



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Dicembre 2025

Analisi delle Fessure in Elementi in Calcestruzzo Armato

Confronto tra Dati Sperimentali e Prescrizioni Normative

Relatore:

Candidato:

Prof. Ing. Maurizio Taliano

Ten. Salvatore Salerno

“Corri e non fermarti mai davanti a niente”

Sommario

Prefazione	1
Introduzione	2
1. La fessurazione	4
1.1. Tipologie di Fessure.....	4
1.2. Cause formazione Fessure	5
1.3. Stati limite di fessurazione.....	7
1.4. Formazione delle fessure	8
2. Calcolo Ampiezza Fessura.....	10
2.1. Model Code 2020.....	11
2.1.1. Calcolo dell'ampiezza.....	12
2.2. Eurocodice 2	18
2.2.1. Distanza media tra fessure	18
2.2.2. Ampiezza delle fessure	19
2.2.3. Deformazione acciaio	20
2.2.4. Area Efficace	21
2.2.5. Limiti apertura fessure	23
3. Analisi sperimentale delle fessure	24
3.1. Prime evidenze sperimentali.....	24
4. Confronto dati sperimentali e prescrizioni normative	29
4.1. Descrizione dati utilizzati	29
4.2. Confronto risultati.....	31
5. Metodo Lineare.....	45
5.1. Introduzione al Metodo.....	45
5.2. Descrizione del Metodo Lineare	46
5.2.1. Fessurazione stabilizzata.....	47
5.2.2. Formazione fessura stabilizzata – Distanza massima tra le fessure...	49
5.2.3. Apertura massima delle fessure	50
5.3. Confronto dati sperimentali e Metodo Lineare.....	52
Conclusioni	61

Appendice A	65
A1 Autore: Rizkalla	65
A2 Autore: Hartl	66
A3 Autore: Farra	67
A4 Autore: Eligehausen	69
A5 Autore: Gribniak (2018 – 2020).....	69
A6 Autore: Tan.....	69
A7 Autore: Gilbert	70
Appendice B	71
B1 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Rizkalla	71
B2 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Hartl	72
B3 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Farra	73
B4 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Eligehausen.....	75
B5 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Gribniak (2018 – 2020)	75
B6 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Tan	76
B7 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Gilbert	76
Appendice C	77
C1 Rizkalla	77
C2 Hartl.....	78
C3 Farra	79
C4 Eligehausen	81
C5 Gribniak (2018-2020).....	81
C6 Tan.....	82
C7 Gilbert	82
Bibliografia	83

Indice Delle Figure

<i>Figura 1: Microfessura [1].</i>	4
<i>Figura 2: Andamento Carico-Deformazione [1]</i>	8
<i>Figura 3: Comportamento barra prismatica soggetta a deformazione imposta [4]</i>	11
<i>Figura 4: Carico-deformazione per un elemento rinforzato centralmente sottoposto a trazione [4].</i>	12
<i>Figura 5: Area efficace di calcestruzzo teso per singola barra [4]</i>	15
<i>Figura 6: Area efficace di calcestruzzo teso per gruppo di barre[4]</i>	16
<i>Figura 7: Rappresentazione barre in sezione per Area Efficace [5]</i>	21
<i>Figura 8: Rappresentazione barre in sezione per Area Efficace [5]</i>	22
<i>Figura 9: Fase di fessurazione stabilizzata [4]</i>	25
<i>Figura 10: Tabella Valori del rapporto tra sforzo di legame medio e resistenza alla trazione media [4]</i>	26
<i>Figura 11: Comportamento fessurativo di un tirante in cemento armato sottoposto a forze crescenti [4]</i>	27
<i>Figura 12: Esempio di pattern di sperimentazione presso Università di Madrid [4]</i>	28
<i>Figura 13: Risultati sperimentazione Garicia-Perez[4]</i>	28
<i>Figura 14: Confronto dati sperimentali (Rizkalla) e EC2</i>	32
<i>Figura 15: Confronto dati sperimentali (Rizkalla) e MC2020</i>	33
<i>Figura 16: Confronto dati sperimentali (Hartl) e EC2</i>	33
<i>Figura 17: Confronto dati sperimentali (Hartl) e MC2020</i>	34
<i>Figura 18: Confronto dati sperimentali (Farra) e EC2</i>	35
<i>Figura 19: Confronto dati sperimentali (Hartl) e MC2020</i>	36
<i>Figura 20: Confronto dati sperimentali (Eligehausen) e EC2</i>	36
<i>Figura 21: Confronto dati sperimentali (Eligehausen) e MC2020</i>	37
<i>Figura 22: Confronto dati sperimentali (Gribniak) e EC2</i>	38
<i>Figura 23: Confronto dati sperimentali (Gribniak) e MC2020</i>	39
<i>Figura 24: Confronto dati sperimentali (Gribniak,2020) e EC2</i>	40
<i>Figura 25: Confronto dati sperimentali (Gribniak, 2020) e MC2020</i>	41
<i>Figura 26: Confronto dati sperimentali (Tan) e EC2</i>	42
<i>Figura 27: Confronto dati sperimentali (Tan) e MC2020</i>	42
<i>Figura 28: Confronto dati sperimentali (Gilbert) e EC2</i>	43
<i>Figura 29: Confronto dati sperimentali (Gilbert) e MC2020</i>	44

<i>Figura 30: Inizio della fase di fessurazione stabilizzata di un tirante in c.a. [14]</i>	<i>48</i>
<i>Figura 31: Andamento del coefficiente η in relazione al rapporto $F_s F_{cr}$ [14]</i>	<i>50</i>
<i>Figura 32: Diagramma del fattore $1 - \eta^2$ in relazione al rapporto $F_s F_{cr}$ [14]</i>	<i>51</i>
<i>Figura 33: Confronto dati sperimentali (Rizkalla) e Metodo Lineare</i>	<i>53</i>
<i>Figura 34: Confronto dati sperimentali (Hartl) e Metodo Lineare</i>	<i>54</i>
<i>Figura 35: Confronto dati sperimentali (Farra) e Metodo Lineare</i>	<i>55</i>
<i>Figura 36: Confronto dati sperimentali (Eligehausen) e Metodo Lineare</i>	<i>56</i>
<i>Figura 37: Confronto dati sperimentali (Gribniak, 2018) e Metodo Lineare</i>	<i>57</i>
<i>Figura 38: Confronto dati sperimentali (Gribniak, 2020) e Metodo Lineare</i>	<i>58</i>
<i>Figura 39: Confronto dati sperimentali (Gilbert) e Metodo Lineare</i>	<i>59</i>

Prefazione

La seguente tesi è incentrata sull'analisi della fessurazione in elementi in calcestruzzo armato, nello specifico l'intento è quello di confrontare e validare le misure delle fessure, ottenute attraverso metodi sperimentali di calcolo, con i metodi proposti dalle normative, in particolar modo Eurocodice 2 (EC2) e Model Code 2020 (MC2020). Analizzare lo stato fessurativo negli edifici in c.a. risulta di fondamentale importanza dato che in tali edifici la fessurazione è inevitabile a causa della scarsa resistenza a trazione del calcestruzzo e dei molteplici fenomeni ai quali le strutture sono soggette quali ritiro, variazioni termiche, sollecitazioni meccaniche, agenti chimici e difetti costruttivi.

Le fessure non solo compromettono l'estetica degli edifici ma possono, inoltre, compromettere l'integrità strutturale, la durabilità e le prestazioni strutturali dell'opera. In particolar modo a causa degli eventi fessurativi si pone a diretto contatto l'armatura con l'ambiente circostante causando l'ossidazione di quest'ultima e la conseguente perdita di resistenza a trazione. Lo studio delle fessure richiede dunque particolare attenzione ed essendo un fenomeno particolarmente complesso ne deriva un elevato numero di parametri da analizzare e una varietà di formule da utilizzarsi per determinare il valore di passo ed ampiezza delle fessure.

Dunque, l'obiettivo finale dell'elaborato è confrontare i valori sperimentali dell'ampiezza delle fessure con i valori ottenuti da prescrizioni normative e validare tali metodi sperimentali.

Introduzione

La fessurazione rappresenta uno dei fenomeni più rilevanti nello studio del comportamento degli elementi strutturali in calcestruzzo armato, seppur essendo legata alla natura stessa del materiale e della sua interazione con le barre di armatura. La fessura semplice è definita come una discontinuità visibile e misurabile della matrice di calcestruzzo. Le fessure nel calcestruzzo sono considerate inevitabili e possono formarsi precocemente nel calcestruzzo sia fresco che indurito [1]. La presenza di fessure influisce in maniera significativa sulla durabilità, sull'estetica e anche sulla funzionalità delle strutture. A tal fine un obiettivo primario nella progettazione strutturale è costituito dalla corretta previsione e dal controllo della fessurazione.

Le normative tecniche, nazionali e internazionali, in particolar modo Eurocodice 2 e Model Code 2020 forniscono metodi di calcolo e criteri di verifica volti a determinare e limitare l'ampiezza e la distribuzione delle fessure entro valori compatibili con la sicurezza e la durabilità della struttura. Questi metodi si basano su assunzioni teoriche e condizioni particolari come materiali, geometrie e modalità di calcolo; pertanto, si ricorre all'analisi sperimentale, attraverso prove di laboratorio o in situ, per valutare la formazione e l'evoluzione delle fessure. L'obiettivo principale di questo lavoro di tesi sarà dunque quello di osservare e valutare i valori forniti dai metodi sperimentali utilizzati per calcolare il passo e l'ampiezza delle fessure, e confrontare tali risultati con i risultati ottenuti dal calcolo dell'ampiezza delle fessure attraverso le prescrizioni normative, in particolar modo facendo riferimento all'Eurocodice 2 (EC2) e al Model Code 2020 (MC2020) e in seguito ad un Metodo Lineare sperimentale. All'interno del lavoro di tesi si presterà particolare attenzione ad alcuni aspetti rilevanti, in particolar modo verrà posta l'attenzione sulle differenze proposte dalla nuova versione dell'EC2 rispetto alla precedente relativamente al calcolo della cosiddetta Area Efficace; e agli aggiornamenti della nuova versione del MC 2020 rispetto alla precedente per quanto concerne la formula per il passo delle fessure. Successivamente, in una seconda parte del lavoro di tesi, è richiesto un secondo

confronto con i valori sperimentali forniti. In particolar modo, il dipartimento di ricerca del Politecnico di Torino, attraverso i docenti: Taliano – Debernardi, ha predisposto un cosiddetto “Metodo Lineare” per il calcolo dell’ampiezza delle fessure e della lunghezza di trasmissione di queste ultime. Si procederà pertanto ad un secondo confronto tra i risultati sperimentali e i valori ottenuti attraverso il “Metodo Lineare” sopracitato.

1. La fessurazione

La fessurazione è un fenomeno inevitabile nonché intrinseco delle strutture in calcestruzzo, derivante dalla bassa resistenza a trazione del calcestruzzo nonché dal procedimento stesso di messa in opera di quest'ultimo (presa e indurimento). Le fessure, infatti, possono manifestarsi nel calcestruzzo fresco (fessurazione precoce) ma anche nel calcestruzzo indurito [1].

1.1. Tipologie di Fessure

Le fessure possono essere classificate in base alla loro posizione e al loro orientamento[1]:

- Microfessure: fessure che si sviluppano attorno alle barre di armatura ma non compaiono sulla superficie del calcestruzzo. La loro esistenza è stata dimostrata sperimentalmente da Broms (1965) e Goto e Otsuka (1971);



Figura 1: Microfessura [1].

- Fessure superficiali: si sviluppano sulla superficie del calcestruzzo e devono essere controllate dall'armatura[1];
- Fessure trasversali: si sviluppano perpendicolarmente all'armatura principale e sono principalmente indotte dai carichi[1];
- Fessure longitudinali: si sviluppano parallelamente all'armatura principale e sono solitamente causate dalla componente radiale delle tensioni di aderenza

che porta a rottura del copriferro. Questa tipologia di fessure è controllata dall'armatura a taglio (staffe)[1];

1.2. Cause formazione Fessure

Le diverse tipologie di fessure traggono la loro origine dalle diverse cause che le generano e in relazione alle tipologie di fessure.

Le cause delle fessure possono essere suddivise in due principali categorie:

- Fessure precoci e fessure Indotte da deformazioni imposte;
- Fessure indotte dai carichi.

Si analizzano le due diverse categorie principali[1].

Le fessure precoci e le fessure indotte da deformazioni imposte possono formarsi subito dopo la gettata del calcestruzzo oppure nella fase di indurimento di quest'ultimo e sono generate da deformazioni non legate ai carichi di esercizio:

- Assestamento del calcestruzzo plastico: in seguito alla fase di gettata del calcestruzzo si generano le prime fessure dovute all'assestamento di quest'ultimo[1];
- Calore di idratazione: in presenza di strutture richiedenti elevato quantitativo di calcestruzzo, il calore di idratazione produce differenze di temperature tra le zone interne e le zone esterne causando fessurazioni[1];
- Ritiro plastico: una rapida evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo, dovuto al processo di presa ed indurimento, provoca una contrazione plastica da cui si generano le fessure[1];
- Assestamenti differenziali: sono deformazioni imposte nel calcestruzzo indurito e derivano dalle forze di coazione in strutture staticamente indeterminate causate da assestamenti differenziali delle fondazioni o del terreno[1];
- Altre Cause (EN 1992-1-1): Le fessure possono derivare anche da reazioni chimiche espansive all'interno del calcestruzzo indurito.

Le fessurazioni indotte da carichi, invece, sono indotte principalmente dai carichi di esercizio in seguito alla loro applicazione[1]:

- Trazione pura: a causa di forze di trazione che si sviluppano sull'elemento, ne deriva la formazione di fessure con lati paralleli su tutta la sezione[1];
- Flessione: le fessure iniziano dalla faccia tesa e si arrestano prima di raggiungere l'asse neutro;
- Taglio: le fessure seguono traiettorie inclinate in presenza di forze di taglio elevate;
- Precompressione: L'introduzione della forza di precompressione può causare fessure quasi parallele all'asse dell'elemento note come forze orizzontali e possono essere classificate come Fessure da Spalling, ovvero causate da tensioni di spalling nell'anima; invece, le Fessure da Bursting, causate da tensioni di bursting nell'asse del trefolo di precompressione[1];
- Tensioni compressive eccessive: tensioni di compressione eccessive dovute al carico di servizio che possono portare a fessure longitudinali e creep elevato;
- Fessure Goto: queste fessure si formano a causa dell'interazione acciaio calcestruzzo principalmente attraverso le nervature dell'armatura. L'interazione acciaio armatura genera picchi di stress locali che portano alla formazione di fessure interne [1]:

La formazione delle fessure non è un fenomeno isolato. Infatti, dalla formazione delle fessure ne derivano alcuni fenomeni, in particolar modo si evidenziano [1]:

- Tension Stiffening: è il comportamento del calcestruzzo teso fra le fessure che contribuisce a portare i carichi di trazione aumentando la rigidità dell'armatura tesa. Questo è dovuto all'aderenza tra la barra di acciaio e il calcestruzzo[1];
- Effetto del copriferro: L'ampiezza della fessura superficiale aumenta con un copriferro maggiore. Alcune teorie come la "no-slip theory" imputano l'ampiezza della fessura alla deformazione del copriferro. Tuttavia, la variazione dell'ampiezza della fessura dovuta al copriferro è studiata sperimentalmente facendo riferimento anche alle fessure di Goto[1];

- Discontinuità dello stress: Le fessure si verificano in presenza di improvvisi cambiamenti di stress, come in presenza di carichi concentrati, aree di elevato stress di aderenza o in presenza di barre interrotte[1];

Dall'analisi delle tipologie di fessure e delle cause che determinano la loro comparsa, tenuto conto che la fessurazione è un fenomeno inevitabile, si evince l'importanza del controllo e dello studio legato ad esse. Il controllo delle fessure, infatti, è fondamentale per diversi motivi. Il problema principale risiede, non tanto nell'esistenza delle crepe, quanto nella loro larghezza e la loro distribuzione. In relazione a questi indicatori (studiati nella seconda parte del lavoro di tesi) riusciamo ad analizzare i nostri elementi in calcestruzzo armato in relazione al loro comportamento strutturale, alla loro durabilità, alla prevenzione ed anche in relazione al comfort del cliente. Per quanto concerne il comportamento strutturale degli edifici in c.a. l'osservazione di questi fenomeni ne fornisce indicazioni a riguardo, infatti, la disposizione delle crepe, ad esempio, è un indicatore della direzione e del livello di sollecitazioni cui gli elementi sono soggetti.

Il controllo delle crepe risulta essere un aspetto fondamentale della progettazione e della valutazione delle strutture in c.a.

1.3. Stati limite di fessurazione

Lo studio della fessurazione richiede, oltre l'analisi delle tipologie, delle cause e dei motivi di investigazione, anche approfondimenti dal punto di vista dello stato limite di fessurazione, in particolar modo lo sviluppo delle differenti fasi di fessurazione riguardanti lo stato limite di esercizio. Prendendo l'esempio di un tirante in calcestruzzo armato, considerando la non linearità meccanica dell'elemento (fig.2) si possono evidenziare le differenti fasi di fessurazione. Riscontriamo una prima fase chiamata "fase non fessurata" ovvero la fase in cui un elemento soggetto a sforzo come quello di trazione, non presenta la comparsa della prima fessura; pertanto, si definisce l'elemento come interamente

reagente (Stadio I) presentando un comportamento carico-deformazione di tipo lineare. Andando ad aumentare la forza di trazione nascerà una prima fessura e il passaggio alla seconda fase chiamata “formazione delle fessure”, un processo che continua su tutto l’elemento fino al raggiungimento della successiva fase detta “fessurazione stabilizzata”. In questa fase si ipotizza che non siano possibili altre fessurazioni del tirante, al contrario il comportamento meccanico osservato segue una legge lineare, parallela al percorso che avrebbe una barra nuda (Stadio II). Incrementando ulteriormente la forza di trazione si giunge alla quarta ed ultima fase nella quale si arriva alla tensione di snervamento dell’acciaio [1] [2].

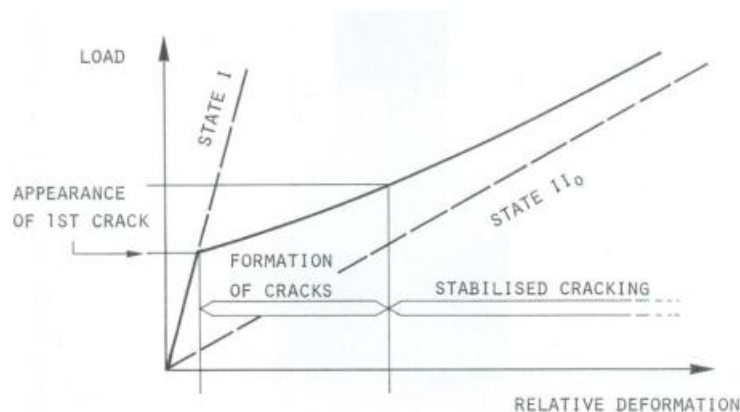


Figura 2: Andamento Carico-Deformazione [1]

1.4. Formazione delle fessure

Come ribadito in precedenza, la formazione delle fessure è un fenomeno inevitabile negli elementi in calcestruzzo armato, questo deriva dalla scarsa resistenza a trazione di quest’ultimo. Una fessura inizia quindi a formarsi nel momento in cui la resistenza a trazione dovuta ai carichi o ai vincoli imposti supera la resistenza a trazione del calcestruzzo e dunque il materiale non è più in grado di supportare tali sforzi. Distinguiamo pertanto, due distinte fasi nella formazione delle fessure. La prima detta

fase di formazione delle fessure (Crack Formation Phase) nella quale compaiono le prime fessure isolate; la seconda detta fase di fessurazione stabilizzata nella quale le fessure aumentano a causa di incrementi di carico e si raggiunge una condizione stabilizzata[1].

La prima fessura non si verifica casualmente, ma si manifesta nelle zone più deboli della sezione, come nelle aree soggette alla massima sollecitazione di trazione o in presenza di difetti. Dopo la formazione della prima fessura il calcestruzzo si scarica in tale punto e lo sforzo di trazione viene assorbito dall'acciaio delle barre di armatura grazie alla tensione che nasce dall'aderenza tra acciaio e calcestruzzo. Grazie a questa aderenza si genera un fenomeno di scorrimento relativo nel quale acciaio e calcestruzzo iniziano a muoversi in maniera differente non deformandosi più allo stesso modo, tale scorrimento raggiunge il suo massimo in corrispondenza della fessura e si riduce progressivamente allontanandosi da essa[1].

In seguito agli incrementi di carico si formano altre fessure, inizialmente poche e distanziate, ma con l'aumento del carico la rigidità dell'elemento diminuisce ed aumentano le fessure che si distribuiscono lungo la zona tesa fino ad arrivare alla fase di fessurazione stabilizzata. In questa fase si valuta la distanza tra le fessure che è influenzata dalla cosiddetta lunghezza di trasmissione, ovvero la distanza necessaria affinché l'acciaio trasferisca lo sforzo di trazione al calcestruzzo tramite aderenza. Dunque, la relazione tra la lunghezza di trasmissione e la disposizione delle barre di armatura mi permette di determinare lo schema fessurativo definitivo e di procedere alla sua valutazione[1].

2. Calcolo Ampiezza Fessura

Si procede alla definizione dei differenti approcci proposti dalle normative, in particolar modo Eurocodice 2 e Model Code 2020 per determinare l'ampiezza delle fessure e della distribuzione di quest'ultime.

L'approccio generale dei modelli semplificati, adottato per il calcolo dell'ampiezza della fessura nel caso di elementi in calcestruzzo armato ordinario, si basano sulla soluzione dell'integrale 2.1[3]:

$$w = \int_0^{s_r} \varepsilon_s - \varepsilon_c dx \quad (2.1)$$

Dato che la risoluzione di questo integrale risulta troppo complessa per le applicazioni tecniche, si riporta direttamente l'espressione per determinare l'ampiezza media della fessura (2.2)[3]:

$$w = s_{rm}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (2.2)$$

Dove w indica la larghezza della fessura, s_{rm} è la spaziatura tra le fessure e $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ è la differenza tra la deformazione media dell'acciaio e del calcestruzzo lungo la spaziatura tra le fessure[3].

Nelle precedenti norme la 2.2 era moltiplicata per un coefficiente $\beta = 1.7$, definito coefficiente che correla l'ampiezza media del valore di calcolo, tale coefficiente tuttavia, non è riportato nelle recenti normative. Data la generalità dalle precedenti espressioni, si ricorre all'utilizzo delle espressioni proposte dal Model Code 2020 e dall'Eurocodice 2, i cui risultati mostrano previsioni migliori dell'ampiezza delle fessure.

2.1. Model Code 2020

Si fa riferimento al metodo proposto dalla nuova versione del Model Code 2020 per il calcolo dell'ampiezza delle fessure.

Secondo quanto riportato dalla norma i calcoli che determinano l'espressione per calcolare l'ampiezza delle fessure si basano sul caso base di una barra prismatica in calcestruzzo armato, soggetta a trazione assiale, corretti tramite dei fattori per stimare l'ampiezza delle fessure longitudinali. Considerando il comportamento sotto sforzo di trazione crescente nella fase di SLE (stato limite di esercizio) si distinguono tre diverse fasi [4]:

- Fase non fessurata;
- Fase di formazione della fessura;
- Fase di fessurazione stabilizzata.

