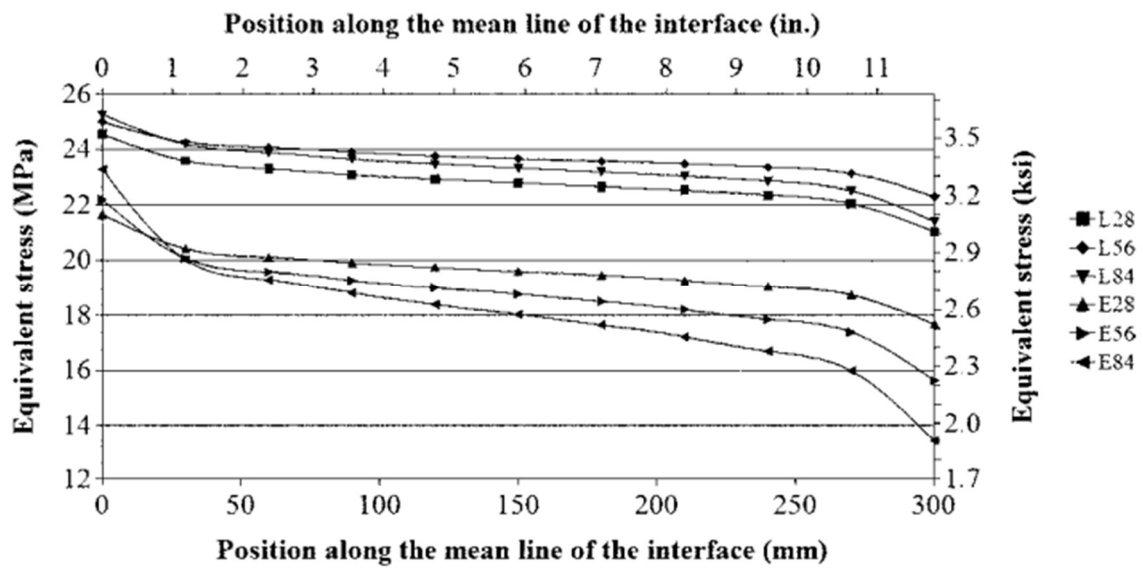


Figura 4.3.8.3 – distribuzione delle tensioni equivalenti di Von Mises lungo la linea mediana all'interfaccia

5. Conclusioni

Ciò che si evince dalle analisi effettuate in entrambi i test porta a definire quale potrebbe essere la situazione ideale per garantire la maggior resistenza possibile all'interfaccia tra il calcestruzzo prefabbricato e il calcestruzzo gettato in opera.

In particolare, si è osservato come la resistenza del legame all'interfaccia aumenti all'aumentare della resistenza del calcestruzzo gettato in opera (che nel definire le condizioni sperimentali è sempre stata considerata maggiore di quella del calcestruzzo prefabbricato). Per quanto concerne il tipo di interfaccia, il risultato migliore si è sicuramente avuto con l'interfaccia lavata con acqua in pressione, grazie all'effetto di ingranamento dei grani esposti, con limitazione però ad una rugosità maggiore 6 mm (che ricordiamo garantisce un coefficiente pari o maggiore ad uno). Il tempo ideale di maturazione per il calcestruzzo prefabbricato è di massimo 28 giorni, poiché si è osservato che con un tempo di stoccaggio maggiore l'interfaccia perde resistenza, ponendo quindi l'accento sulle tempistiche di esecuzione dei lavori che dovrebbero essere completati poco dopo la maturazione a 28 giorni del calcestruzzo prefabbricato che arriva dallo stabilimento. Per quanto riguarda invece le condizioni di maturazione si conferma come il luogo ideale di stagionatura debba essere uno stabilimento protetto, sicuramente non all'esterno dove le azioni ambientali riducono sensibilmente la resistenza. La rigidità differenziale ha un effetto importante sulle modalità di rottura poiché grandi differenze nel modulo di Young possono far variare la rottura da adesiva a coesiva. La differenza di età infine è meglio che sia elevata piuttosto che troppo contenuta perché l'aumento del ritiro differenziale fa aumentare anche la resistenza del legame, come dimostrato anche dall'analisi numerica. L'effetto della pasta legante, infine, si è dimostrato essere in linea di massima positivo ma non viene considerato degno di nota poiché l'aumento della resistenza è pressoché irrisorio e le analisi effettuate non sono significanti da un punto di vista statistico.