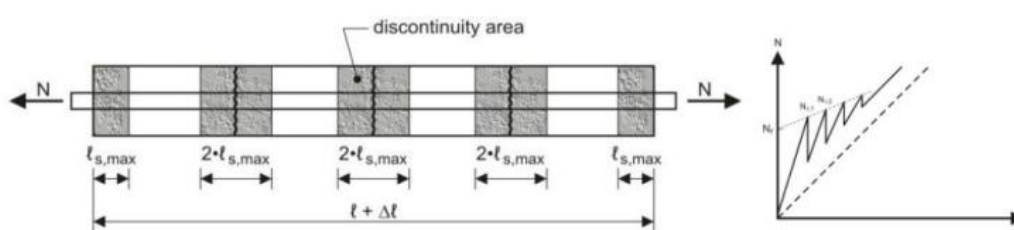


Figura 3: Comportamento barra prismatica soggetta a deformazione imposta [4]

Si riporta, di seguito, la rappresentazione semplificata del comportamento carico-deformazione di un elemento rinforzato centralmente il quale mostra una rappresentazione semplificata del comportamento carico-deformazione di un elemento vincolato alle estremità, rinforzato centralmente e soggetto a trazione o deformazione imposta (fig 4). Secondo la semplificazione, nella fase di formazione della fessura (2) la forza di trazione assiale non aumenta. Quando si sono formate sufficienti crepe da garantire che non vi siano aree indisturbate, (1), la resistenza a trazione del calcestruzzo non può più essere raggiunta tra le fessure, quindi non possono formarsi nuove fessure. Questo è l'inizio della fase di fessurazione stabilizzata (3). In questa

fase, non si formano nuove fessure, ma quelle esistenti si allargano. Infine, l'acciaio inizierà a snervarsi nella fase (5).

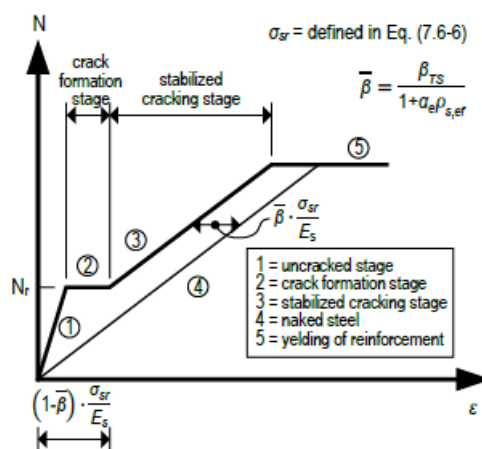


Figura 4: Carico-deformazione per un elemento rinforzato centralmente sottoposto a trazione [4].

Dopo aver svolto l'introduzione relativa al caso considerato per il calcolo dell'ampiezza delle fessure, si procede all'esplicazione del calcolo di quest'ultima.

2.1.1. Calcolo dell'ampiezza

Secondo quanto riportato dalla Normativa, il Model Code 2020 segue l'approccio semplificato secondo cui la fase di fessurazione stabilizzata ha inizio quando il carico applicato supera il carico di fessurazione. La relazione utilizzata per stimare l'ampiezza della fessura (2.3), valida per la fase di fessurazione stabilizzata, deriva dall'equazione 2.1 sostituendo la distanza media finale tra le fessure con quella massima assunta pari a due volte la lunghezza di trasmissione e includendo l'effetto della deformazione del calcestruzzo da ritiro ε_{cs} [4].

$$\omega_{cal} = k_{1/r} s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sm}) \quad (2.3)$$

Dove:

- $k_{1/r}$ è un fattore che tiene conto dell'aumento dell'ampiezza della fessura in funzione del copriferro, dovuto alla curvatura a flessione. Nel caso di pura trazione, questo fattore si riduce di 1,0. Per situazioni di flessione combinata con sforzo assiale, esso può essere determinato a partire da[4]:

$$k_{1/r} = \frac{h-x}{d-x} \quad (2.4)$$

Indicando con:

h: l'altezza della sezione;

d: è la profondità della sezione;

x: è la profondità dell'asse neutro della sezione fessurata.

- $s_{r,max}$ è la massima distanza tra le fessure nella fase di fessurazione stabilizzata o il doppio della lunghezza di trasferimento nella fase di formazione della fessura;
- ε_{sm} è la deformazione media dell'acciaio lungo la lunghezza $l_{z,max}$;
- ε_{cm} è la deformazione media del calcestruzzo lungo la lunghezza $l_{z,max}$.

Per determinare la spaziatura massima delle fessure nella fase di fessurazione stabilizzata, è possibile valutarla utilizzando l'equazione (2.5). L'accuratezza di questo modello può essere migliorata, ad esempio introducendo uno sforzo di legame variabile lungo la lunghezza di trasferimento. Il modello si basa sul calcolo della spaziatura media delle fessure nella fase di fessurazione stabilizzata. È stato calibrato utilizzando risultati sperimentali[4]:

$$s_{r,max} = \beta_w \left(k_c c + k_{\phi/\rho} k_{fl} k_b \frac{f_{ctm} \phi}{\tau_{bms} \rho_{s,ef}} \right) \quad (2.5)$$

Dove:

- β_w è un fattore che può essere preso pari a 1.7 per la fase di fessurazione stabilizzata o 2.0 per la fase di formazione della fessura;
- k_c è un parametro empirico per quantificare l'influenza del copriferro. Per semplicità $k_c = 1.5$;
- c è il massimo valore di copriferro verticale e orizzontale dalla barra;

- $k_{\phi/\rho}$ è un parametro per quantificare l'influenza del legame τ_{bms} ; se il valore di τ_{bms} è costante lungo la lunghezza di trasferimento, $k_{\phi/\rho} = 0.25$;
- k_{fl} è un fattore che tiene conto della distribuzione delle tensioni prima della rottura; il suo valore può essere determinato in base a:

$$k_{fl} = \frac{1}{2} \left(\frac{h-x_g-h_{c,ef}}{h-x_g} \right) \quad (2.6)$$

- k_b è un fattore per tenere conto dell'effetto della “casting position” sulla spaziatura delle crepe

$$k_b \begin{cases} 0.9 \text{ per rinforzi locali in ottime condizioni} \\ 1.2 \text{ per rinforzi locali in scarse condizioni} \end{cases}$$

- τ_{bms} è la forza di aderenza tra acciaio e calcestruzzo (tab 1);
- $\rho_{s,ef}$ è il rapporto di rinforzo effettivo secondo:

$$\rho_{s,ef} = \frac{A_s}{A_{c,ef,group}} \quad \text{or} \quad \rho_{s,ef} = \frac{\frac{\pi\phi^2}{4}}{A_{c,ef,bar}} \quad (2.7)$$

- β_{TS} è un coefficiente empirico per valutare la deformazione media dell'acciaio rispetto al calcestruzzo a seconda del tipo di carico[4].

Load Type	Crack Formation Strage	Stabilized cracking stage
Short-term Instantaneous loading	$\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$	$\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$
	$\beta_{TS} = 0.6$	$\beta_{TS} = 0.6$
Long-term, repeated loading	$\tau_{bms} = 1.35 \cdot f_{ctm}(t)$	$\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$
	$\beta_{TS} = 0.6$	$\beta_{TS} = 0.4$

Tab 1: Valori di τ_{bms} , β_{TS} e η_r per deformazione delle barre[4].

Si indica con $A_{c,ef}$ l'area efficace di calcestruzzo tesa. Il concetto di area efficace è fondamentale nel calcolo dell'ampiezza delle fessure perché permette di calcolarle e verificarle in modo realistico. Lo scopo principale dell'area efficace è calcolare il rapporto di armatura efficace $\rho_{s,ef}$. Tale rapporto non è semplicemente un rapporto tra aree, ma considera la porzione di calcestruzzo che collabora con l'armatura per il controllo delle fessure.

Identifichiamo quindi, l'area efficace di calcestruzzo tesa come la zona di calcestruzzo attorno a una o più barre di armatura che si assuma contribuisca al *tension stiffening*, ovvero l'irrigidimento a trazione che il calcestruzzo fornisce tra fessure consecutive. Il rapporto di armatura efficace ($\rho_{s,ef}$) risulta un parametro chiave nella formula per il calcolo della distanza massima delle fessure $s_{r,max}$ [4].

Il Model Code 2020 distingue due casi per il calcolo dell'area efficace, a seconda che si consideri una singola barra isolata o un gruppo di barre le cui aree di influenza di sovrappongono [4].

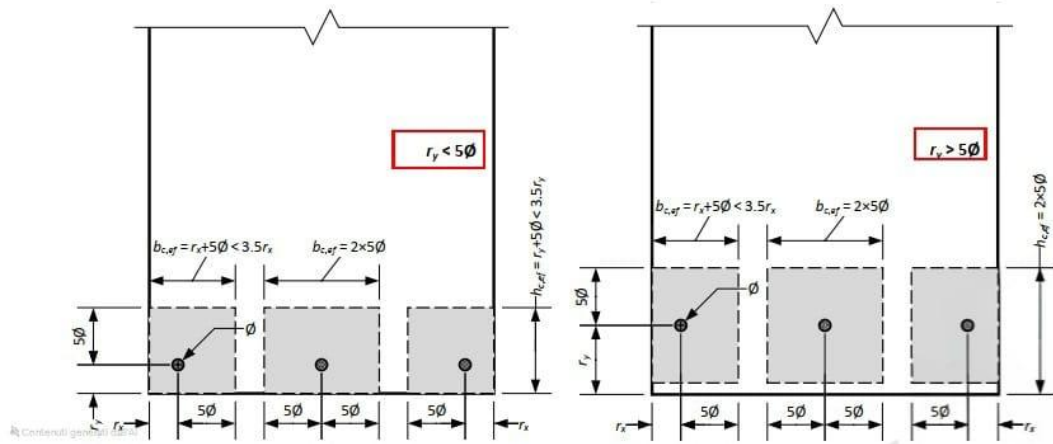


Figura 5: Area efficace di calcestruzzo teso per singola barra [4]

Con $A_{c,ef,bar}$ = area efficace del calcestruzzo teso per singola barra;

$$A_{c,ef,bar} = b_{c,ef} \cdot h_{c,ef} \quad (2.7)$$

Dove:

- $b_{c,ef} = \min(r_x + 5\phi; 10\phi; 3.5r_x)$ (2.7a)

- $h_{c,ef} = \min(r_y + 5\phi; 10\phi; 3.5r_y) \leq h - x$ (2.7b)

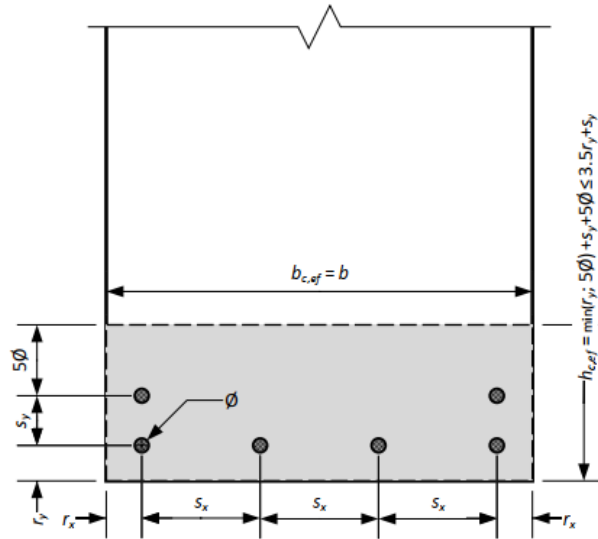


Figura 6: Area efficace di calcestruzzo teso per gruppo di barre [4]

Con $A_{c,ef,group}$ = area efficace del calcestruzzo teso per gruppo di barre;

$$A_{c,ef,group} = b_{c,ef} \cdot h_{c,ef} \quad (2.8)$$

Dove:

- $b_{c,ef} = b$ (2.8a)

- $h_{c,ef} = \min(r_y + 5\phi; 10\phi; 3.5r_y) + (\eta_l - 1)s_y \leq h - x$ (2.8b)

Indicando con:

A_s è l'area totale delle barre senza interazione;

r_y è il copriferro fino al centro della barra in direzione y;

x è la profondità dell'asse neutro;

η_l è il numero di strati di armatura;

s_y è l'interasse in direzione y tra le barre nella zona tesa;

r_x è il copriferro fino al centro della barra in direzione x;

s_x è l'interasse in direzione x tra le barre in zona tesa.

Per quanto concerne la differenza di deformazione riportata nella 2.3, occorre effettuare alcune precisazioni.

Per un elemento sottoposto a carichi diretti (fessurazione stabilizzata) o sottoposto a deformazioni imposte (fase di formazione della fessura), in cui il vincolo di estremità prevale sulla deformazione media relativa, nell'equazione (2.9), si ricava da[4]:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s - \beta_{TS}\sigma_{sr,ef}}{E_s} \geq \frac{\sigma_s}{E_s} (1 - \beta_{TS}) \quad (2.9)$$

Per un elemento sottoposto a deformazioni imposte vincolate (fase di formazione della fessura) e vincolato ai bordi, la deformazione media relativa che tiene conto dell'effetto del ritiro, nell'equazione (2.10), si ricava da[4]:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sm} = R_{ax}\varepsilon_{free} - \beta_{TS} \frac{f_{ctm}}{E_c} \quad (2.10)$$

- Dove:
- σ_s è la tensione dell'acciaio nella fessura
- $\sigma_{sr,ef}$ è la tensione dell'acciaio in una fessura nella fase di formazione della fessura data dall'equazione: $\sigma_{sr,ef} = \frac{f_{ctm}}{\rho_{s,ef}} (1 + \rho_{s,ef})$
- R_{ax} fattore di vincolo
- ε_{free} è la deformazione imposta che si sviluppa dopo la fase di costruzione quando viene applicato il vincolo.

2.2. Eurocodice 2

Nel Capitolo 7 dell'Eurocodice 2 è riportato il calcolo dell'apertura delle fessure, in particolare nel paragrafo "Stati Limite di Esercizio". Come precedentemente ribadito, la presenza di fessure non può essere evitata ma fa parte del comportamento fisiologico del calcestruzzo; tuttavia, una apertura eccessiva delle fessure può compromettere la durabilità e la funzionalità degli elementi. Per questo motivo l'Eurocodice prevede criteri di calcolo volti a garantire che la larghezza delle fessure rimanga entro certi limiti. Pertanto, si effettua un procedimento di verifica della fessurazione che si basa sulle due grandezze fondamentali che saranno analizzate: la distanza media fra fessure e l'ampiezza caratteristica della fessura. Grazie a questi due parametri è possibile descrivere ed analizzare il quadro fessurativo.

2.2.1. Distanza media tra fessure

Il primo parametro, indicato con $s_{r,max}$, non è direttamente osservabile in fase di progetto, ma è stato ricavato attraverso misure sperimentali. Essa dipende dal copriferro, diametro delle barre e dalla percentuale di armatura tesa. La formulazione proposta dall'Eurocodice è la seguente[5]:

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad (2.11)$$

Dove:

- c rappresenta la distanza media tra l'asse della barra e la superficie del calcestruzzo (copriferro). Maggiore è il copriferro, maggiore sarà la distanza tra le fessure;
- ϕ diametro delle barre di armatura. Un maggiore diametro delle barre produce anch'esso una maggiore distanza tra le fessure;
- $\rho_{p,eff}$ percentuale di armatura efficace, è definita come il rapporto tra l'area dell'acciaio in zona tesa e area del calcestruzzo coinvolta nella fessurazione.

Maggiore quantità di acciaio teso provoca una minore distanza tra le fessure poiché la deformazione viene distribuita su un maggior numero di barre;

- k_1 coefficiente che tiene conto della distribuzione delle tensioni. $k_1 = 0.8$ per la flessione, $k_1 = 1$ per la trazione pura;
- k_2 coefficiente che riflette la quantità di aderenza acciaio-calcestruzzo. $k_2 = 0.5$ per barre ad aderenza migliorata, $k_2 = 1$ per barre lisce;
- k_3 coefficiente fisso pari a 3.4, rappresenta un fattore di taratura.

La formulazione, attraverso i suoi parametri sopracitati, esprime il concetto che la distanza media tra le fessure è maggiormente ridotta quanto maggiore è la capacità dell'armatura di mantenere il calcestruzzo circostante, garantendo un quadro fessurativo diffuso ma con ampiezze contenute[5].

2.2.2. Ampiezza delle fessure

L'ampiezza caratteristica delle fessure, indicata con w_k , è definita dall'Eurocodice 2 come il prodotto tra la distanza media delle fessure e la differenza di deformazione tra acciaio e calcestruzzo in zona tesa[5]:

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (2.12)$$

Dove:

- $s_{r,max}$ è la distanza tra le fessure (2.11);
- ε_{sm} è la deformazione media dell'acciaio;
- ε_{cm} è la deformazione media del calcestruzzo.

L'espressione sintetizza il meccanismo di formazione delle fessure, ovvero quando l'acciaio si deforma soggetto a trazione, tende ad allungarsi, al contrario il calcestruzzo incapace di seguire tale deformazione, si fessura. L'apertura della fessura corrisponde dunque alla differenza di allungamento tra fessure successive[5].

2.2.3. Deformazione acciaio

Trattando la deformazione dell'acciaio precedentemente citate, particolare attenzione è rivolta alla deformazione dell'acciaio ε_{sm} . Esso richiede di considerare non solo la tensione effettiva nello stato limite di esercizio, ma anche la parte collaborante del calcestruzzo non fessurato. L'Eurocodice 2 quindi introduce un termine correttivo per ridurre la deformazione apparente[5]:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \sigma_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \quad (2.13)$$

Dove:

- σ_s tensione dell'acciaio determinata dalle analisi di flessione o trazione;
- $f_{ct,eff}$ resistenza a trazione del calcestruzzo efficace. Esso dipende dall'età del calcestruzzo e dal tempo di applicazione del carico;
- k_t coefficiente che dipende dalla durata del carico. Carichi di lunga durata producono fessure più ampie poiché per effetto del fluage il calcestruzzo tende a rilassarsi. Il coefficiente può assumere valori pari a $\begin{cases} 0.4; \\ 0.6 \end{cases}$;
- $\sigma_e = \frac{E_s}{E_c}$ rappresenta il rapporto tra il modulo elastico dell'acciaio e quello del calcestruzzo;
- $\rho_{p,eff}$ percentuale di armatura efficace.

L'intera espressione permette di tener conto sia della rigidità relativa dei due materiali che l'influenza della quantità di armatura presente[5].

La formulazione fa riferimento al calcolo della deformazione media dell'acciaio ε_{sm} poiché per quanto riguarda la deformazione media del calcestruzzo ε_{cm} può essere trascurata dopo la formazione delle fessure dato che il calcestruzzo fessurato non contribuisce significativamente alla resistenza. Per questo motivo l'apertura delle fessure è quasi sempre determinata dalla deformazione dell'acciaio.

2.2.4. Area Efficace

Nel calcolo della fessurazione, come visto in precedenza, non si tiene conto dell'intera sezione di calcestruzzo, ma solo di una porzione definita *Area Efficace*, $A_{c,eff}$. Questo deriva dal fatto che in Stadio II il calcestruzzo lontano dalle barre non partecipa alla trasmissione delle tensioni di aderenza tra acciaio e calcestruzzo.

Nella precedente versione dell'Eurocodice 2, l'area efficace del calcestruzzo teso era definita con criteri semplificati, ad esempio limitando l'altezza della zona di calcestruzzo teso considerandola in proporzione al copriferro o ad una frazione della sezione.

Nella nuova versione dell'Eurocodice 2, è stata proposta una riformulazione dell'area efficace così da poter tenere conto, in modo più raffinato, della distribuzione delle tensioni e della curvatura nella sezione. L'Eurocodice 2 stabilisce che l'area efficace sia delimitata da una zona di profondità misurata dal lembo teso della sezione verso l'interno. Il calcolo di questo parametro è differenziato a seconda della sezione e della quantità di armatura nella sezione.

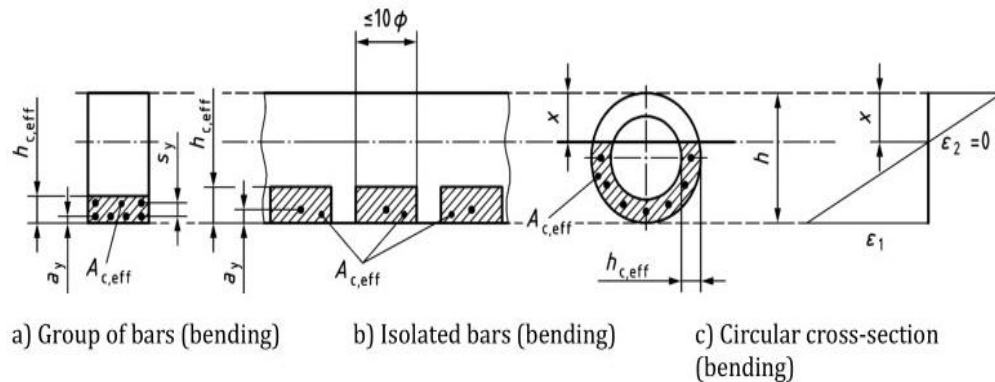


Figura 7: Rappresentazione barre in sezione per Area Efficace [5]

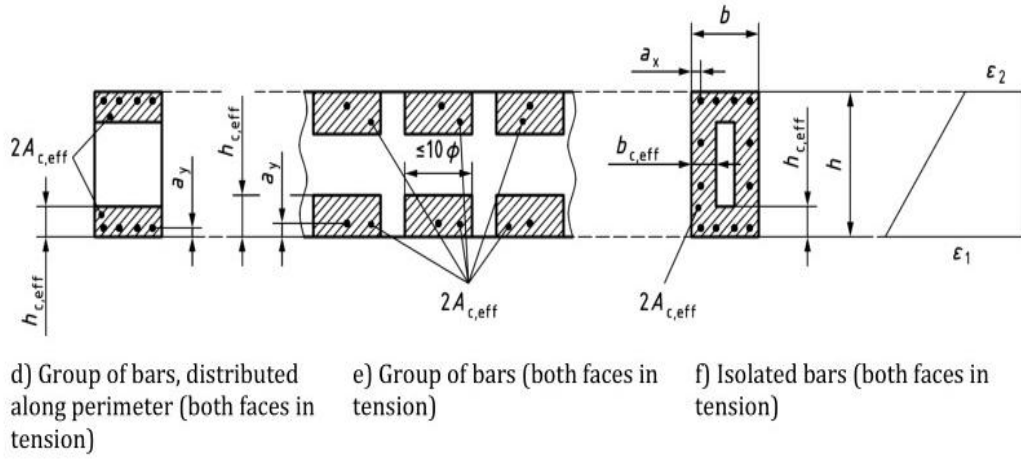


Figura 8: Rappresentazione barre in sezione per Area Efficace [5]

Per un singolo strato di barre[5]:

$$h_{c,eff} = \min\{a_y + 5\phi; 10\phi; 3.5a_y; h - x; \frac{h}{2}\}$$

Per n strati di barre distanziati s_y [5]:

$$h_{c,eff} = \min\{\min(a_y + 5\phi; 10\phi; 3.5a_y) + (n - 1)s_y; h - x; \frac{h}{2}\}$$

Fig. c): sezione trasversale circolare:[5]

$$h_{c,eff} = \min\{a + 5\phi; 10\phi; 3.5a\}$$

Fig. d) a f): trazione (con o senza flessione)[5]

$$h_{c,eff} = \min\{a_y + 5\phi; 10\phi; 3.5a_y; 0.5h\}$$

$$b_{c,eff} = \min\{a_x + 5\phi; 10\phi; 3.5a_x; 0.5b\}$$

L'area efficace è quindi calcolata dal prodotto tra la larghezza della sezione e la profondità determinata come precedentemente visto.

2.2.5. Limiti apertura fessure

Le formulazioni per determinare l'apertura delle fessure sono effettuate anche in funzione della verifica del limite di apertura. Essa, secondo quanto riportato dall'Eurocodice 2, non deve superare un valore limite indicato con $\omega_{k,lim}$ determinato in funzione della classe di esposizione e dalla destinazione di utilizzo della struttura. L'Eurocodice 2 indica valori tipici che variano tra 0.2 e 0.4. In caso di strutture esposte ad ambienti molto aggressivi o soggette a cicli di gelo e disgelo, è imposto un limite severo pari a 0.2, al fine di impedire l'azione di agenti dannosi. Invece, per elementi non esposti ad agenti dannosi o per i quali non sono richiesti requisiti elevati di durabilità, è imposto un valore meno severo pari a 0.4.

Classe di esposizione	Elementi di calcestruzzo armato normale e precompresso con cavi non aderenti	Elementi precompressi con cavi aderenti
	Combinazione di carico permanente	Combinazione di carico frequente
X0, XC1	0.4	0.2
XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XS1, XS2, XS3	0.3	0.2
		Decompressione
Nota 1: per le classi di esposizione X0, XC1, l'ampiezza delle fessure non influenza la durabilità di questo limite è posto per garantire un aspetto accettabile. In assenza di requisiti relativi all'aspetto questo limite può essere migliorato. Nota 2: Per queste classi di esposizione, inoltre, si raccomanda che la decompressione sia verificata sotto la combinazione di carico quasi permanente.		

Tab 2: Verifica, limite di tensione e larghezza della fessura per durabilità[5]

La verifica finale consiste nel confrontare il valore calcolato con la 2.12 ed il limite imposto dalla normativa. La verifica risulta soddisfatta se[5]:

$$w_k \leq \omega_{k,lim} \quad (2.14)$$

3. Analisi sperimentale delle fessure

La fessurazione, come già ribadito in precedenza, rappresenta un aspetto complesso nello studio degli stati limite di esercizio (SLE). Per tale motivo a partire dagli anni Sessanta, molti ricercatori hanno analizzato i meccanismi di fessurazione e ciò che ne deriva da tale fenomeno, formulando modelli teorico-sperimentali che, progressivamente, hanno consentito di giungere alle relazioni di progetto inserite nelle normative internazionali.

Sebbene le relazioni fornite dai modelli teorici normativi siano molto pratiche per la stima della fessurazione, la loro accuratezza dipende dalle ipotesi semplificative adottate. Per questo motivo, al fine di validare e calibrare tali modelli sono stati condotti numerosi studi sperimentali che hanno consentito di individuare i parametri influenti sull'analisi della fessurazione quali, copriferro, curvatura della sezione e diametro delle barre di armatura. Gli studi e le analisi dei diversi ricercatori sono evidenziati all'interno del *fib Bulletin 114 (2024)* al quale faremo riferimento per questa analisi. In particolar modo saranno analizzati gli studi più rilevanti di Perez C., Garcia, Gribniak, Rimkus, Borosnoyoi, Bebbi, Goto e Broms, ed in seguito i risultati proposti da Rizkalla, Hartl, Farra, Eligehausen, Tan e Gilbert.

3.1. Prime evidenze sperimentali

Gli studi sperimentali di Broms (1965) e Goto (1971) rappresentano la base per i modelli successivi. Broms osservò, attraverso prove di trazione su prismi in calcestruzzo armato, che l'ampiezza delle fessure superficiali cresceva linearmente con l'aumento della distanza tra le barre, la superficie dell'elemento (copriferro), e con il diametro delle barre. Grazie a queste osservazioni riuscì a formulare una relazione empirica tra la massima apertura delle fessure e la deformazione dell'acciaio, anticipando le riflessioni riguardo la diretta proporzionalità tra il comportamento delle fessure e la geometria dell'elemento, a differenza della credenza che ad incidere maggiormente fossero le proprietà meccaniche dei materiali [6].

I primi studi di Broms spianarono la strada a Goto che eseguì diverse indagini microscopiche su campioni fessurati analizzando la presenza di fessure interne nell'intorno delle barre di armatura non osservabili con generiche analisi sulla superficie dell'elemento. Queste microfessure che si formano prima della comparsa delle fessure di superficie vennero incluse nei modelli teorici moderni [7].

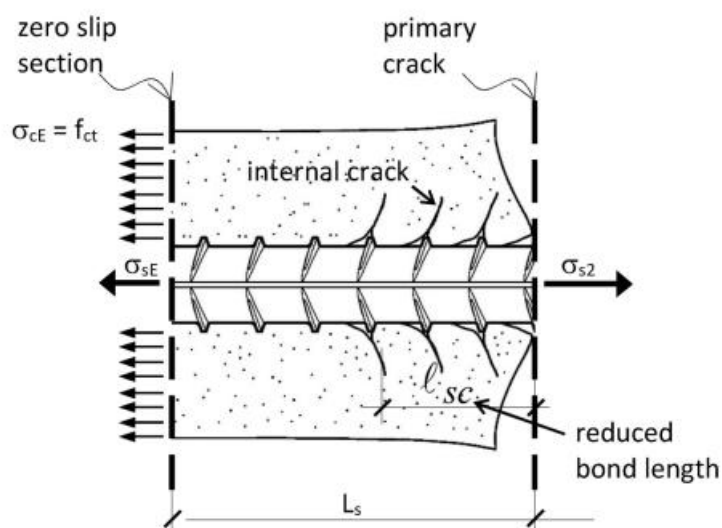


Figura 9: Fase di fessurazione stabilizzata [4]

Il discorso fu poi ampliato da Beeby, il quale spostò l'attenzione sugli aspetti di durabilità, evidenziando che la fessurazione non incide solamente sulla deformabilità ma anche sulla penetrazione di agenti aggressivi. Da questa analisi furono introdotti limiti normativi di apertura di fessura in funzione della classe di esposizione ambientale riscontrabile nelle recenti normative di Eurocodice 2 e MC2020 [8].

Per quanto riguarda l'analisi sulla spaziatura delle fessure, le prime ricerche sperimentali sono state condotte da Borosnuoi e Snobli. Attraverso test effettuati su prismi di calcestruzzo armato soggetti a trazione diretta con variazione di copriferro, rapporto di armatura e diametro delle barre. I risultati da loro evidenziati mostrano come la spaziatura media delle fessure reali è spesso superiore a quella determinata attraverso le prescrizioni normative, in particolar modo quella stimata con la formula dell'Eurocodice 2 per elementi con armature ravvicinate e ridotto copriferro. Per quanto concerne le fessure, queste non risultano equidistanti o formatesi secondo

una distribuzione omogenea, bensì seguono una distribuzione casuale influenzata dalla eterogeneità del materiale e dei difetti locali. Tali studi hanno portato all'introduzione nel fib Model Code 2010 e nel successivo 2020 al concetto di Area Efficace di calcestruzzo precedentemente analizzata[9].

f_{ck} (MPa)	\varnothing_s (mm)	ρ_s (%)				
		1.0%	1.5%	2.0%	3.0%	5.0%
30-50	10	1.56	1.34	1.20	1.03	0.86
	25	1.88	1.61	1.44	1.24	1.03
	40	2.06	1.77	1.58	1.36	1.13
70	10	1.66	1.42	1.27	1.09	0.90
	25	1.99	1.70	1.52	1.31	1.08
	40	2.19	1.87	1.67	1.43	1.19
90	10	1.73	1.48	1.33	1.14	0.94
	25	2.08	1.78	1.59	1.37	1.13
	40	2.29	1.95	1.75	1.50	1.24

Figura 10: Tabella Valori del rapporto tra sforzo di legame medio e resistenza alla trazione media [4]

Studi più recenti di Gribniak e Rimkus hanno influenzato particolarmente la stesura della più recente versione del Model Code 2020. In particolar modo, i due ricercatori hanno progettato e sperimentato un'apparecchiatura per effettuare prove di trazione controllata sui prismi con armature multiple in modo da analizzare in continuo la formazione e l'apertura delle fessure. I risultati di tale sperimentazione hanno evidenziato la presenza simultanea di fessure primarie e secondarie come evidenziato dal modello teorico proposto da Goto; per quanto riguarda la spaziatura media delle fessure e il rapporto tra il diametro delle barre e la percentuale di armatura, questo aumenta in funzione delle barre e del copriferro. Questi risultati hanno quindi contribuito alla calibrazione della tensione di aderenza e al coefficiente β_w nel MC2020[10].

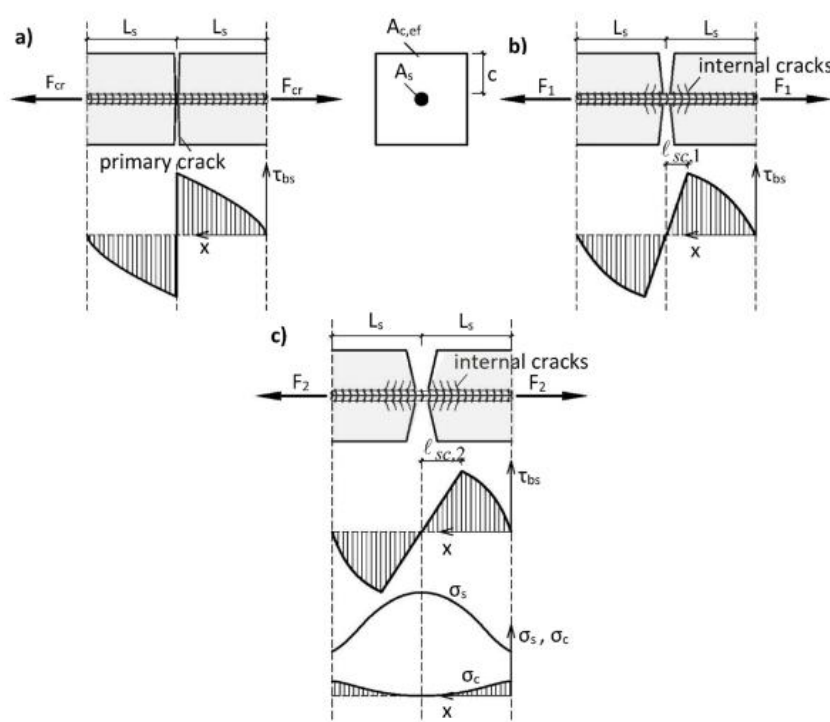


Figura 11: Comportamento fessurativo di un tirante in cemento armato sottoposto a forze crescenti [4]

Le ricerche più influenti risultano, tuttavia, quelle di Garcia e Perez C. condotte all'Univeridad Politecnica De Madrid. Durante tali studi sui fenomeni di fessurazione in travi soggette a flessione, variazione di copriferro, diametro e rapporto di armatura, i risultati sono stati confrontati con le previsioni di EC2 e MC2020. In particolar modo ciò che è stato evidenziato è quanto segue [11]:

- Per sezioni con grandi diametri di armatura e copriferro elevato, l'ampiezza reale delle fessure risultava fino al 40% superiore rispetto ai valori forniti dal MC2020;
- Per elementi con elevata curvatura è stato necessario inserire un coefficiente correttivo di curvatura $k_{1/r}$, poiché l'apertura misurata in superficie tesa risultava maggiore rispetto a quella in corrispondenza dell'armatura;
- Le barre calcolate in posizione superiore, a causa del *top bar effect*, presentavano fessure più ampie a causa della perdita di aderenza [12], [13].

Tali osservazioni di Perez hanno portato all'inserimento dei coefficienti correttivi nel MC2020 (vedi 2.2.1.).

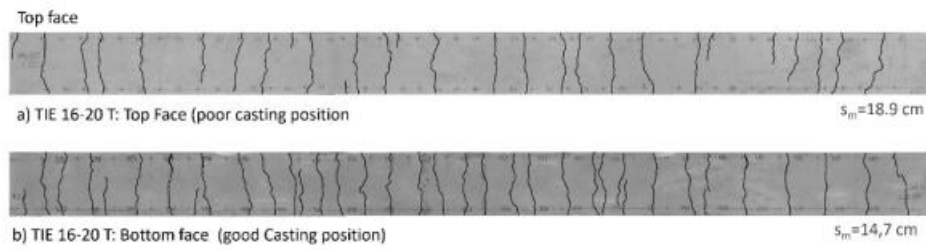


Figura 12: Esempio di pattern di sperimentazione presso Università di Madrid [4]

Specimen ID	Top cover [mm]	bar diameter [mm]	crack spacing [mm]		
			Good casting position (GCP)	Poor casting position (PCP)	Ratio PCP/GCP
16-20-T	32	16	147	171	1.16
16-70-T	82	16	220	232	1.05
25-20-T	32	25	115	171	1.49
25-70-T	82	25	184	230	1.25

Figura 13: Risultati sperimentazione Garcia-Perez [4]

4. Confronto dati sperimentali e prescrizioni normative

Tutti gli studi effettuati dai diversi ricercatori internazionali hanno spianato la strada ad altri, fornendo un database di misure sperimentali di spaziatura e ampiezza delle fessure. I dati di input utilizzati dai ricercatori sono stati utilizzati al fine di determinare nuovamente l'apertura delle fessure e delle spaziature attraverso le formule proposte delle normative citate precedente ed i risultati finali sono stati tra di loro confrontati ed analizzati nei successivi paragrafi.

4.1. Descrizione dati utilizzati

I dati sperimentali sono stati raccolti in un database implementato attraverso dati riportati nel *Fib bulletin 114*[4]. Il database sperimentale impiegato è formato da una serie di dati raccolti da diverse campagne sperimentali svolte dai ricercatori sopracitati, relative a misurazioni effettuate su elementi in calcestruzzo armato soggetti a trazione o flessione. Di ciascun elemento sono forniti i principali parametri geometrici utili all'analisi dello stato fessurativo per permetterne in seguito il confronto.

Per ogni elemento analizzato sono forniti i valori di:

- B = larghezza della sezione [mm];
- H = altezza della sezione [mm];
- Cover (c) = copriferro [mm];
- n_s = numero di barre di armatura;
- Diameter = diametro della sezione [mm];
- f_c = resistenza a compressione del calcestruzzo [MPa];
- E_c = modulo elastico del calcestruzzo [MPa];
- f_{ct} = resistenza a trazione del calcestruzzo [MPa];
- σ_s = stato tensionale [MPa];
- σ_{sr} = stato tensionale nella condizione fessurata [MPa];

- s_{rm} = spaziatura media delle fessure [mm];
- $s_{r,max}$ = spaziatura massima delle fessure [mm];
- w_m = ampiezza media delle fessure [mm];
- w_{max} = ampiezza massima delle fessure [mm].

La seguente tabella riporta un esempio della predisposizione dei dati all'interno del database.

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{sr}	σ_s	S_{rm}	W_m
T2A	304.8	127	12.7	8	11.3	58.7	32544	2.9	-	344.8	78.7	0.06
T3B	304.8	127	12.7	8	12.7	49.8	31993	2.7	-	344.8	76.2	0.11
T3A	304.8	127	12.7	8	12.7	50.5	34268	2.8	-	344.8	84.1	0.07
T1A	304.8	127	12.7	8	9.525	52.4	32062	2.6	-	344.8	86.4	0.07

Tab 3: Esempio parametri di riferimento (estratto dal database)

Data la quantità di dati utilizzati per l'analisi, si riportano in “Appendice A” le tabelle contenenti tutti i valori riportati dai differenti autori nel corso dei loro studi. Tutti i dati in input per quanto riguarda i parametri delle diverse sezioni degli elementi in calcestruzzo armato, sono state utilizzate per ricalcolare l'ampiezza delle fessure e la spaziatura secondo le normative e i risultati sono riportati in “Appendice B”.

4.2. Confronto risultati

Al fine di espletare l'obiettivo centrale dell'elaborato, è stato effettuato il confronto tra i valori sperimentali e le prescrizioni normative per valori di ampiezza delle fessure, nonché la loro validazione.

I risultati dei calcoli, data la quantità di dati in input e output, sono stati riportati all'interno di grafici in cui sono messi a confronto i risultati dei dati sperimentali con quelli delle prescrizioni normative, in particolar modo sono stati effettuati grafici differenti per quanto riguarda l'Eurocodice 2 e il Model Code 2020.

I seguenti grafici rappresentano quindi il confronto effettuato tra i valori derivanti dagli studi e i valori ricalcolati attraverso le prescrizioni normative. In particolar modo i grafici mostrano sull'asse delle ascisse i valori di apertura delle fessure derivanti dalle misure sperimentali e sull'asse delle ordinate i valori derivanti dalle prescrizioni dell'Eurocodice 2 e dell'MC2020. All'interno del grafico (come riportato dalla legenda) sono riportati:

- i valori delle misure (pallini di colore blu);
- La linea di riferimento per la condizione di $x=y$, ovvero la condizione perfetta di corrispondenza tra i valori sperimentali e quelli normativi (linea arancione). Per tale motivo si è ritenuto ottimale considerando tale linea passante per l'origine;
- Linea di tendenza $Y=nX$ ottenuta mediante regressione lineare dei dati sperimentali. Tale linea rappresenta l'andamento medio della relazione tra i valori misurati e quelli teorici (linea tratteggiata rossa);
- R^2 è il coefficiente di determinazione, esprime il grado di correlazione tra i due insiemi di dati, in particolare valori prossimi a 1 indicano un'elevata corrispondenza, valori più bassi evidenziano una maggiore dispersione dei dati.

Per quanto riguarda la linea di riferimento, la distanza dei punti da essa rappresenta l'errore nella stima dei dati sperimentali rispetto alle prescrizioni normative, in particolare se i punti si trovano al di sopra della linea di riferimento, avremo una

sovrastima del modello rispetto alle prescrizioni normative; se i valori si trovano al di sotto della linea di riferimento avremo una sottostima del modello.

Il primo grafico analizzato è tratto dagli studi di Rizkalla.

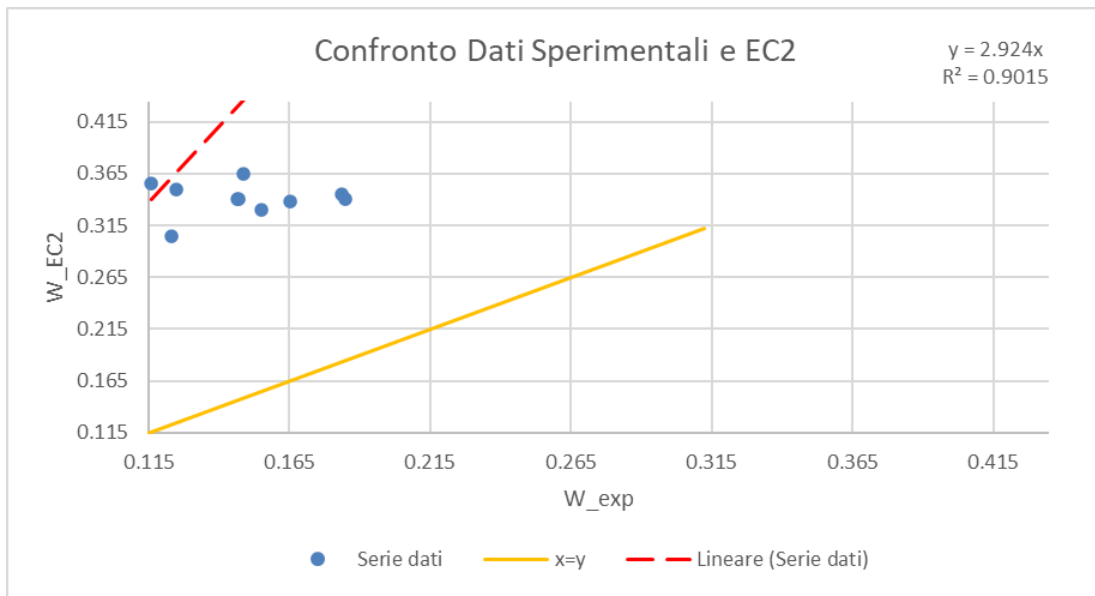


Figura 14: Confronto dati sperimentali (Rizkalla) e EC2

Il grafico (Fig.14) mostra il valore del coefficiente di determinazione $R^2=0.9015$, il che indica una buona correlazione tra i valori sperimentali e quelli calcolati secondo EC2.

Tuttavia, la pendenza della retta $n=2.924$ è significativamente maggiore di 1, evidenziando che il modello sovrastima le ampiezze delle fessure rispetto ai dati calcolati con normativa. In questo caso lo sviluppo normativo tende a fornire un valore teorico circa tre volte superiore.

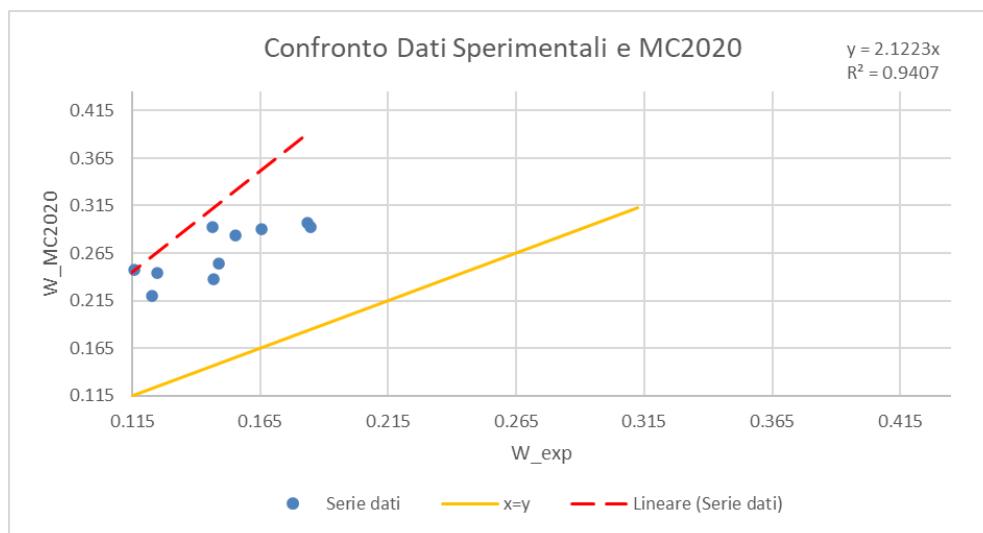


Figura 15: Confronto dati sperimentali (Rizkalla) e MC2020

Il grafico (Fig.15) mostra il valore del coefficiente di determinazione $R^2=0.9407$, il che indica una ottima correlazione tra i valori sperimentali e quelli calcolati secondo MC2020.

Tuttavia, la pendenza della retta $n=2.1223$ è significativamente maggiore di 1, evidenziando che il modello sovrastima le ampiezze delle fessure rispetto ai dati calcolati con normativa, tuttavia inferiori all'EC2.

La seconda analisi riportata è svolta da Hartl, i dati analizzati riportano un comportamento molto più coerente tra i valori sperimentali e quelli calcolati.