Tutte queste osservazioni possono quindi aiutare a capire come considerare la componente prefabbricata, per esempio delle soluzioni tecnologiche viste al capitolo 2, nel calcolo delle resistenze.

Considerando per esempio il caso di un solaio composito prefabbricato-gettato in situ, come anticipato nell'introduzione, i progettisti tendono a considerare esclusivamente la parte gettata in opera come sezione resistente, spesso non considerando la parte prefabbricata come sezione resistente (relegata quindi alla funzione di cassero a perdere). Dopo le osservazioni ottenute dalle prove sperimentali descritte al capitolo 4 possiamo però affermare come, con una adeguata resistenza di legame, si possa ampliare la sezione resistente anche alla parte prefabbricata.

Le sezioni di maggior interesse per quanto riguarda un solaio del tipo citato sono sicuramente le sezioni agli appoggi. In Figura 5.1 è rappresentato l'andamento qualitativo del momento flettente per una sezione centrale di un solaio su tre appoggi.

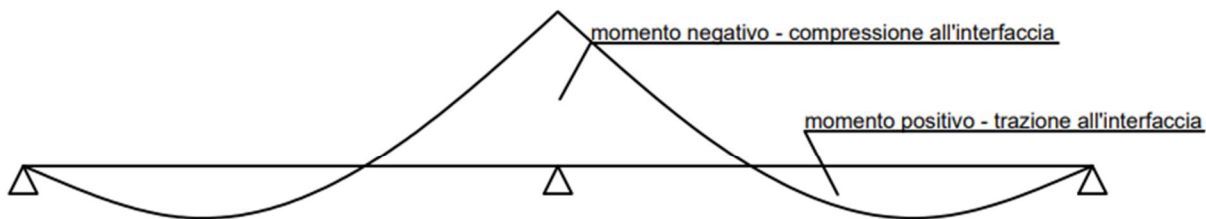


Figura 5.1 – andamento qualitativo del momento flettente per una sezione centrale di un solaio su tre appoggi

È sulle sezioni di appoggio, infatti, che il momento è negativo e va quindi a comprimere la parte inferiore della sezione. Come noto, invece, nelle sezioni di mezzera, con momento positivo, la parte superiore della sezione è compressa mentre la inferiore è tesa. In questa situazione nella parte compressa superiore la resistenza è affidata al calcestruzzo ma non sussistono grandi problematiche poiché in questo caso la parte resistente è formata da un unico getto, quello gettato in opera, che non presenta discontinuità. La parte inferiore è invece tesa con la resistenza affidata all'armatura, presente sia nella piastra prefabbricata che nella parte gettata in opera, non coinvolgendo quindi più di tanto l'interfaccia di discontinuità tra i due calcestruzzi. L'andamento delle tensioni per una sezione in campata è rappresentato in Figura 5.2.

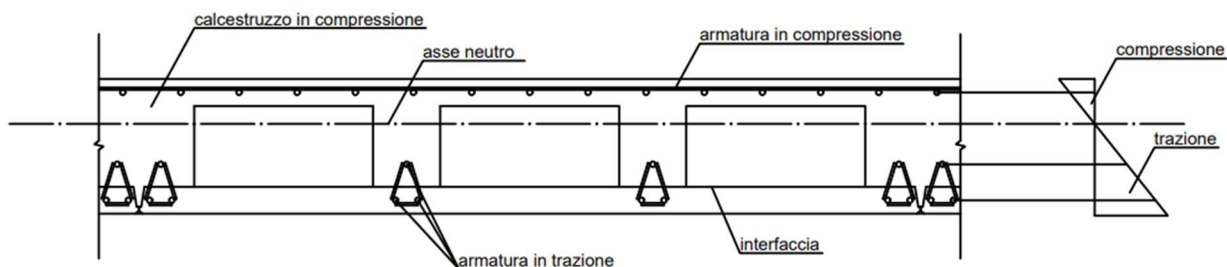


Figura 5.2 – sezione in campata di una lastra Predalles con andamento delle tensioni