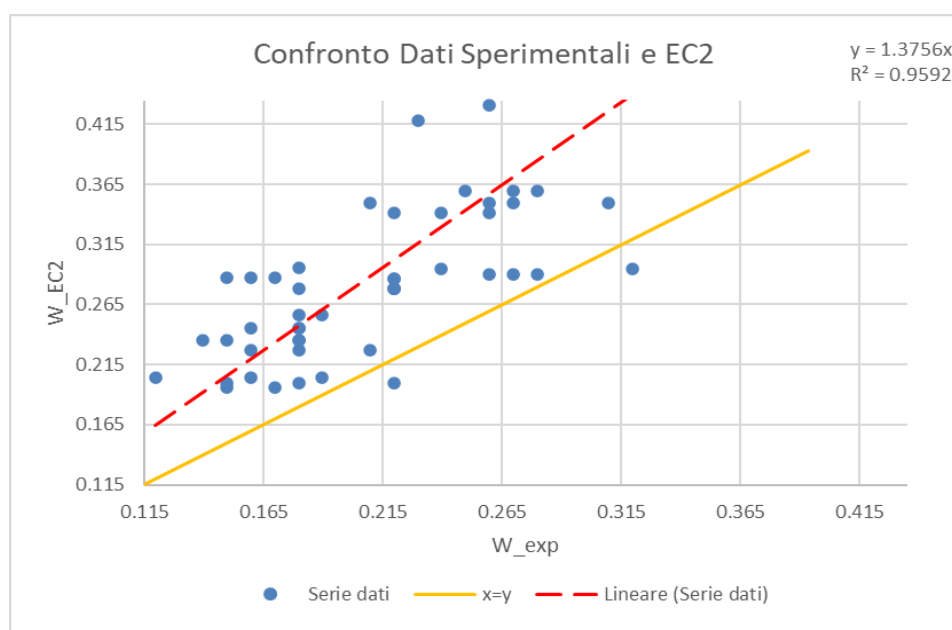


Figura 16: Confronto dati sperimentali (Hartl) e EC2

Il grafico (Fig.16) mostra il valore del coefficiente di determinazione $R^2=0.9592$, il che indica una ottima correlazione tra i valori sperimentali e quelli calcolati secondo EC2, l'ottima correlazione è supportata dall'elevato numero di dati a disposizione. Inoltre, la pendenza della retta $n=1.3756$ è leggermente maggiore di 1, evidenziando una leggera sovrastima delle ampiezze delle fessure rispetto ai dati calcolati con normativa. In aggiunta la distribuzione dei punti attorno alla linea di tendenza è regolare e ben allineata, segno di una buona correlazione statistica tra le serie di dati.

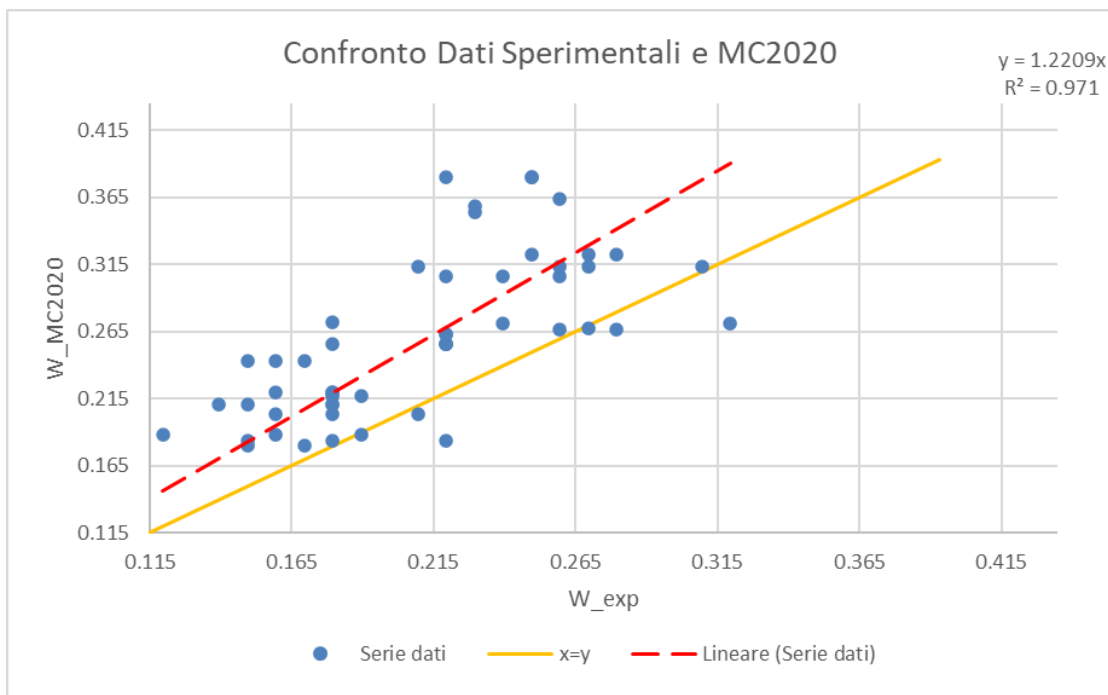


Figura 17: Confronto dati sperimentali (Hartl) e MC2020

Per quanto riguarda il Model Code 2020, il grafico (Fig.17) evidenzia il valore del coefficiente di determinazione $R^2=0.971$, il che indica una correlazione eccellente, prossima ad 1, tra i valori sperimentali e quelli calcolati secondo EC2, l'ottima correlazione è supportata dall'elevato numero di dati a disposizione. Inoltre, la pendenza della retta $n=1.2209$ è leggermente maggiore di 1, evidenziando una leggera sovrastima delle ampiezze delle fessure rispetto ai dati calcolati con normativa. In aggiunta la distribuzione dei punti attorno alla linea di tendenza è regolare e ben allineata, segno di una buona correlazione statistica tra le serie di dati.

Gli studi di Hartl evidenziano una migliore capacità predittiva del MC2020. Nel complesso entrambi i modelli mostrano un buon accordo con i dati sperimentali.

Le Fig. 18, 19, mostrano i risultati ottenuti dal confronto con gli studi di Farra.

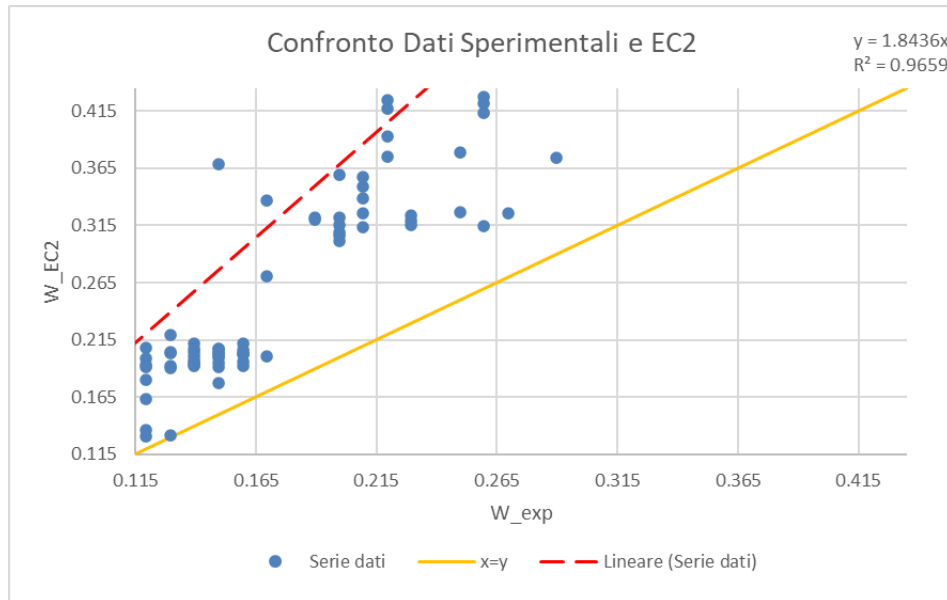


Figura 18: Confronto dati sperimentali (Farra) e EC2

Nel caso dell'Eurocodice 2 (Fig.18) la retta di tendenza presenta equazione pari a $y=1.8436x$ e un coefficiente di determinazione $R^2=0.9659$. Questi risultati mostrano una forte correlazione tra i dati sperimentali e quelli calcolati, con una tendenza alla sovrastima da parte del modello. Mentre per quanto riguarda la riaggresione lineare, essa è contenuta, segno di buona stabilità del modello.

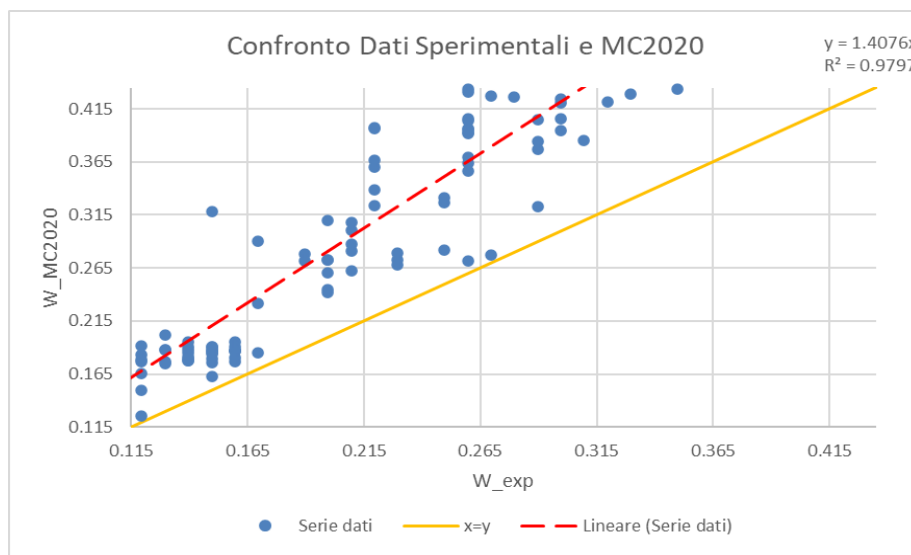


Figura 19: Confronto dati sperimentali (Hartl) e MC2020

Per quanto riguarda il Model Code 2020 (Fig.19), la pendenza della retta è $n=1.4076$ con $R^2=0.9797$. Questo coefficiente di determinazione molto elevato evidenzia un'eccellente correlazione tra valori sperimentali e teorici, mentre la pendenza più prossima all'unità rispetto all'EC2 mostra una stima più accurata delle ampiezze di fessura.

Le figure 20 e 21 riportano il confronto tra le misure sperimentali di Eligehausen e le prescrizioni normative.

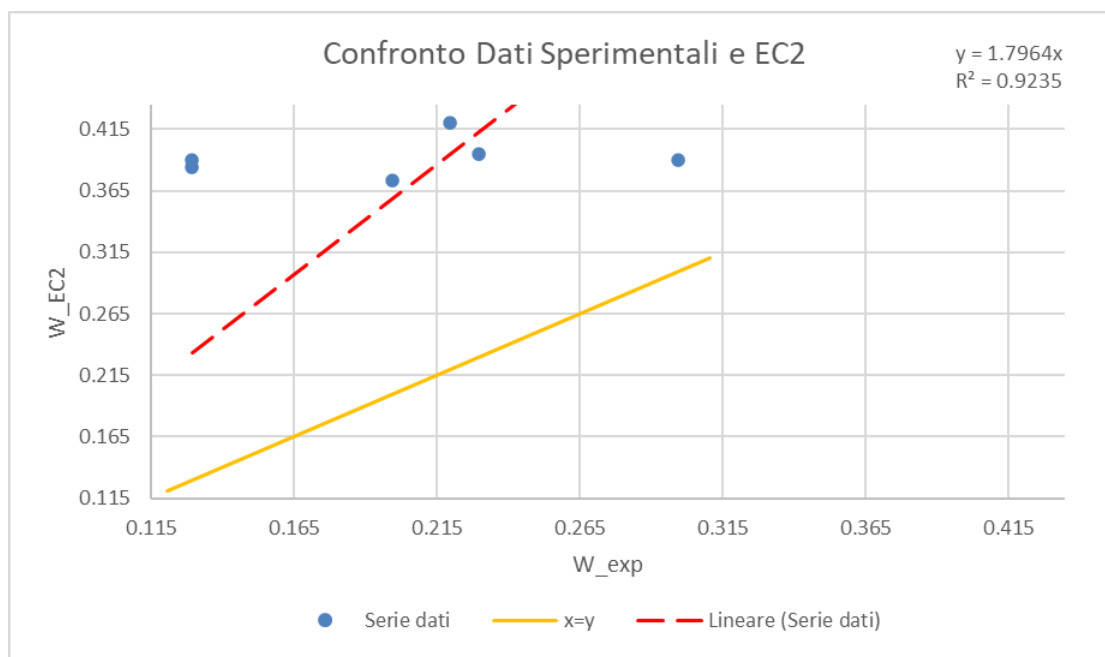


Figura 20: Confronto dati sperimentali (Eligehausen) e EC2

Il grafico (Fig.20) mostra il valore del coefficiente di determinazione $R^2=0.9235$, indicando una buona correlazione tra i valori sperimentali e quelli calcolati secondo EC2; tuttavia, il basso numero di risultati a disposizione determina una incertezza nel modello.

La pendenza della retta $n=1.7964$ è maggiore di 1, evidenziando una leggera sovrastima delle ampiezze delle fessure rispetto ai dati calcolati con normativa. Nonostante la quantità limitata di dati, la dispersione risulta contenuta, suggerendo una coerenza interna nel comportamento.

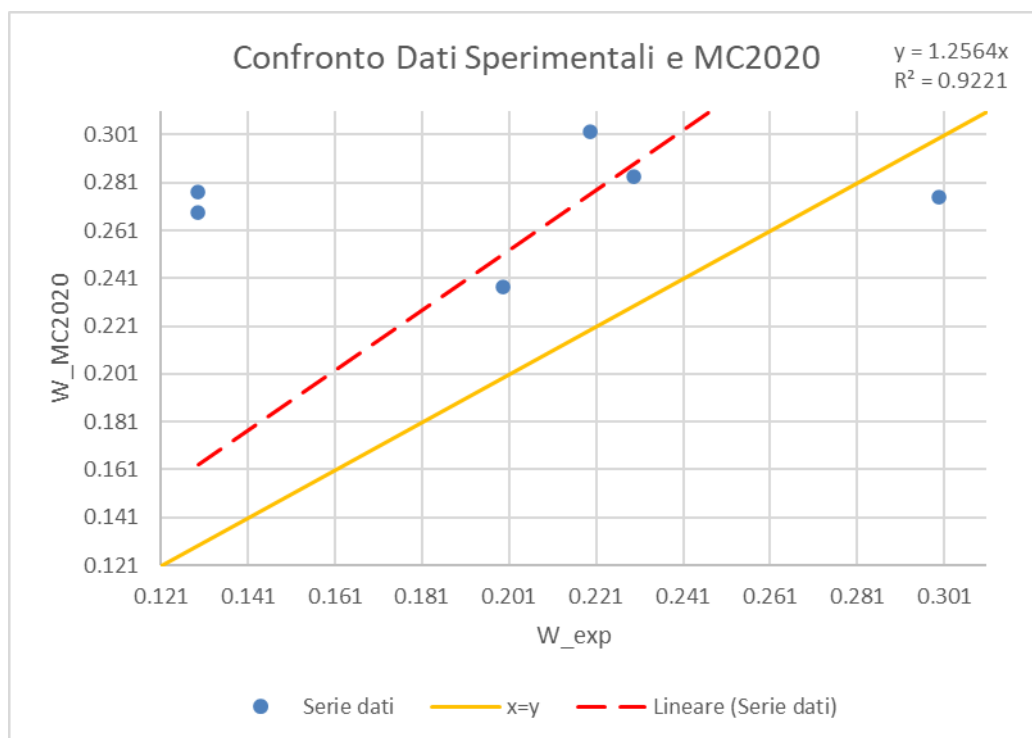


Figura 21: Confronto dati sperimentali (Eligehausen) e MC2020

Per quanto riguarda il confronto effettuato con il Model Code 2020 (Fig.21), la pendenza della retta di regressione è pari a $n=1.2564$ con $R^2=0.9221$. Questi valori mostrano una sovrastima molto più contenuta e una correlazione elevata con una distribuzione dei punti in prossimità della linea di tendenza. Il MC2020 mostra una migliore capacità predittiva rispetto all'Eurocodice 2 anche in questo caso, fornendo stime più vicine ai valori sperimentali.

Risultati migliori si sono rivelati quelli analizzati da Gribniak in una prima fase della sua sperimentazione nel 2018.

In particolar modo dalle figure 22 e 23 si evidenzia:

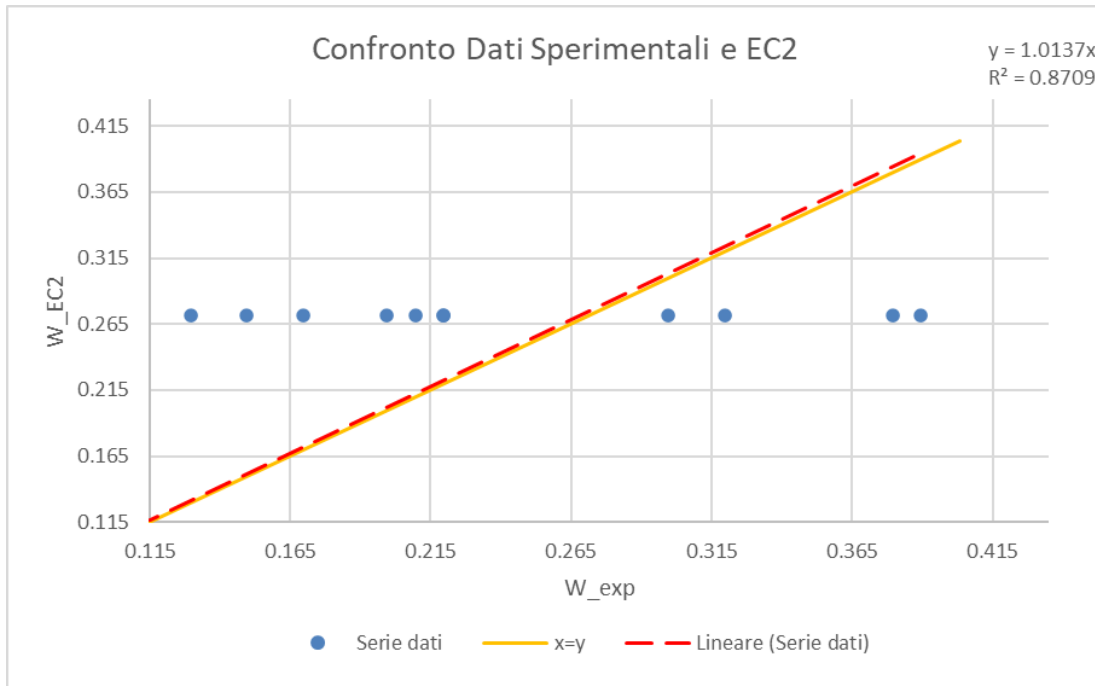


Figura 22: Confronto dati sperimentali (Gribniak) e EC2

In questa analisi la retta di tendenza è descritta dall'equazione $y=1.0137x$ con un coefficiente di determinazione $R^2=0.8709$. La pendenza della retta risulta praticamente unitaria, indicando quasi una perfetta corrispondenza tra i valori sperimentali e quelli teorici con una leggera sovrastima. Tuttavia, i valori di R^2 risultano inferiori rispetto ai precedenti casi analizzati, il ciò comporta una discreta correlazione complessiva

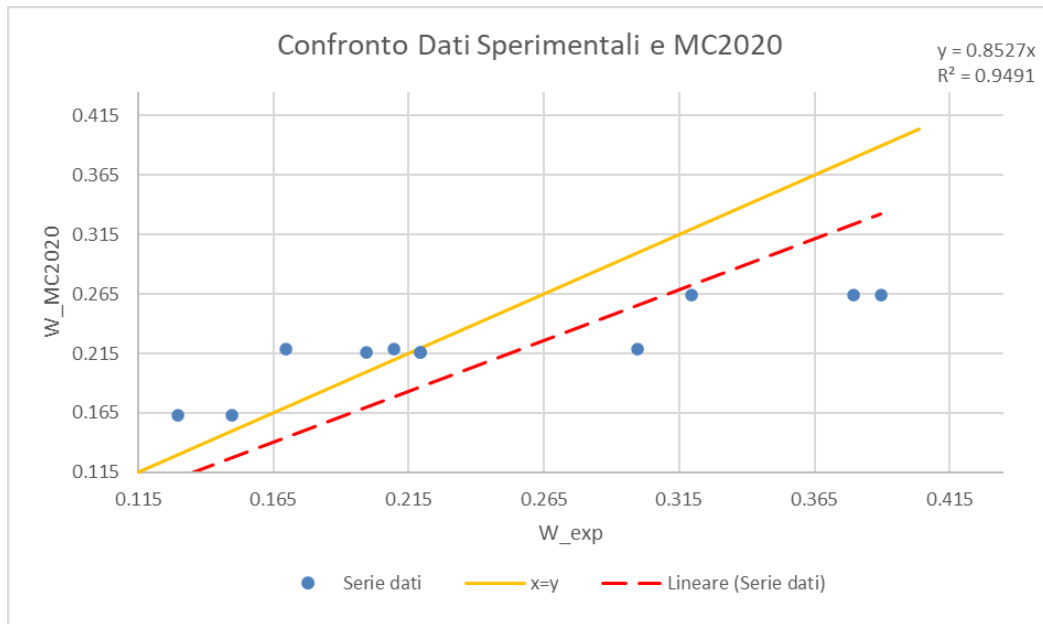


Figura 23: Confronto dati sperimentali (Gribniak) e MC2020

Per il MC2020 (Fig.23), la retta di regressione presenta una equazione pari a $y=0.8527x$ e un coefficiente $R^2=0.9491$. Al contrario di quanto visto nel confronto con l'EC2, il valore di R^2 risulta maggiore, mostrando una migliore correlazione dei dati. Tuttavia, in questo caso la pendenza della retta è inferiore all'unità, indicando una sottostima delle ampiezze delle fessure rispetto ai valori misurati. L'MC2020 risulta quindi più vicino alla realtà ma tendenzialmente più prudente nella stima delle ampiezze.

Le analisi di Gribniak sono proseguite anche nel 2020 portando all'acquisizione di nuovi dati sperimentali.

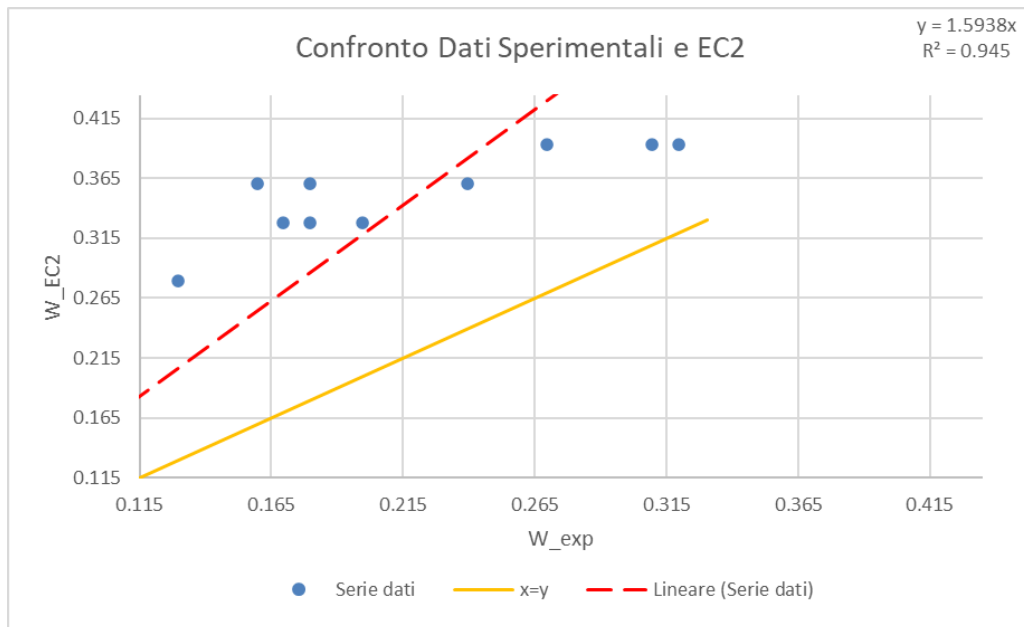


Figura 24: Confronto dati sperimentali (Gribniak,2020) e EC2

Per il caso dell'EC2 (Fig.24), la retta di tendenza è espressa dalla relazione $y=1.5938x$, con un coefficiente di determinazione $R^2=0.945$. Questo valore indica una correlazione molto elevata tra le due serie di dati, mentre la pendenza superiore all'unità evidenzia una tendenza del modello a sovrastimare le ampiezze. Tuttavia, la distribuzione dei punti è regolare e ben allineata.

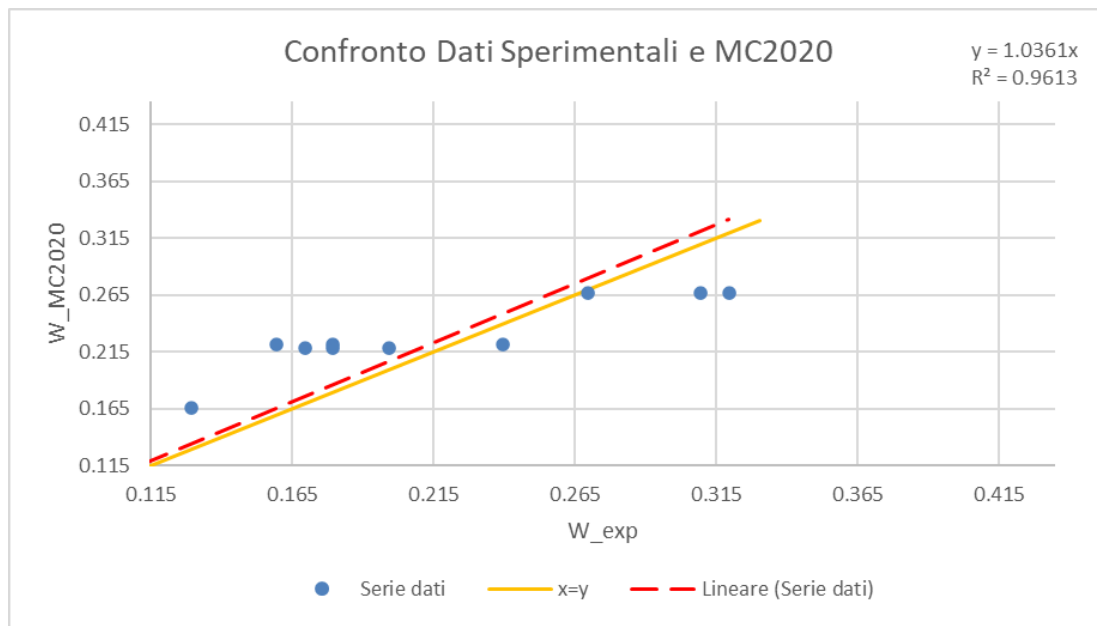


Figura 25: Confronto dati sperimentali (Gribniak, 2020) e MC2020

Analizzando il confronto con il MC2020 (Fig.25), si evince una retta di regressione pari a $y=1.0361x$ e un coefficiente $R^2=0.9613$. In questo caso la pendenza è prossima all'unità, ciò evidenzia un'eccellente corrispondenza tra i dati sperimentali e teorici, inoltre il valore elevato di R^2 conferma la stabilità e l'affidabilità del modello. Ancora una volta il MC2020 mostra una notevole capacità predittiva riuscendo a ridurre in modo accurato le ampiezze di fessura osservate sperimentalmente.

Le figure 26 e 27 mostrano il confronto con i dati raccolti da Tan.

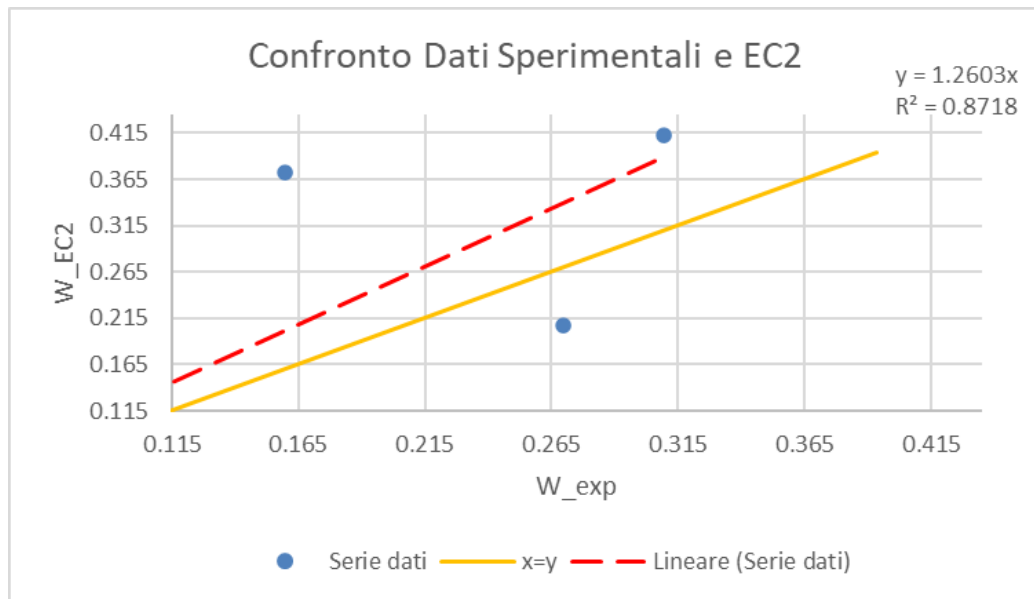


Figura 26: Confronto dati sperimentali (Tan) e EC2

I valori a disposizione sono molto limitati per una analisi approfondita; tuttavia, utilizzando i valori a disposizione (Fig.26) si analizza una retta di tendenza $y=1.2603x$ e un coefficiente di determinazione $R^2=0.8718$. Il valore di R^2 mostra una discreta correlazione complessiva, mentre la retta di tendenza evidenzia una leggera sovrastima delle ampiezze di fessura da parte del modello.

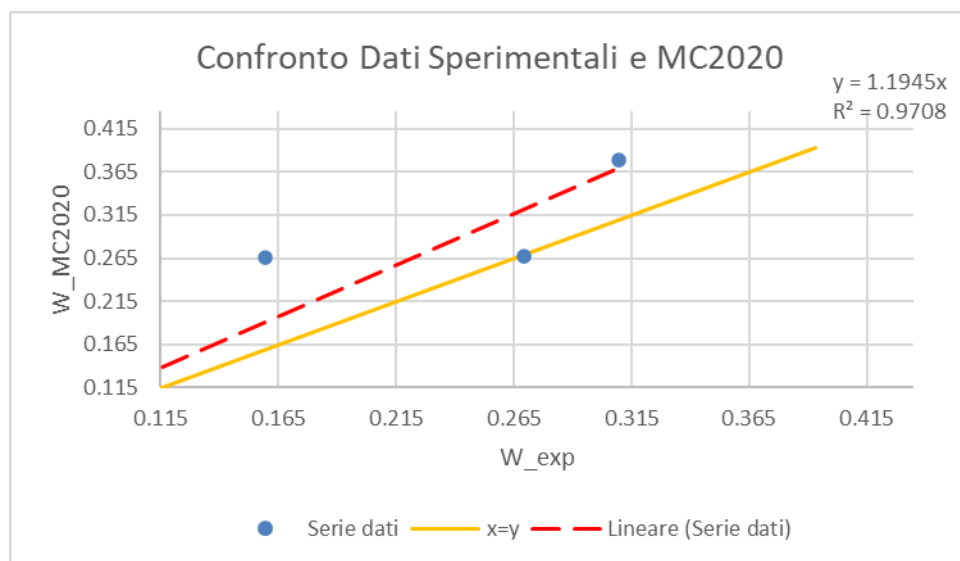


Figura 27: Confronto dati sperimentali (Tan) e MC2020

Per quanto riguarda il MC2020 (Fig.27), retta di tendenza $y=1.1945x$ con un coefficiente di determinazione $R^2=0.9708$. Quest'ultimo evidenzia una correlazione eccellente tra i danti sperimentali e teorici, mentre la retta di regressione mostra una sovrastima seppur contenuta. Complessivamente il comportamento è più accurato e stabile rispetto all'EC2.

L'ultimo confronto effettuato è tra i dati raccolti da Gilbert e i dati tratti dalle prescrizioni normative. In particolare, le figure 28 e 29 evidenziano:

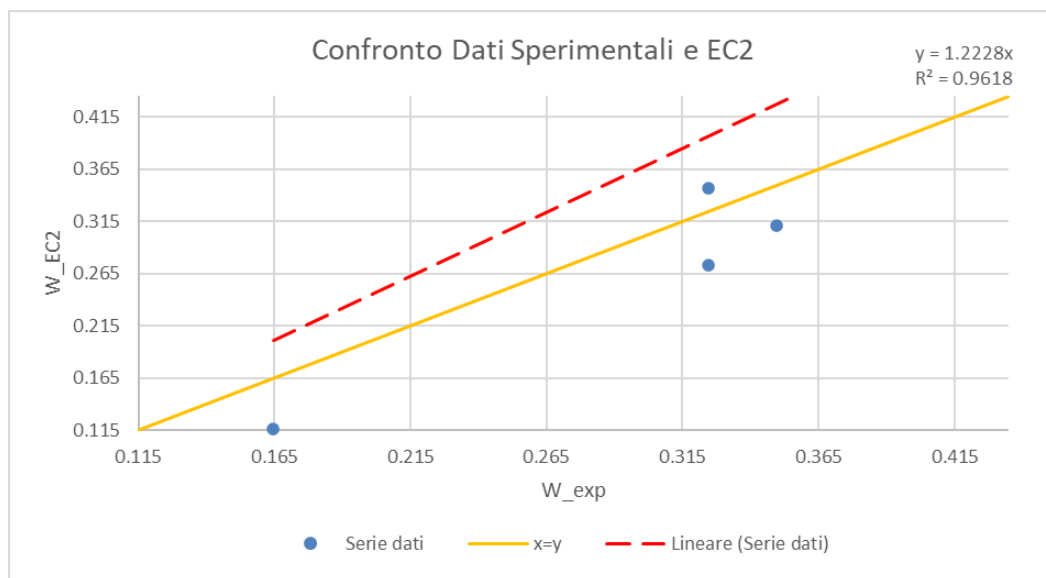


Figura 28: Confronto dati sperimentali (Gilbert) e EC2

Dal confronto con EC2 (Fig.28) ne deriva una equazione della retta di tendenza pari a $y=1.2228x$ e un coefficiente di determinazione $R^2=0.9618$. Il valore di R^2 dimostra una correlazione molto elevata nel confronto, mentre l'equazione della retta mostra una sovrastima nel calcolo delle ampiezze da parte del modello. Tuttavia, la buona distribuzione dei punti lungo la retta di regressione conferma la consistenza del comportamento fessurativo descritto dal modello.

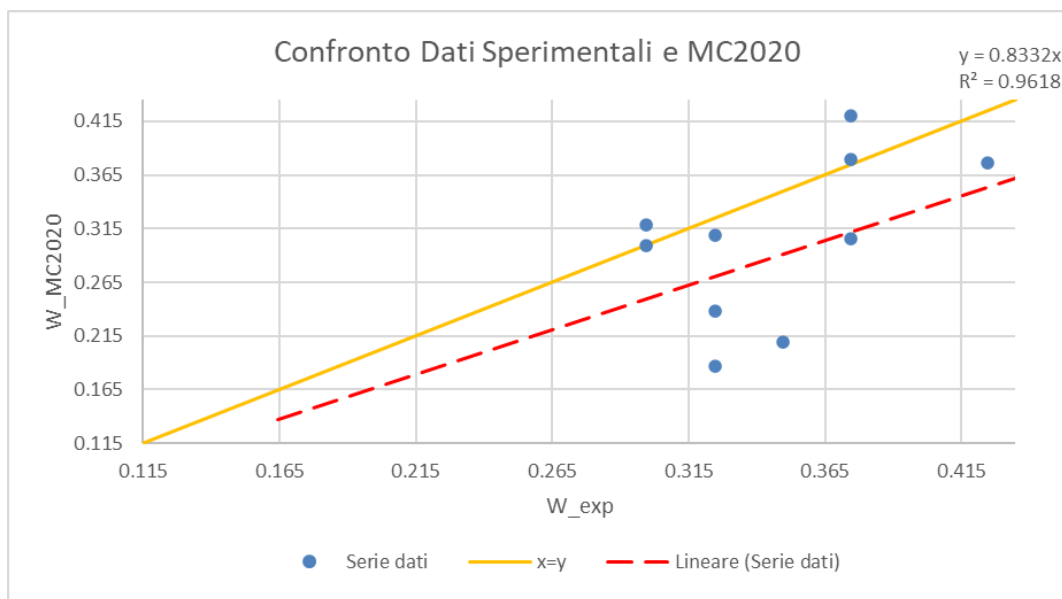


Figura 29: Confronto dati sperimentali (Gilbert) e MC2020

Rispetto all'EC2, il confronto con il MC2020 (Fig.29) evidenzia una retta di regressione pari a $y=0.8332x$ e un coefficiente di determinazione $R^2=0.9618$. Anche in questo la correlazione è buona, ma la pendenza inferiore all'unità indica una leggera sottostima ed evidenziano come i valori, trovandosi al di sotto della retta $x=y$, non soddisfino la verifica proposta dalla normativa (2.14). Il MC2020 per quanto coerente e statisticamente solido, risulta più conservativo.

L'analisi complessiva del confronto tra i dati sperimentali dei differenti ricercatori e i valori ricalcolati secondo le due normative (Eurocodice 2 e Model Code 2020) ha evidenziato una buona capacità di entrambi i modelli nel descrivere il comportamento fessurativo nel calcestruzzo armato. In particolar modo, attraverso il coefficiente di determinazione R^2 si evidenzia una correlazione significativa tra i dati sperimentali e quelli teorici confermando la coerenza delle relazioni individuate. Mentre dall'analisi delle rette di regressione ($y=nx$) emerge come l'EC2 tenda a sovrastimare le ampiezze delle fessure rispetto ai valori sperimentali, decretando un comportamento più conservativo garantendo un maggior margine di sicurezza; D'altro canto, il MC2020 evidenzia una maggiore accuratezza del modello e una valutazione più realistica nell'analisi e nella previsione dei dati.

5. Metodo Lineare

La seconda parte dell'elaborato descrive un modello semplificato per la determinazione e l'analisi dello stato fessurativo negli elementi in calcestruzzo armato. In particolar modo, il lavoro effettuato dai docenti del Politecnico di Torino, Taliano M. e Debernardi, descrive un modello semplificato che tiene conto dell'effetto delle fessure secondarie per lo studio del comportamento in campo fessurato di un tirante in calcestruzzo armato soggetto a carico monotono nelle fasi di formazione della fessura e fessurazione stabilizzata. Tale approccio semplificato si basa sull'ipotesi di distribuzione lineare delle tensioni di aderenza tra acciaio e calcestruzzo lungo la lunghezza di trasmissione. Grazie a questo metodo, denominato lineare, nella fase di fessurazione stabilizzata consente di determinare i valori massimi e minimi di apertura della fessura. In modo specifico, per la massima apertura della fessura, si introduce nella formula della deformazione media relativa dell'acciaio, un coefficiente η che dipende dal rapporto tra la forza assiale agente e la forza di fessurazione, in modo da tener conto dell'influenza della fessurazione secondaria sull'effetto di tension-stiffening [14].

In seguito, sarà effettuato un confronto tra i valori teorici di massima apertura delle fessure e dati sperimentali reperibili in letteratura.

5.1. Introduzione al Metodo

Il comportamento in campo fessurato di elementi strutturali in calcestruzzo armato, come già precedentemente ribadito, è un fenomeno molto complesso dato l'elevato numero di fattori che lo influenzano e dalla mancanza di misure accurate. Tutte queste difficoltà ed incertezze sono riscontrabili nella dispersione dei risultati sperimentali e delle diverse formule proposte in letteratura, come quella riportata dall'Eurocodice 2 e dal Model Code 2020. Per tale motivo è stato messo a punto un nuovo metodo denominato *Metodo Generale* (Debernardi, Guiglia & Taliano 2013; Debernardi & Taliano 2016), il quale studia il comportamento di un elemento teso di calcestruzzo armato soggetto a carico monotono, nella fase di fessurazione stabilizzata, assumendo

che la distanza tra le fessure sia massima, ossia pari al doppio della lunghezza di trasmissione, prendendo in considerazione l'effetto delle cosiddette fessure di Goto o fessure secondarie. Questo metodo descrive l'effetto delle fessure secondarie assumendo che le tensioni di aderenza, nell'intorno di una fessura principale, siano distribuite in modo lineare annullandosi sulla sezione fessurata. In questo capitolo si andrà ad analizzare una semplificazione del metodo che evita il ricorso a onerose procedure iterative, permettendo di effettuare l'analisi della fessurazione stabilizzata. Tale metodo denominato *Metodo Lineare*, si basa sull'assunzione che le tensioni di aderenza tra calcestruzzo e acciaio siano distribuite in modo lineare oltre che nell'intorno della fessura principale, anche sull'intera lunghezza di trasmissione. Il metodo fornisce quindi formule per il calcolo dei valori di massimo e minimo dell'apertura delle fessure considerando rispettivamente i valori di massimo e minimo della distanza tra le fessure [14].

5.2. Descrizione del Metodo Lineare

Al fine di analizzare e descrivere il metodo lineare, si assume un comportamento lineare dei materiali e sulla base delle condizioni di equilibrio delle forze agenti su acciaio e calcestruzzo, si può ottenere la seguente equazione differenziale (fib Bulletin 2010)[14]:

$$\ddot{s}_s(x) = \frac{4 \cdot \tau_{bs}}{E_s \cdot \phi_s} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,ef}) \quad (5.1)$$

Dove:

- τ_{bs} è la tensione di aderenza;
- \ddot{s}_s Scorrimento relativo.

Secondo la legge proposta dal Model Code 2010:

$$\tau_{bs} = \tau_{max} \cdot \left(\frac{s_s}{s_1}\right)^\alpha \quad 1 \leq s_s \leq s_1 \quad (5.2)$$

Analizzando il caso di un tirante di calcestruzzo armato in campo fessurato, si possono distinguere le fasi di formazione delle fessure e, in seguito ad un aumento della forza,

fase di formazione delle fessure disposte in modo casuale fino al raggiungimento della fase di fessurazione stabilizzata[14].

5.2.1. Fessurazione stabilizzata

All'inizio della fase di fessurazione stabilizzata si assume che tutte le fessure principali siano equi spaziate tra loro con sezioni a scorrimento nullo denominate *Zero Slip* distanti dalle fessure principali di una lunghezza pari a quella di trasmissione (Fig. 30). Assunta una distribuzione lineare, la tensione di aderenza risulta[14]:

$$\tau_{bs} = \frac{\tau_{bs,crack}}{L_s} \cdot x \quad (5.3)$$

Indicando con:

- $\tau_{bs,crack}$ l'incognita che rappresenta il massimo valore della tensione di aderenza lungo la lunghezza di trasmissione verificata in corrispondenza della fessura principale;
- X ascissa posizionata lungo l'asse dell'elemento con origine fissata nella sezione di Zero Slip.

$\tau_{bs,crack}$ dipende a sua volta dal massimo valore di scorrimento raggiunto nella fessura principale.

Assumendo che la distribuzione delle tensioni di aderenza sia lineare, dall'equazione 5.3, possiamo riscrivere l'equazione 5.1 come:

$$\ddot{s}_s(x) = \frac{4 \cdot \tau_{bs}}{E_s \cdot \phi_s \cdot L_s} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_s) \cdot x = A \cdot x \quad (5.4)$$

Tale equazione, tramite una doppia integrazione, può essere risolta ottenendo la seguente distribuzione:

$$s_s = A \cdot \frac{x^3}{6} \quad (5.5)$$

Considerando un concio di calcestruzzo privo di armatura e delimitato tra la fessura principale e la sezione di zero slip, effettuando l'equilibrio delle forze agenti su esso, si determina la lunghezza di trasmissione come[14]:

$$L_s = \frac{\phi_s \cdot f_{ct}}{2 \cdot \rho_s \cdot \tau_{bs,crack}} \quad (5.6)$$

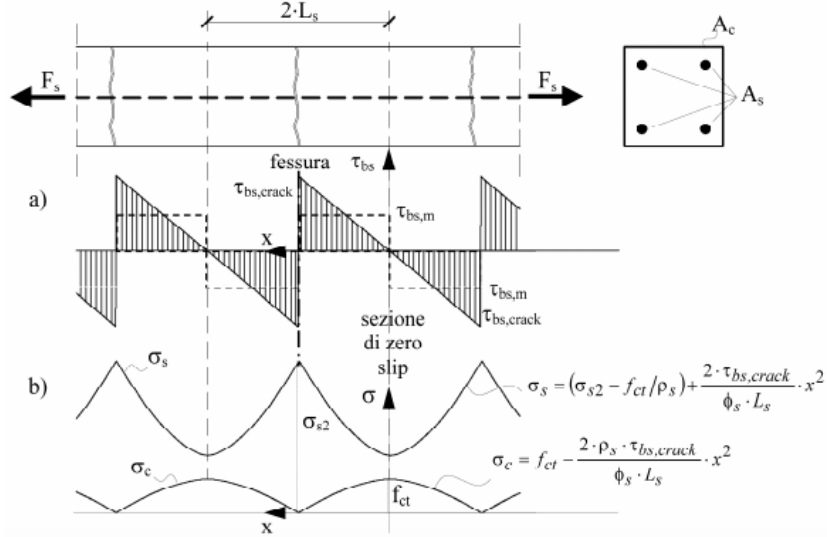


Figura 30: Inizio della fase di fessurazione stabilizzata di un tirante in c.a. [14]

In particolare, l'equazione 5.5, per $x=L_s$, con L_s definito con la 5.6, si ottiene il valore massimo dello scorrimento in corrispondenza della tensione massima di aderenza lungo la lunghezza di trasmissione $\tau_{bs,crack}$ [14]:

$$s_{s,max} = \frac{(1+\alpha_e \cdot \rho_s)}{6 \cdot E_s \cdot \tau_{bs,crack}} \cdot f_{ct}^2 \cdot \frac{\phi_s}{\rho_s^2} \quad (5.7)$$

Ponendo $\tau_{bs} = \tau_{bs,crack}$ al primo membro dell'equazione 5.2 e adottando lo scorrimento s_s , si ricava la tensione massima di aderenza nella fessura in funzione dei parametri meccanici e geometrici [14]:

$$\tau_{bs,crack} = \left(\frac{\tau_{max}^{1/\alpha}}{6 \cdot s_1} \cdot \frac{1+\alpha_e \cdot \rho_s}{E_s} \cdot f_{ct}^2 \cdot \frac{\phi_s}{\rho_s^2} \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (5.8)$$

Considerando l'andamento lineare delle tensioni di aderenza lungo la lunghezza di trasmissione, la tensione media di aderenza $\tau_{bs,m}$ è pari alla metà del valore $\tau_{bs,crack}$

$$\tau_{bs,m} = \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_{max}^{1/\alpha}}{6 \cdot s_1} \cdot \frac{1+\alpha_e \cdot \rho_s}{E_s} \cdot f_{ct}^2 \cdot \frac{\phi_s}{\rho_s^2} \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (5.9)$$

Si ricava la lunghezza di trasmissione L_s sostituendo la 5.9 nell'equazione 5.6:

$$L_s = \left[\frac{3^\alpha s_1^\alpha}{2 \cdot \tau_{max}} \cdot \frac{E_s^\alpha \cdot f_{ct}^{1-\alpha}}{(1+\alpha_e \cdot \rho_s)^\alpha} \cdot \frac{\phi_s}{\rho_s^{1-\alpha}} \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (5.10)$$

5.2.2. Formazione fessura stabilizzata – Distanza massima tra le fessure

L'aumento del carico e la stabilizzazione del quadro fessurativo determinano lo sviluppo delle fessure secondarie (o anche chiamate fessure di Goto) tra quelle principali.