Nel caso delle sezioni sugli appoggi (Figura 5.3), invece, la situazione si ribalta e, se per la parte superiore tesa la resistenza è affidata alle armature e quindi non è parte interessata dallo studio, per la parte inferiore sottostante la resistenza è affidata al calcestruzzo. Qui si manifesta invece la problematica di adesione tra i due strati di calcestruzzo poiché essi dovrebbero lavorare come un'unica opera monolitica, cosa che invece non è. Sicuramente, nel caso per esempio di lastre tralicciate, il fatto di avere un'armatura che dia continuità ai due strati di calcestruzzo aiuta, in particolare perché armonizza le deformazioni tra di essi. È altresì evidente però che con una scarsa resistenza di legame all'interfaccia, questa diventi la parte più debole della sezione resistente a compressione poiché con un carico a rottura minore si manifesteranno dapprima le fratture in quest'area.

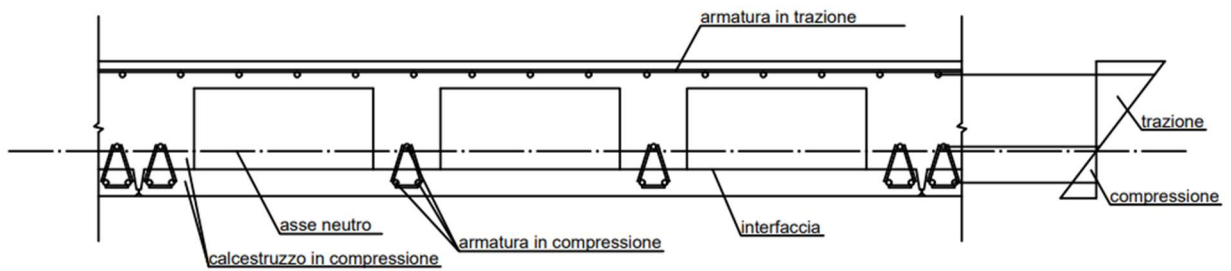


Figura 5.3 - sezione in appoggio di una lastra Predalles con andamento delle tensioni

In conclusione, capire come migliorare la resistenza del legame all'interfaccia è indispensabile per garantire un alto livello di monolitismo della sezione composta e, da quanto osservato in questi studi sperimentali si può affermare che una piastra prefabbricata con una rugosità maggiore di 6 mm data da un lavaggio ad acqua in pressione che espone fortemente gli aggregati, con un tempo di maturazione del calcestruzzo non superiore a 28 giorni accompagnata da un' elevata classe di resistenza del calcestruzzo gettato in situ può garantire le prestazioni richieste.

6. Bibliografia e sitografia

<https://www.esseteam.it/>

EN 1992-1-1, *Eurocode 2—Design of Concrete Structures—Part 1: General Rules and Rules for Buildings*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.

EN 13747-2005+A2-2010, *Precast concrete products — Floor plates for floor systems*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2010.

EN 14992-2007+A1-2012, *Precast concrete products — Wall elements*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2012.

Changyong Li, Yabin Yang, Jiuzhou Su, Huidi Meng, Liyun Pan, Shunbo Zhao, *Experimental Research on Interfacial Bonding Strength between Vertical Cast-In-Situ Joint and Precast Concrete Walls*, International Joint Research Laboratory for Eco-Building Materials and Engineering of Henan, School of Civil Engineering and Communications, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China, 2021.

Pedro Miguel Duarte Santos, Eduardo Nuno Brito Santos Júlio, *Factors Affecting Bond between New and Old Concrete*, ACI Materials Journal, 2011.