Per tener conto di questo fenomeno, il Metodo Lineare introduce la lunghezza di aderenza ridotta l_{sc} che rappresenta la porzione di barra nella quale l'aderenza rimane effettivamente efficace.

Inizialmente, nella fase stabilizzata $l_{sc} = 0$, ma con l'aumento del carico, il valore di l_{sc} tende ad aumentare progressivamente verso L_s . Tale lunghezza ridotta identifica il tratto in cui la tensione di aderenza raggiunge il suo valore massimo prima di ridursi a causa delle fessure secondarie[14].

Si definisce un coefficiente adimensionale η dato dal rapporto tra la lunghezza di aderenza ridotta l_{sc} e la lunghezza di aderenza L_s [14]:

$$\eta = \frac{l_{sc}}{L_s} \quad (5.11)$$

Il coefficiente adimensionale può assumere valori che variano tra 0 e 1, in particolar modo:

- $\eta = 0$ l'influenza delle fessure secondarie è nulla;
- $\eta = 1$ le fessure secondarie influenzano completamente il comportamento locale di aderenza.

Si riporta la relazione analitica del coefficiente adimensionale η in funzione del carico assiale:

$$\eta = \frac{l_{sc}}{L_s} = \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{F_s}{F_{cr}} - \frac{1}{2} \right] - \sqrt{\frac{9}{4} \cdot \left(\frac{F_s}{F_{cr}} - 1 \right)^2 + 1} \quad (5.12)$$

Nella 5.12 sono riportati F_s e F_{cr} che rappresentano rispettivamente la forza assiale agente e la forza di fessurazione. All'aumentare del rapporto, il coefficiente adimensionale cresce, descrivendo il progressivo sviluppo delle fessure secondarie e la conseguente riduzione dell'efficacia del trasferimento di tensione (Fig.31)[14].

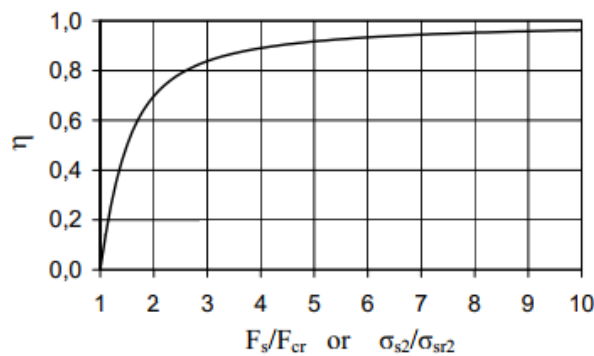


Figura 31: Andamento del coefficiente η in relazione al rapporto $\frac{F_s}{F_{cr}}$ [14]

5.2.3. Apertura massima delle fessure

Determinato il valore della lunghezza di aderenza ridotta, si definisce la relazione analitica per il calcolo dell'apertura massima di fessura come differenza tra gli allungamenti di acciaio e calcestruzzo lungo il tratto che va dalla fessura alla sezione zero slip[14]:

$$w_{max} = 2(\Delta L_s - \Delta L_c) \quad (5.13)$$

Essendo ΔL_s e ΔL_c gli allungamenti dell'acciaio e del calcestruzzo rispettivamente misurati nella sezione di zero slip alla fessura principale.

Sviluppando le relazioni di deformazione e sostituendo le compatibilità, si ottiene:

$$w_{max} = L_s(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (5.14)$$

Dove è possibile esprimere la differenza di deformazione media come:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) \frac{\sigma_s - k_t f_{ct} / \rho_s}{E_s} \quad (5.15)$$

Si pone particolare attenzione al termine $\left(1 - \frac{\eta}{2}\right)$ il quale rappresenta la riduzione di Tension Stiffening dovuta alla formazione delle fessure secondarie. In particolar modo all'inizio della fase stabilizzata ($\eta = 0$) l'effetto di Tension Stiffening è massimo, mentre per carichi elevati ($\eta \rightarrow 1$) esso si riduce progressivamente fino al 50% del valore iniziale. Tale parametro è indipendente dal diametro delle barre, dalla percentuale geometrica di armatura e dalla resistenza a trazione del calcestruzzo, ma dipende solamente dal livello tensionale dell'acciaio o dalla forza applicata[14].

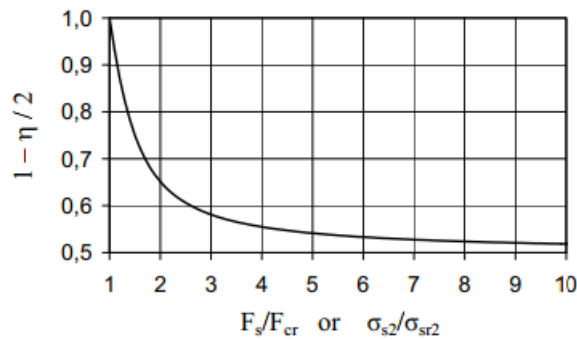


Figura 32: Diagramma del fattore $1 - \frac{\eta}{2}$ in relazione al rapporto $\frac{F_s}{F_{cr}}$ [14]

Nella fase di fessurazione stabilizzata, considerando la distanza minima tra le fessure pari alla lunghezza di trasmissione L_s , la tensione del calcestruzzo nella sezione di zero slip risulta inferiore a f_{ct} , determinando una mancanza di formazione di fessure secondarie.

Lo scorrimento massimo è quindi espresso come differenza tra gli allungamenti dell'acciaio e del calcestruzzo tra le sezioni di zero slip e la sezione fessurata[14]:

$$s_{s,max} = \Delta L_s - \Delta L_c \quad (5.16)$$

5.3. Confronto dati sperimentali e Metodo Lineare

Come effettuato nel Cap.4 per il confronto tra i risultati sperimentali e le normative Eurocodice 2 e Model Code 2020, si procede con lo stesso approccio per confrontare i risultati delle analisi sperimentali con quelli calcolati attraverso l'utilizzo del Metodo Lineare.

I dati sperimentali utilizzati sono riportati nell'Appendice A, mentre i valori di ampiezza di fessura determinati attraverso il Metodo Lineare sono riportati in Appendice C.

I risultati dei confronti, data la quantità di dati in input e output, sono stati riportati all'interno di grafici. In particolar modo i grafici mostrano sull'asse delle ascisse i valori di apertura delle fessure derivanti dalle misure sperimentali e sull'asse delle ordinate i valori derivanti dall'utilizzo del metodo lineare.

All'interno del grafico (come riportato dalla legenda) sono riportati:

- i valori delle misure (pallini di colore blu);
- La linea di riferimento per la condizione di $x=y$, ovvero la condizione perfetta di corrispondenza tra i valori sperimentali e quelli normativi (linea arancione). Per tale motivo si è ritenuto ottimale considerando tale linea passante per l'origine;
- Linea di tendenza $Y=nX$ ottenuta mediante regressione lineare dei dati sperimentali. Tale linea rappresenta l'andamento medio della relazione tra i valori misurati e quelli teorici (linea tratteggiata rossa);
- R^2 è il coefficiente di determinazione, esprime il grado di correlazione tra i due insiemi di dati, in particolare valori prossimi a 1 indicano un'elevata corrispondenza, valori più bassi evidenziano una maggiore dispersione dei dati.

Per quanto riguarda la linea di riferimento, la distanza dei punti da essa rappresenta l'errore nella stima dei dati sperimentali rispetto alle prescrizioni normative, in particolare se i punti si trovano al di sopra della linea di riferimento, avremo una sovrastima del modello rispetto alle prescrizioni normative; se i valori si trovano al di sotto della linea di riferimento avremo una sottostima del modello.

Il primo caso analizzato riguarda i risultati proposti da Rizkalla:

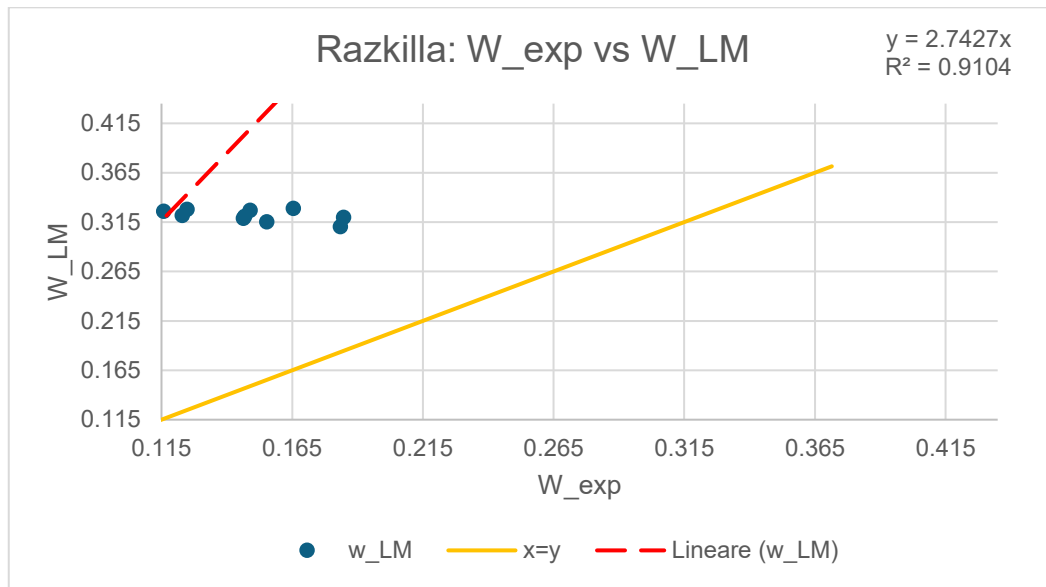


Figura 33: Confronto dati sperimentali (Rizkalla) e Metodo Lineare

La Fig.33 mostra il confronto tra le ampiezze di fessura sperimentali (W_{exp}) e i valori calcolati attraverso il modello lineare (W_{LM}) per le prove condotte da Rizkalla. La relazione ottenuta è espressa dall'equazione della retta $y=2,7427x$, con un coefficiente di determinazione $R^2 = 0.9104$. Tale valore di coefficiente di determinazione indica una buona correlazione tra i risultati sperimentali e quelli calcolati con il Metodo Lineare. Tuttavia, la pendenza della retta è molto elevata ($n=2.74$) il che evidenzia che i valori calcolati risultano più alti rispettivamente a quelli sperimentali, suggerendo una tendenza del metodo lineare a sovrastimare l'ampiezza di fessura.

Il secondo caso analizzato riguarda i risultati proposti da Hartl:

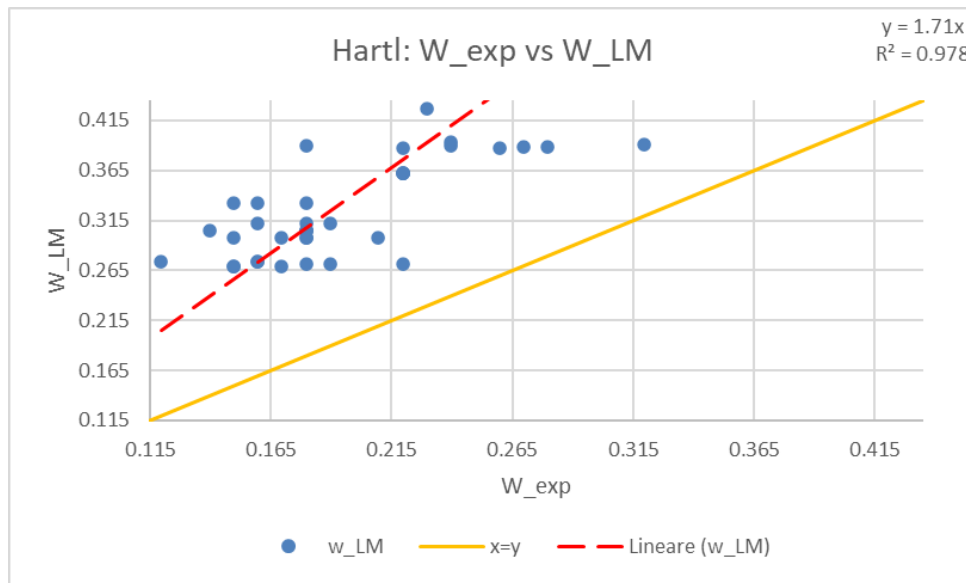


Figura 34: Confronto dati sperimentali (Hartl) e Metodo Lineare

La Fig.34 mostra il confronto tra le ampiezze di fessura sperimentali (W_{exp}) e i valori calcolati attraverso il modello lineare (W_{LM}) per le prove condotte da Hartl. La retta di tendenza risulta descritta dall'equazione $y=1.71x$, con un coefficiente di determinazione $R^2 = 0.978$. Tale valore dimostra una correlazione eccellente tra i dati sperimentali e quelli calcolati con il Metodo Lineare. Tuttavia, anche in questo caso si riscontra una elevata pendenza della retta con un valore pari a $n=1.71$. Tale valore, seppur inferiore rispetto al precedente caso, evidenzia che i valori calcolati risultano di circa il 70% superiori rispetto a quelli sperimentali, indicando una sovrastima del modello.

Il terzo caso analizzato riguarda i risultati proposti da Farra:

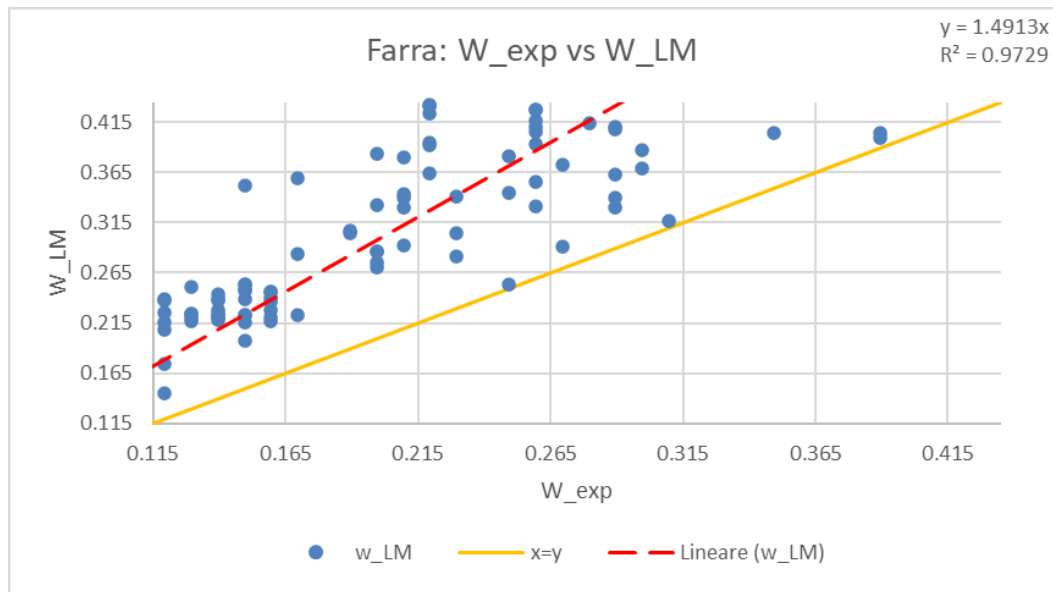


Figura 35: Confronto dati sperimentali (Farra) e Metodo Lineare

La Fig.35 mostra il confronto tra le ampiezze di fessura sperimentali (W_{exp}) e i valori calcolati attraverso il modello lineare (W_{LM}) per le prove condotte da Farra. La relazione tra i due insiemi è descritta dall'equazione $y=1.4913x$, con un $R^2 = 0.9729$. Anche in questo caso il valore del coefficiente di determinazione evidenzia una correlazione eccellente, tendente all'unità, confermando la buona affidabilità del modello nell'interpretare l'andamento delle ampiezze di fessura. Inoltre, la pendenza della retta pari a $n=1.49$ indicano una moderata sovrastima con valori leggermente superiori. Tale comportamento risulta supportato anche dalla quantità elevata di dati a nostra disposizione per il confronto.

Il seguente caso analizzato riguarda i risultati proposti da Eligehausen:

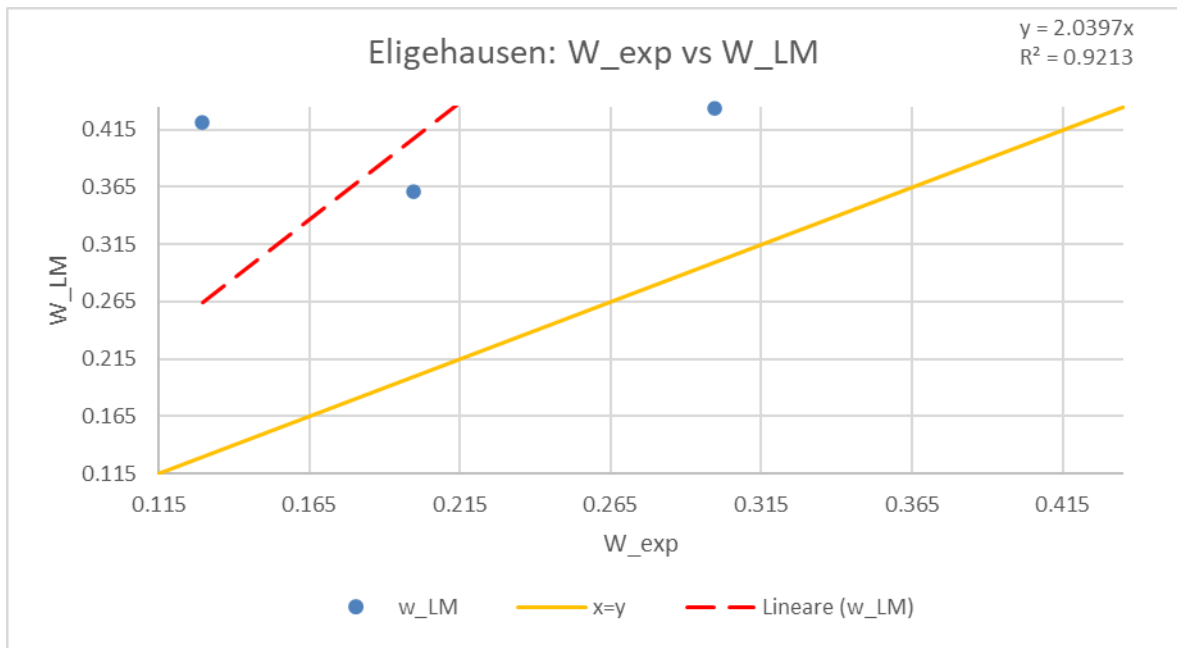


Figura 36: Confronto dati sperimentali (Eligehausen) e Metodo Lineare

La Fig.36 mostra il confronto tra le ampiezze di fessura sperimentali (W_{exp}) e i valori calcolati attraverso il modello lineare (W_{LM}) per le prove condotte da Eligehausen. L'equazione della retta di tendenza è $y=2.0397x$, con un $R^2 = 0.9213$. Seppur inferiore rispetto agli altri coefficienti di determinazione, il valore di R^2 risulta comunque elevato, testimoniando una buona correlazione tra i dati sperimentali e quelli calcolati nonostante il numero ridotto di dati a disposizione. Tale mancanza di dati si riscontra maggiormente per quanto riguarda la pendenza della retta pari a $n=2.0397$. Tale valore evidenzia che i valori forniti dal modello risultano circa doppi rispetto a quelli sperimentali, indicando una grande sovrastima del modello.

I seguenti caso analizzati riguardano i risultati proposti da Gribniak negli studi effettuati nel 2018 e poi nel 2020:

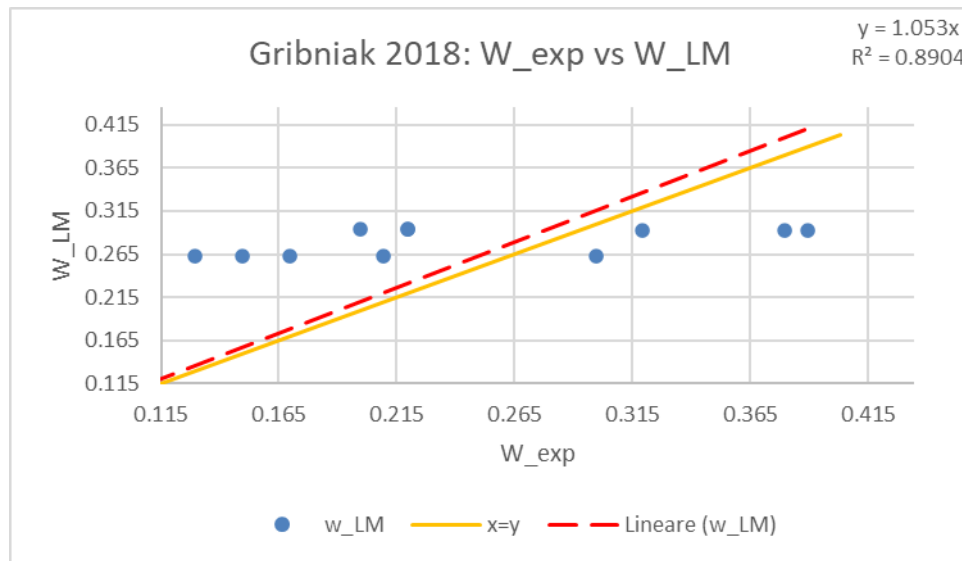


Figura 37: Confronto dati sperimentali (Gribniak, 2018) e Metodo Lineare

La Fig.37 mostra il confronto tra le ampiezze di fessura sperimentali (W_{exp}) e i valori calcolati attraverso il modello lineare (W_{LM}) per le prove condotte da Gribniak nel 2018.

L'equazione della retta di tendenza è $y=1.053x$, con un $R^2 = 0.8904$. Il valore del coefficiente di determinazione, seppur inferiore rispetto ai precedenti casi, indica una buona correlazione tra valori sperimentali e calcolati. Ciò che richiede particolare attenzione in questo caso è il valore della pendenza della retta pari a $n=1.053$, valore molto prossimo all'unità. Questo valore evidenzia che il modello lineare riproduce in modo estremamente accurato l'ampiezza di fessura osservata sperimentalmente. I valori che si distribuiscono in modo regolare attorno alla linea di riferimento, suggeriscono un modello che descrive realisticamente il comportamento del materiale.

I successivi studi di Gribniak nel 2020 hanno evidenziato i seguenti risultati:

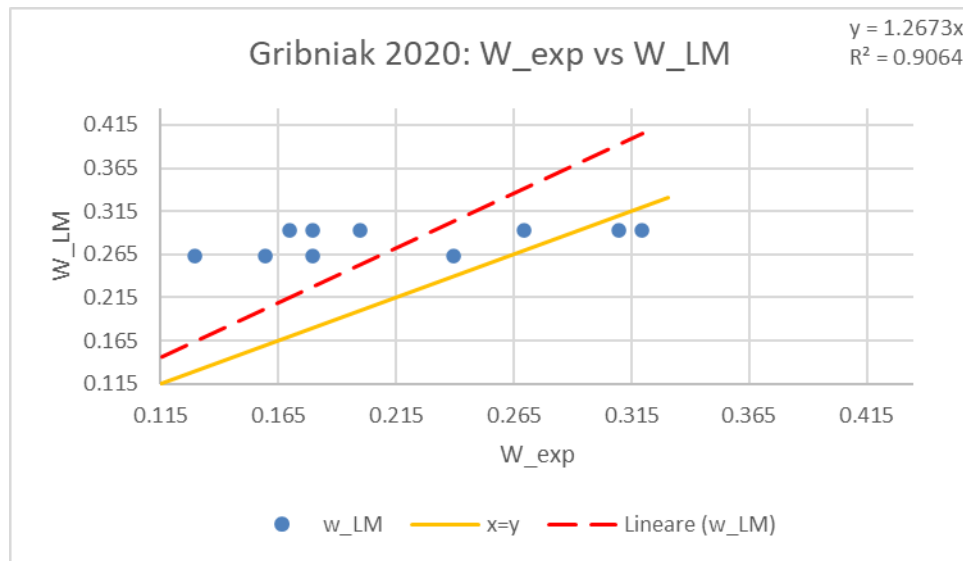


Figura 38: Confronto dati sperimentali (Gribniak, 2020) e Metodo Lineare

La Fig.38 mostra il confronto tra le ampiezze di fessura sperimentali (W_{exp}) e i valori calcolati attraverso il modello lineare (W_{LM}) per le prove condotte da Gribniak nel 2020.

L'equazione della retta di tendenza è $y=1.2673x$, con un $R^2 = 0.9064$. La buona correlazione tra dati sperimentali e calcolati è evidenziata dal valore del coefficiente di correlazione. Mentre la pendenza leggermente superiore all'unità indica che il modello lineare tende a sovrastimare moderatamente le ampiezze di fessura.

Ultimo caso confrontato riguarda i risultati proposti da Gilbert:

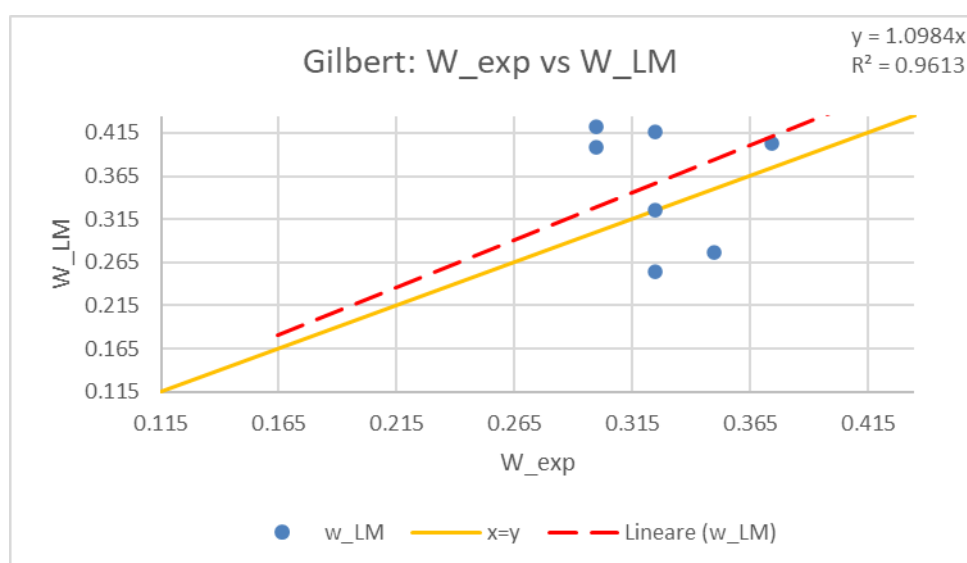


Figura 39: Confronto dati sperimentali (Gilbert) e Metodo Lineare

La Fig.39 mostra il confronto tra le ampiezze di fessura sperimentali (W_{exp}) e i valori calcolati attraverso il modello lineare (W_{LM}) per le prove condotte da Gilbert. L'equazione della retta di tendenza è $y=1.0984x$, con un $R^2 = 0.9613$. Il valore molto elevato del coefficiente di determinazione testimonia un'ottima correlazione tra i dati sperimentali e quelli calcolati, mentre la pendenza della retta, prossima all'unità, mostra che il modello lineare riproduce accuratamente le ampiezze di fessura osservate sperimentalmente con una lieve sovrastima di circa 10%.

Dall'analisi dei risultati ottenuti mediante il confronto tra il Modello Lineare e i dati sperimentali è emerso che tale modello presenta una buona capacità predittiva nel descrivere l'andamento delle ampiezze di fessura. In generale i valori dei coefficienti di determinazione sono compresi tra 0.89 e 0.98, evidenziando una forte correlazione tra i dati calcolati e quelli sperimentali e confermando la coerenza del modello nel rappresentare il fenomeno fessurativo. Le pendenze delle rette di regressione, inoltre, presentano valori compresi tra 1.0 e 2.0 mostrando una tendenza generale del modello a sovrastimare le ampiezze di fessura. Tale andamento, tuttavia, è coerente con la natura semplificata del modello che presenta una formula snella e che si basa sulla relazione diretta tra deformazioni medie e apertura di fessura, senza considerare dettagliatamente alcuni parametri, come ad

esempio le condizioni di aderenza acciaio-calcestruzzo, rigidezza effettiva del copriferro o l'influenza delle tensioni residue.

Nonostante ciò, il modello lineare presenta una rappresentazione stabile, affidabile e attendibile del comportamento medio del calcestruzzo fessurato, nonché, in alcuni casi (Gribniak, Gilbert), una notevole aderenza alle misure sperimentali che suggeriscono il modello come strumento per effettuare efficacemente stime preliminari o analisi comparative.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha analizzato il fenomeno della fessurazione negli elementi in calcestruzzo armato, studiandone i meccanismi di formazione, la teoria alla base di tale fenomeno e i principali modelli teorici proposti dalle normative europee ed internazionali.

L'obiettivo principale dell'elaborato è stato quello di confrontare i valori sperimentali di apertura delle fessure tratte da numerose campagne di prova presenti in letteratura svolte dai diversi ricercatori, con i risultati ottenuti utilizzando le formule proposte dalle prescrizioni normative, in particolar modo con Eurocodice 2 e Model Code 2020. Il confronto è stato poi ulteriormente approfondito, affiancando alle prescrizioni normative, il Metodo Lineare, sviluppato nell'ambito della ricerca dai docenti Taliano-Debernardi, con lo scopo di valutare un approccio semplificativo e fisicamente fondato per prevedere, analizzare e determinare le aperture delle fessure negli edifici in calcestruzzo armato.

Dalle analisi effettuate nel corso di questo elaborato è emerso che sia l'Eurocodice 2 che il Model Code 2020 mostrano complessivamente una buona capacità predittiva nel descrivere l'ampiezza delle fessure. Questo è evidenziato dai valori emersi del coefficiente di determinazione R^2 , generalmente elevato con valori compresi tra 0.87 e 0.98, il che conferma la coerenza dei modelli rispetto alle tendenze sperimentali.

In particolar modo l'Eurocodice 2 si dimostra tendenzialmente conservativo, mostrando in quasi tutte le serie analizzate una sovrastima dell'ampiezza delle fessure. Per quanto concerne le pendenze delle rette di regressione, risultano solitamente e frequentemente superiori all'unità, evidenziando che i valori teorici sono tendenzialmente maggiori rispetto alle misure sperimentali, con sovrastime marcate nei casi di Rizkalla ed Eligehausen. Tali risultati mostrano un approccio cautelativo e coerente con la filosofia narrativa, ma una certa rigidità del modello che non risponde correttamente a situazioni sperimentali particolari.

Per quanto riguarda il Model Code 2020 invece, mostra una maggiore accuratezza grazie alla presenza di alcuni parametri aggiornati e meglio calibrati sulle recenti campagne sperimentali. In particolare, si evidenzia la considerazione dell'Area

Efficace riformulata e dei coefficienti correttivi applicati in presenza di elevata curvatura, nonché l'importanza del copriferro e della disposizione delle barre che consente di ottenere previsioni più vicine ai valori misurati. Questi accorgimenti hanno portato alla riduzione della sovrastima rispetto all'Eurocodice 2 evidenziabile in tutte le serie analizzate soprattutto per quanto riguarda gli studi di Hartl, Farra e Gribniak in cui il MC2020 si avvicina alla condizione ottimale $x=y$. Tuttavia, nonostante migliori risultati presentati attraverso l'utilizzo del MC2020, sono comunque presenti importanti limiti, in particolare, per le barre di grande diametro o copriferro particolarmente elevati, la normativa tende a produrre sovrastime confermando la complessità del fenomeno.

È stato in seguito utilizzato il Metodo Lineare, sviluppato presso il Politecnico di Torino, per rappresentare il comportamento del tirante fessurato considerando l'effetto delle fessure secondarie e la lunghezza di aderenza ridotta. Tale metodo ha evidenziato una capacità predittiva elevata soprattutto considerando la relativa snellezza della formulazione.

Il metodo ha evidenziato ottimi risultati; infatti, la correlazione con i dati sperimentali risulta molto buona con coefficienti di determinazione R^2 spesso superiore a 0.90, il che conferma la validità delle ipotesi semplificate alla base del modello. Leggermente elevati risultano i valori della pendenza della retta di regressione che si aggirano tra 1.0 e 2.0 con una tendenza alla sovrastima. Tale comportamento rispecchia la struttura stessa del modello che assume una distribuzione lineare delle tensioni di aderenza e una distanza tra le fessure pari a quella massima teorica. Rilevanti sono i risultati ottenuti dal confronto con i valori di Gribniak e Gilbert, nei quali il metodo restituisce pendenze molto vicine all'unità (circa 1.05 e 1.1 rispettivamente) evidenziando una quasi perfetta aderenza tra valori sperimentali e prescrizioni normative. Tali risultati dimostrano che, nonostante la mancanza di alcuni riferimenti presenti nelle normative più recenti, il modello lineare riesce, in maniera efficace, a cogliere i meccanismi principali che influenzano il campo fessurativo. In altri casi invece, come Rizkalla ed Eligehausen, il modello tende a sovrastimare notevolmente con valori della pendenza della retta tra 2.0 e 2.7. Questo comportamento è attribuibile alla natura monotona del modello, nonché alla semplicità

del metodo che non include parametri correttivi specifici per copriferro, diametro o disuniformità dei pattern fessurativi.

Complessivamente, il Metodo Lineare si dimostra uno strumento versatile e affidabile, particolarmente utile nelle fasi preliminari di analisi grazie alla sua semplicità di applicazione e alla chiarezza fisica dei parametri utilizzati.

Dall'analisi dei confronti effettuati con le diverse prescrizioni normative emerge che non esiste un modello universalmente superiore, ma ogni approccio presenta vantaggi e svantaggi dipendenti dal tipo di sezione, dalla geometria, dalle condizioni di prova. In particolare:

- L'Eurocodice 2 risulta affidabile, particolarmente conservativo e coerente con la filosofia della sicurezza strutturale. Talvolta tende a sovrastimare i valori;
- Il Model Code 2020 offre una descrizione più affidabile, realistica, moderna e flessibile del fenomeno, supportata da formulazioni aggiornate e tarature maggiormente accurate;
- Il Metodo Lineare si distingue per la sua semplicità e la sua capacità predittiva rispetto alle prescrizioni normative sopra riportate. È un valido strumento nella descrizione della fessurazione stabilizzata, nonché un metodo speditivo adatto ad una fase di valutazione preliminare della fessura.

Risultato importante dell'elaborato è anche la conferma sperimentale del ruolo di alcuni parametri geometrici, in particolare, copriferro, diametro delle barre, percentuale di armatura, i quali svolgono un ruolo fondamentale influenzando direttamente la distanza tra le fessure e la loro apertura. Rilevante importanza, nei recenti studi che sono stati effettuati in letteratura, è l'attenzione verso l'Area Efficace e verso una più accurata modellazione dei fenomeni di aderenza, che dimostra la necessità di approcci che non si limitano a descrizioni geometriche ma che coinvolgano anche aspetti meccanici dell'interazione acciaio-calcestruzzo.

In conclusione, il confronto tra i dati sperimentali raccolti dalle analisi dei differenti ricercatori, con le principali prescrizioni normative hanno evidenziato risultati soddisfacenti, soprattutto nei casi in cui si ha a disposizione un notevole numero di dati da confrontare. Le prescrizioni normative tendono talvolta a sovrastimare i valori,

presentando un carattere maggiormente conservativo e a favore di sicurezza. Per quanto riguarda il Metodo Lineare sviluppato presso il Politecnico di Torino; dal confronto emerge una buona corrispondenza di valori nonostante la formulazione semplificata del metodo. Caratteristica più importante è la conferma dell'utilità del metodo per quanto riguarda le analisi preliminari da svolgere sulle fessure. Dunque, il confronto condotto in questa tesi mette in luce l'importanza della ricerca sperimentale per la valutazione delle fessure in elementi in calcestruzzo armato che contribuiscono al progresso delle metodologie di calcolo correnti, confermando la centralità dello studio del comportamento fessurativo nella progettazione e nella verifica delle strutture in calcestruzzo armato.

Appendice A

A1 Autore: Rizkalla

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{sr} (Mpa)	$\tau\sigma_s$ (Mpa)	s_{rm} (mm)	s_{rmax} (mm)	w_m (mm)	w_{max} (mm)
T2A	304.8	127	12.7	8	11.3	58.7	32 544	2.9	-	344.8	78.7	-	0.06	-
T3B	304.8	127	12.7	8	12.7	49.8	31 993	2.7	-	344.8	76.2	-	0.11	-
T3A	304.8	127	12.7	8	12.7	50.5	34 268	2.8	-	344.8	84.1	-	0.07	-
T1A	304.8	127	12.7	8	9.525	52.4	32 062	2.6	-	344.8	86.4	-	0.07	-
T1B	304.8	127	19.05	8	11.3	50.7	33 096	2.7	-	344.8	99.3	-	0.11	-
T1B	304.8	127	19.05	8	9.525	51.6	31 234	2.7	-	344.8	79.5	-	0.09	-
T8B	304.8	254	19.05	8	16	61.4	34 958	1.8	-	344.8	161.5	-	0.10	-
T6A	304.8	177.8	12.7	8	16	55.7	34 958	2.7	-	344.8	96.5	-	0.08	-
T6B	304.8	177.8	19.05	8	16	58.7	34 613	3.0	-	344.8	77.0	-	0.12	-
T4A	304.8	177.8	12.7	8	11.3	57.8	33 992	2.6	-	344.8	111.0	-	0.09	-
T8A	304.8	254	12.7	8	16	61.4	35 647	2.1	-	344.8	136.1	-	0.07	-
T9A	304.8	254	12.7	8	19.05	60.3	34 406	2.3	-	344.8	155.7	-	0.09	-
T5B	304.8	177.8	19.05	8	12.7	50.1	32 269	2.4	-	344.8	96.3	-	0.08	-
6	304.8	177.8	38.1	8	11.3	55.5	35 268	2.6	-	344.8	129.8	-	0.18	-
4C	304.8	177.8	19.05	8	11.3	45.2	31 820	2.3	-	344.8	100.6	-	0.15	-
T5A	304.8	177.8	12.7	8	12.7	50.2	31 372	2.6	-	344.8	117.1	-	0.08	-
4A	304.8	177.8	19.05	8	11.3	47.4	32 586	2.4	-	344.8	104.1	-	0.12	-
4	304.8	177.8	38.1	8	11.3	52.0	34 137	2.7	-	344.8	101.9	-	0.15	-
2B	304.8	177.8	19.05	8	11.3	53.7	34 668	2.8	-	344.8	93.5	-	0.07	-
7	304.8	177.8	38.1	8	11.3	51.6	34 006	2.7	-	344.8	123.7	-	0.19	-
6C	304.8	177.8	19.05	8	11.3	51.1	33 848	2.7	-	344.8	103.4	-	0.15	-
3	304.8	177.8	38.1	8	11.3	54.1	34 799	2.8	-	344.8	137.2	-	0.16	-
2C	304.8	177.8	19.05	8	11.3	54.0	34 771	2.8	-	344.8	81.8	-	0.09	-
T4B	304.8	177.8	19.05	8	11.3	50.5	33 992	2.7	-	344.8	88.1	-	0.09	-
4B	304.8	177.8	19.05	8	11.3	47.3	32 558	2.5	-	344.8	103.4	-	0.13	-
2	304.8	177.8	19.05	8	11.3	54.7	35 006	2.9	-	344.8	103.9	-	0.09	-
T9B	304.8	254	19.05	8	19.05	58.0	35 578	2.5	-	344.8	139.2	-	0.10	-
5	304.8	177.8	38.1	8	11.3	48.0	32 779	2.7	-	344.8	155.7	-	0.17	-
2A	304.8	177.8	19.05	8	11.3	46.6	32 303	2.8	-	344.8	84.8	-	0.10	-
6B	304.8	177.8	19.05	8	11.3	48.6	32 999	2.9	-	344.8	81.0	-	0.11	-
6A	304.8	177.8	19.05	8	11.3	44.2	28 911	2.7	-	344.8	87.6	-	0.09	-
1	304.8	177.8	19.05	8	11.3	49.5	33 289	3.1	-	344.8	96.0	-	0.08	-
T7A	304.8	254	12.7	8	12.7	51.3	31 648	2.5	-	344.8	131.1	-	0.07	-
T7B	304.8	254	19.05	8	12.7	50.5	31 717	2.5	-	344.8	157.7	-	0.11	-

A2 Autore: Hartl

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{sf} (Mpa)	$T\sigma_s$ (Mpa)	s_{rm} (mm)	$s_{rm,ax}$ (mm)	w_m (mm)	$w_{m,ax}$ (mm)
165	80	80	28	1	24	49.3	36600	3.48	64.7	300	-	-	0.17	0.2
169	80	80	28	1	24	49.3	36600	3.48	64.7	300	-	-	0.15	0.19
167	80	80	28	1	24	49.3	36600	3.48	64.7	300	-	-	0.15	0.17
153	80	80	28	1	24	39.1	34300	2.98	56.5	300	-	-	0.18	0.23
157	80	80	28	1	24	39.1	34300	2.98	56.5	300	-	-	0.22	0.24
155	80	80	28	1	24	39.1	34300	2.98	56.5	300	-	-	0.19	0.23
135	80	80	28	1	24	27.0	31100	2.33	45.6	300	-	-	0.12	0.14
139	80	80	28	1	24	27.0	31100	2.33	45.6	300	-	-	0.16	0.18
137	80	80	28	1	24	27.0	31100	2.33	45.6	300	-	-	0.16	0.19
161	80	80	31	1	18	49.3	36600	3.48	102.9	300	-	-	0.18	0.21
163	80	80	31	1	18	49.3	36600	3.48	102.9	300	-	-	0.21	0.26
159	80	80	31	1	18	49.3	36600	3.48	102.9	300	-	-	0.15	0.17
145	80	80	31	1	18	39.1	34300	2.98	89.3	300	-	-	0.18	0.23
149	80	80	31	1	18	39.1	34300	2.98	89.3	300	-	-	0.14	0.16
151	80	80	31	1	18	39.1	34300	2.98	89.3	300	-	-	0.18	0.2
147	80	80	31	1	18	39.1	34300	2.98	89.3	300	-	-	0.18	0.2
129	80	80	31	1	18	27.0	31100	2.33	71.2	300	-	-	0.16	0.19
133	80	80	31	1	18	27.0	31100	2.33	71.2	300	-	-	0.18	0.19
131	80	80	31	1	18	27.0	31100	2.33	71.2	300	-	-	0.19	0.2
143	80	80	34	1	12	39.1	34300	2.98	182.9	300	-	-	0.18	0.2
141	80	80	34	1	12	39.1	34300	2.98	182.9	300	-	-	0.17	0.18
123	80	80	34	1	12	27.0	31100	2.33	144.3	300	-	-	0.16	0.22
127	80	80	34	1	12	27.0	31100	2.33	144.3	300	-	-	0.15	0.17
125	80	80	34	1	12	27.0	31100	2.33	144.3	300	-	-	0.18	0.22
170	80	80	28	1	24	49.3	19000	3.48	0	420	-	-	0.22	0.22
171	80	80	28	1	24	49.3	19000	3.48	0	420	-	-	0.22	0.22
172	80	80	28	1	24	49.3	19000	3.48	0	420	-	-	0.22	0.22
173	80	80	28	1	24	49.3	19000	3.48	0	420	-	-	0.22	0.22
168	80	80	28	1	24	49.3	36600	3.48	64.7	420	-	-	0.22	0.28
166	80	80	28	1	24	49.3	36600	3.48	64.7	420	-	-	0.26	0.3
156	80	80	28	1	24	39.1	34300	2.98	56.5	420	-	-	0.28	0.34
154	80	80	28	1	24	39.1	34300	2.98	56.5	420	-	-	0.27	0.34
158	80	80	28	1	24	39.1	36600	2.98	64.7	420	-	-	0.32	0.35
138	80	80	28	1	24	27.0	31100	2.33	45.6	420	-	-	0.24	0.27
136	80	80	28	1	24	27.0	31100	2.33	45.6	420	-	-	0.18	0.2
140	80	80	28	1	24	27.0	34300	2.33	56.5	420	-	-	0.24	0.25
160	80	80	31	1	18	49.3	36600	3.48	102.9	420	-	-	0.22	0.25
162	80	80	31	1	18	49.3	36600	3.48	102.9	420	-	-	0.26	0.31
164	80	80	31	1	18	49.3	36600	3.48	102.9	420	-	-	0.31	0.38
150	80	80	31	1	18	39.1	34300	2.98	89.3	420	-	-	0.21	0.24
148	80	80	31	1	18	39.1	34300	2.98	89.3	420	-	-	0.27	0.28
152	80	80	31	1	18	39.1	34300	2.98	89.3	420	-	-	0.26	0.3
146	80	80	31	1	18	39.1	34300	2.98	89.3	420	-	-	0.25	0.33
134	80	80	31	1	18	27.0	31100	2.33	71.2	420	-	-	0.27	0.29
132	80	80	31	1	18	27.0	31100	2.33	71.2	420	-	-	0.28	0.3
130	80	80	31	1	18	27.0	31100	2.33	71.2	420	-	-	0.23	0.28
144	80	80	34	1	12	39.1	34300	2.98	182.9	420.1	-	-	0.26	0.28
142	80	80	34	1	12	39.1	34300	2.98	182.9	429	-	-	0.25	0.26
126	80	80	34	1	12	27.0	31100	2.33	144.3	420	-	-	0.25	0.31
128	80	80	34	1	12	27.0	31100	2.33	144.3	420	-	-	0.22	0.25
124	80	80	34	1	12	27.0	31100	2.33	144.3	420	-	-	0.23	0.31
122	80	80	36	1	8	27.0	31100	2.33	308.9	420	-	-	0.23	0.27

A3 Autore: Farra

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{sr} (Mpa)	$1\sigma_g$ (Mpa)	s_{rm} (mm)	s_{rmax} (mm)	w_m (mm)	w_{max} (mm)
H50	100	100	40	1	20	67.2	41800	3.09	-	160.7512	121	-	0.10	-
H50	100	100	40	1	20	67.2	41800	3.09	-	174.1206	122	-	0.12	-
H52	100	100	40	1	20	87.1	41300	4.69	-	172.2107	137	-	0.12	-
H52	100	100	40	1	20	87.1	41300	4.69	-	174.1206	154	-	0.13	-
N20	100	100	40	1	20	32.4	29100	2.47	-	158.8413	135	-	0.10	-
H50	100	100	40	1	20	67.2	41800	3.09	-	195.1297	121	-	0.12	-
N12	100	100	40	1	20	44.8	29000	2.6	-	199.2679	154	-	0.15	-
N10	100	100	40	1	20	29.9	29900	2.13	-	190.6732	134	-	0.12	-
S22	100	100	40	1	20	56.9	30400	2.9	-	222.5052	121	-	0.12	-
S22	100	100	40	1	20	56.9	30400	2.9	-	224.0968	135	-	0.14	-
N32	100	100	40	1	20	53.8	31200	2.98	-	218.0487	136	-	0.15	-
N32	100	100	40	1	20	53.8	31200	2.98	-	218.6853	154	-	0.16	-
N32	100	100	40	1	20	53.8	31200	2.98	-	219.0037	121	-	0.13	-
N12	100	100	40	1	20	44.8	29000	2.6	-	217.4121	136	-	0.15	-
S22	100	100	40	1	20	56.9	30400	2.9	-	226.325	155	-	0.16	-
N12	100	100	40	1	20	44.8	29000	2.6	-	217.7304	155	-	0.17	-
N22	100	100	40	1	20	48.6	33000	2.68	-	220.2769	154	-	0.15	-
N22	100	100	40	1	20	48.6	33000	2.68	-	220.5953	121	-	0.13	-
S32	100	100	40	1	20	63.3	31600	3.07	-	230.4632	135	-	0.14	-
N22	100	100	40	1	20	48.6	33000	2.68	-	220.9136	120	-	0.13	-
S30	100	100	40	1	20	46.3	27000	2.8	-	216.7754	153	-	0.14	-
N42	100	100	40	1	20	55.4	32800	3.16	-	220.5953	135	-	0.13	-
S32	100	100	40	1	20	63.3	31600	3.07	-	236.1929	180	-	0.16	-
S32	100	100	40	1	20	63.3	31600	3.07	-	236.1929	135	-	0.14	-
N42	100	100	40	1	20	55.4	32800	3.16	-	223.1418	135	-	0.14	-
N42	100	100	40	1	20	55.4	32800	3.16	-	223.4601	121	-	0.12	-
N10	100	100	40	1	20	29.9	29900	2.13	-	212.319	134	-	0.14	-
S30	100	100	40	1	20	46.3	27000	2.8	-	227.9166	155	-	0.16	-
S30	100	100	40	1	20	46.3	27000	2.8	-	228.8716	121	-	0.12	-
S20	100	100	40	1	20	38.8	29300	2.81	-	215.1838	120	-	0.12	-
N40	100	100	40	1	20	39.9	30300	2.81	-	217.7304	135	-	0.14	-
N40	100	100	40	1	20	39.9	30300	2.81	-	217.7304	136	-	0.15	-
N40	100	100	40	1	20	39.9	30300	2.81	-	218.0487	155	-	0.16	-
N10	100	100	40	1	20	29.9	29900	2.13	-	221.8685	120	-	0.13	-
N30	100	100	40	1	20	36.9	30300	2.64	-	219.9586	136	-	0.16	-
N30	100	100	40	1	20	36.9	30300	2.64	-	219.9586	154	-	0.16	-
S20	100	100	40	1	20	38.8	29300	2.81	-	219.6403	135	-	0.14	-
N30	100	100	40	1	20	36.9	30300	2.64	-	220.5953	135	-	0.15	-
S20	100	100	40	1	20	38.8	29300	2.81	-	222.8235	154	-	0.15	-
N20	100	100	40	1	20	32.4	29100	2.47	-	219.9586	135	-	0.15	-
N20	100	100	40	1	20	32.4	29100	2.47	-	220.2769	153	-	0.15	-
N22	100	100	43	1	14	48.6	33000	2.68	-	286.4873	187	-	0.20	-
N20	100	100	43	1	14	32.4	29100	2.47	-	259.8525	159	-	0.17	-
H50	100	100	43	1	14	67.2	41800	3.09	-	306.6259	160	-	0.23	-
H50	100	100	43	1	14	67.2	41800	3.09	-	309.2244	161	-	0.20	-
H50	100	100	43	1	14	67.2	41800	3.09	-	312.4726	-	-	0.27	-
N42	100	100	43	1	14	55.4	32800	3.16	-	294.2829	160	-	0.20	-
N12	100	100	43	1	14	44.8	29000	2.6	-	292.334	190	-	0.23	-
N42	100	100	43	1	14	55.4	32800	3.16	-	296.2318	160	-	0.20	-
N22	100	100	43	1	14	48.6	33000	2.68	-	298.1807	159	-	0.19	-
N32	100	100	43	1	14	53.8	31200	2.98	-	300.7792	160	-	0.21	-
N32	100	100	43	1	14	53.8	31200	2.98	-	307.2755	138	-	0.19	-
N30	100	100	43	1	14	36.9	30300	2.64	-	298.1807	189	-	0.23	-
N40	100	100	43	1	14	39.9	30300	2.81	-	300.1296	191	-	0.26	-
N40	100	100	43	1	14	39.9	30300	2.81	-	300.7792	160	-	0.20	-
N22	100	100	43	1	14	48.6	33000	2.68	-	324.8156	159	-	0.15	-
N30	100	100	43	1	14	36.9	30300	2.64	-	299.48	160	-	0.21	-
N32	100	100	43	1	14	53.8	31200	2.98	-	326.7645	159	-	0.21	-
N30	100	100	43	1	14	36.9	30300	2.64	-	300.1296	190	-	0.25	-

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{st} (Mpa)	$T\sigma_s$ (Mpa)	s_{rm} (mm)	s_{rmax} (mm)	w_m (mm)	w_{max} (mm)
H50	100	100	40	1	20	67.2	41800	3.09	-	160.7512	121	-	0.10	-
H50	100	100	40	1	20	67.2	41800	3.09	-	174.1206	122	-	0.12	-
H52	100	100	40	1	20	87.1	41300	4.69	-	172.2107	137	-	0.12	-
H52	100	100	40	1	20	87.1	41300	4.69	-	174.1206	154	-	0.13	-
N20	100	100	40	1	20	32.4	29100	2.47	-	158.8413	135	-	0.10	-
H50	100	100	40	1	20	67.2	41800	3.09	-	195.1297	121	-	0.12	-
N12	100	100	40	1	20	44.8	29000	2.6	-	199.2679	154	-	0.15	-
N10	100	100	40	1	20	29.9	29900	2.13	-	190.6732	134	-	0.12	-
S22	100	100	40	1	20	56.9	30400	2.9	-	222.5052	121	-	0.12	-
S22	100	100	40	1	20	56.9	30400	2.9	-	224.0968	135	-	0.14	-
N32	100	100	40	1	20	53.8	31200	2.98	-	218.0487	136	-	0.15	-
N32	100	100	40	1	20	53.8	31200	2.98	-	218.6853	154	-	0.16	-
N32	100	100	40	1	20	53.8	31200	2.98	-	219.0037	121	-	0.13	-
N12	100	100	40	1	20	44.8	29000	2.6	-	217.4121	136	-	0.15	-
S22	100	100	40	1	20	56.9	30400	2.9	-	226.325	155	-	0.16	-
N12	100	100	40	1	20	44.8	29000	2.6	-	217.7304	155	-	0.17	-
N22	100	100	40	1	20	48.6	33000	2.68	-	220.2769	154	-	0.15	-
N22	100	100	40	1	20	48.6	33000	2.68	-	220.5953	121	-	0.13	-
S32	100	100	40	1	20	63.3	31600	3.07	-	230.4632	135	-	0.14	-
N22	100	100	40	1	20	48.6	33000	2.68	-	220.9136	120	-	0.13	-
S30	100	100	40	1	20	46.3	27000	2.8	-	216.7754	153	-	0.14	-
N42	100	100	40	1	20	55.4	32800	3.16	-	220.5953	135	-	0.13	-
S32	100	100	40	1	20	63.3	31600	3.07	-	236.1929	180	-	0.16	-
S32	100	100	40	1	20	63.3	31600	3.07	-	236.1929	135	-	0.14	-
N42	100	100	40	1	20	55.4	32800	3.16	-	223.1418	135	-	0.14	-
N42	100	100	40	1	20	55.4	32800	3.16	-	223.4601	121	-	0.12	-
N10	100	100	40	1	20	29.9	29900	2.13	-	212.319	134	-	0.14	-
S30	100	100	40	1	20	46.3	27000	2.8	-	227.9166	155	-	0.16	-
S30	100	100	40	1	20	46.3	27000	2.8	-	228.8716	121	-	0.12	-
S20	100	100	40	1	20	38.8	29300	2.81	-	215.1838	120	-	0.12	-
N40	100	100	40	1	20	39.9	30300	2.81	-	217.7304	135	-	0.14	-
N40	100	100	40	1	20	39.9	30300	2.81	-	217.7304	136	-	0.15	-
N40	100	100	40	1	20	39.9	30300	2.81	-	218.0487	155	-	0.16	-
N10	100	100	40	1	20	29.9	29900	2.13	-	221.8685	120	-	0.13	-
N30	100	100	40	1	20	36.9	30300	2.64	-	219.9586	136	-	0.16	-
N30	100	100	40	1	20	36.9	30300	2.64	-	219.9586	154	-	0.16	-
S20	100	100	40	1	20	38.8	29300	2.81	-	219.6403	135	-	0.14	-
N30	100	100	40	1	20	36.9	30300	2.64	-	220.5953	135	-	0.15	-
S20	100	100	40	1	20	38.8	29300	2.81	-	222.8235	154	-	0.15	-
N20	100	100	40	1	20	32.4	29100	2.47	-	219.9586	135	-	0.15	-
N20	100	100	40	1	20	32.4	29100	2.47	-	220.2769	153	-	0.15	-
N22	100	100	43	1	14	48.6	33000	2.68	-	286.4873	187	-	0.20	-
N20	100	100	43	1	14	32.4	29100	2.47	-	259.8525	159	-	0.17	-
H50	100	100	43	1	14	67.2	41800	3.09	-	306.6259	160	-	0.23	-
H50	100	100	43	1	14	67.2	41800	3.09	-	309.2244	161	-	0.20	-
H50	100	100	43	1	14	67.2	41800	3.09	-	312.4726	-	-	0.27	-
N42	100	100	43	1	14	55.4	32800	3.16	-	294.2829	160	-	0.20	-
N12	100	100	43	1	14	44.8	29000	2.6	-	292.334	190	-	0.23	-
N42	100	100	43	1	14	55.4	32800	3.16	-	296.2318	160	-	0.20	-

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{st} (Mpa)	$T\sigma_s$ (Mpa)	s_{rm} (mm)	s_{rmax} (mm)	w_m (mm)	w_{max} (mm)
S32	100	100	45	1	10	63.3	31600	3.07	-	501.6712	193	-	0.31	-
N40	100	100	45	1	10	39.9	30300	2.81	-	446.9203	193	-	0.28	-
N10	100	100	45	1	10	29.9	29900	2.13	-	440.5539	237	-	0.32	-
N40	100	100	45	1	10	39.9	30300	2.81	-	448.1935	-	-	0.33	-
N30	100	100	45	1	10	36.9	30300	2.64	-	446.9203	238	-	0.31	-
N30	100	100	45	1	10	36.9	30300	2.64	-	446.9203	193	-	0.29	-
S20	100	100	45	1	10	38.8	29300	2.81	-	453.2866	238	-	0.38	-
S22	100	100	45	1	10	56.9	30400	2.9	-	524.5902	239	-	0.38	-
S22	100	100	45	1	10	56.9	30400	2.9	-	528.41	193	-	0.31	-
S22	100	100	45	1	10	56.9	30400	2.9	-	529.6833	193	-	0.27	-
S30	100	100	45	1	10	46.3	27000	2.8	-	510.5841	240	-	0.38	-
S20	100	100	45	1	10	38.8	29300	2.81	-	506.7643	239	-	0.38	-
S30	100	100	45	1	10	46.3	27000	2.8	-	538.5962	239	-	0.38	-
S30	100	100	45	1	10	46.3	27000	2.8	-	541.1428	239	-	0.38	-

A4 Autore: Eligehausen

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{sf} (Mpa)	$\tau\sigma_s$ (Mpa)	s_{rm} (mm)	s_{rmax} (mm)	w_m (mm)	w_{max} (mm)
175-3	50	100	21	1	8	26.7	29888.47	2.68	159.7	418.4	-	-	0.30	-
179-5	50	100	21	1	8	26.7	29888.47	2.68	83.1	412.3	-	-	0.13	-
182-7	50	100	21	1	8	24.2	28924.89	2.51	65.8	410	-	-	0.13	-
183-4	50	100	21	1	8	30.8	31346.1	2.95	133.9	400.7	-	-	0.20	-
176-4	50	100	20	1	10	26.7	29888.47	2.68	123.4	420.1	-	-	0.23	-
184-4	50	100	20	1	10	30.8	31346.1	2.95	96.2	450.7	-	-	0.22	-

A5 Autore: Gribniak (2018 – 2020)

2018

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{sf} (Mpa)	$\tau\sigma_s$ (Mpa)	s_{rm} (mm)	s_{rmax} (mm)	w_m (mm)	w_{max} (mm)
P1-4x10-C50-L	150	150	50	4	10	36.44	32400	2.80	214.6	319.6	-	-	0.38	-
P2-4x10-C50-L	150	150	50	4	10	36.44	32400	2.80	214.6	319.6	-	-	0.39	-
P3-4x10-C50-L	150	150	50	4	10	36.44	32400	2.80	214.6	319.6	-	-	0.32	-
P1-4x10-C40-L	150	150	40	4	10	42.51	34000	3.18	243.2	319.6	-	-	0.21	-
P2-4x10-C40-L	150	150	40	4	10	42.51	34000	3.18	243.2	319.6	-	-	0.30	-
P3-4x10-C40-L	150	150	40	4	10	42.51	34000	3.18	243.2	319.6	-	-	0.17	-
P1-4x10-C30-L	150	150	30	4	10	36.36	32400	2.79	214.2	319.6	-	-	0.22	-
P2-4x10-C30-L	150	150	30	4	10	36.36	32400	2.79	214.2	319.6	-	-	0.22	-
P3-4x10-C30-L	150	150	30	4	10	36.36	32400	2.79	214.2	319.6	-	-	0.20	-
P1-4x10-C15-L	150	150	15	4	10	42.51	34000	3.18	243.2	319.6	-	-	0.13	-
P2-4x10-C15-L	150	150	15	4	10	42.51	34000	3.18	243.2	319.6	-	-	0.11	-
P3-4x10-C15-L	150	150	15	4	10	42.51	34000	3.18	243.2	319.6	-	-	0.15	-

2020

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{sf} (Mpa)	$\tau\sigma_s$ (Mpa)	s_{rm} (mm)	s_{rmax} (mm)	w_m (mm)	w_{max} (mm)
P1-4x10-C50-L	150	150	50	4	10	36.44	32400	2.795166	214.6049	319.5831	-	-	0.31	-
P2-4x10-C50-L	150	150	50	4	10	36.44	32400	2.795166	214.6049	319.5831	-	-	0.32	-
P3-4x10-C50-L	150	150	50	4	10	36.44	32400	2.795166	214.6049	319.5831	-	-	0.27	-
P1-4x10-C40-L	150	150	40	4	10	42.51	34000	3.179932	243.2247	319.5831	-	-	0.18	-
P2-4x10-C40-L	150	150	40	4	10	42.51	34000	3.179932	243.2247	319.5831	-	-	0.24	-
P3-4x10-C40-L	150	150	40	4	10	42.51	34000	3.179932	243.2247	319.5831	-	-	0.16	-
P1-4x10-C30-L	150	150	30	4	10	36.36	32400	2.789922	214.2022	319.5831	-	-	0.17	-
P2-4x10-C30-L	150	150	30	4	10	36.36	32400	2.789922	214.2022	319.5831	-	-	0.20	-
P3-4x10-C30-L	150	150	30	4	10	36.36	32400	2.789922	214.2022	319.5831	-	-	0.18	-
P1-4x10-C15-L	150	150	15	4	10	42.51	34000	3.179932	243.2247	319.5831	-	-	0.11	-
P2-4x10-C15-L	150	150	15	4	10	42.51	34000	3.179932	243.2247	319.5831	-	-	0.10	-
P3-4x10-C15-L	150	150	15	4	10	42.51	34000	3.179932	243.2247	319.5831	-	-	0.13	-

A6 Autore: Tan

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{sf} (Mpa)	$\tau\sigma_s$ (Mpa)	s_{rm} (mm)	s_{rmax} (mm)	w_m (mm)	w_{max} (mm)
S-20-40	400	400	40	8	20	74.3	27 400	2.86	200	265.0	-	-	0.160	-
S-32-40	400	400	40	8	32	74.3	27 400	3.76	117	157.0	-	-	0.100	-
S-20-90	400	400	90	8	20	74.3	27 400	3.33	233	293.0	-	-	0.310	-
S-32-90	400	400	90	8	32	74.3	27 400	4.01	125	212.0	-	-	0.270	-

A7 Autore: Gilbert

File	B	H	cover	ns	Diameter	fc	Ec	fct	σ_{st} (Mpa)	$\tau \sigma_s$ (Mpa)	s_{rm} (mm)	s_{rmax} (mm)	w_m (mm)	w_{max} (mm)
STS16-a	80	80	32	1	16	24.73	21600	2.15	-	136.0	172.6	-	0.17	-
STS16-b	80	80	32	1	16	24.73	21600	2.15	-	248.7	172.6	-	0.33	-
STS12-a	80	80	34	1	12	24.73	21600	2.15	-	265.0	181	-	0.35	-
STN16-a	80	80	32	1	16	21.56	22400	2.04	-	299.0	186	-	0.33	-
STN12-a	80	80	34	1	12	21.56	22400	2.04	-	338.0	188	-	0.30	-
STS16-c	80	80	32	1	16	24.73	21600	2.15	-	373.0	172.6	-	0.38	-
STS12-b	80	80	34	1	12	24.73	21600	2.15	-	354.0	181	-	0.50	-
STN16-b	80	80	32	1	16	21.56	22400	2.04	-	373.0	186	-	0.33	-
STN12-b	80	80	34	1	12	21.56	22400	2.04	-	354.0	188	-	0.30	-
STS16-d	80	80	32	1	16	24.73	21600	2.15	-	447.6	172.6	-	0.43	-
STN16-c	80	80	32	1	16	21.56	22400	2.04	-	447.6	186	-	0.38	-
STS12-c	80	80	34	1	12	24.73	21600	2.15	-	442.4	181	-	0.53	-
STN12-c	80	80	34	1	12	21.56	22400	2.04	-	442.4	188	-	0.38	-
STN16-d	80	80	32	1	16	21.56	22400	2.04	-	522.2	186	-	0.50	-

Appendice B

B1 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Rizkalla

EC2		MC2020			
s_r (mm)	w_{max} (mm)	$s_{r,max}$ (mm)	σ_s (MPa)	w_{max} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
224.7	0.284	145.8	208.9	0.184	5.18
203.8	0.279	132.8	243.4	0.18	4.90
203.8	0.279	132.8	242.4	0.18	4.95
259.9	0.299	167.8	169.4	0.19	4.72
224.7	0.290	162.0	216.7	0.21	4.88
259.9	0.295	184.0	166.2	0.21	4.80
299.6	0.432	208.8	260.6	0.30	3.21
221.0	0.312	143.5	255.9	0.20	4.89
221.0	0.305	159.7	247.8	0.22	5.34
298.9	0.346	192.2	171.3	0.22	4.69
299.6	0.417	192.6	245.6	0.27	3.79
256.6	0.374	165.8	269.8	0.24	4.10
269.8	0.349	190.2	217.0	0.25	4.38
298.9	0.346	257.0	170.8	0.30	4.70
298.9	0.366	208.4	192.4	0.25	4.12
269.8	0.340	174.0	206.9	0.22	4.73
298.9	0.356	208.4	181.9	0.25	4.41
298.9	0.341	257.0	166.3	0.29	4.83
298.9	0.336	208.4	160.8	0.23	4.98
298.9	0.341	257.0	166.3	0.29	4.83
298.9	0.341	208.4	166.3	0.24	4.83
298.9	0.331	257.0	155.7	0.28	5.11
298.9	0.331	208.4	155.7	0.23	5.11
298.9	0.341	208.4	166.3	0.24	4.83
298.9	0.351	208.4	176.8	0.24	4.54
298.9	0.326	208.4	150.2	0.23	5.26
256.6	0.367	182.0	261.1	0.26	4.57
298.9	0.338	257.0	164.0	0.29	4.89
298.9	0.336	208.4	161.7	0.23	4.95
298.9	0.326	208.4	151.1	0.23	5.24
298.9	0.335	208.4	163.0	0.23	4.91
298.9	0.311	208.4	136.0	0.22	5.65
368.7	0.412	235.9	158.1	0.26	4.46
368.7	0.412	252.0	158.1	0.28	4.46

B2 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Hartl

EC2		MC2020			
s_r (mm)	w_{max} (mm)	$s_{r,max}$ (mm)	σ_s (MPa)	w_{max} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
150.5	0.196	138.5	254.2	0.18	6.26
150.5	0.196	138.5	254.2	0.18	6.26
150.5	0.196	138.5	254.2	0.18	6.26
150.5	0.200	138.5	260.8	0.18	5.36
150.5	0.200	138.5	260.8	0.18	5.36
150.5	0.200	138.5	260.8	0.18	5.36
150.5	0.205	138.5	269.4	0.19	4.19
150.5	0.205	138.5	269.4	0.19	4.19
150.5	0.205	138.5	269.4	0.19	4.19
191.0	0.227	171.4	216.0	0.20	6.26
191.0	0.227	171.4	216.0	0.20	6.26
191.0	0.227	171.4	216.0	0.20	6.26
191.0	0.235	171.4	228.0	0.21	5.36
191.0	0.235	171.4	228.0	0.21	5.36
191.0	0.235	171.4	228.0	0.21	5.36
191.0	0.235	171.4	228.0	0.21	5.36
191.0	0.246	171.4	243.7	0.22	4.19
191.0	0.246	171.4	243.7	0.22	4.19
191.0	0.246	171.4	243.7	0.22	4.19
270.0	0.257	228.5	134.3	0.22	5.36
270.0	0.257	228.5	134.3	0.22	5.36
270.0	0.288	228.5	170.5	0.24	4.19
270.0	0.288	228.5	170.5	0.24	4.19
270.0	0.288	228.5	170.5	0.24	4.19
150.5	0.279	138.5	374.2	0.26	6.26
150.5	0.279	138.5	374.2	0.26	6.26
150.5	0.279	138.5	374.2	0.26	6.26
150.5	0.279	138.5	374.2	0.26	6.26
150.5	0.287	138.5	374.2	0.26	6.26
150.5	0.287	138.5	374.2	0.26	6.26
150.5	0.290	138.5	380.8	0.27	5.36
150.5	0.290	138.5	380.8	0.27	5.36
150.5	0.291	138.5	380.8	0.27	5.36
150.5	0.295	138.5	389.4	0.27	4.19
150.5	0.295	138.5	389.4	0.27	4.19
150.5	0.296	138.5	389.4	0.27	4.19
191.0	0.342	171.4	336.0	0.31	6.26
191.0	0.342	171.4	336.0	0.31	6.26
191.0	0.342	171.4	336.0	0.31	6.26
191.0	0.350	171.4	348.0	0.31	5.36
191.0	0.350	171.4	348.0	0.31	5.36
191.0	0.350	171.4	348.0	0.31	5.36
191.0	0.350	171.4	348.0	0.31	5.36
191.0	0.360	171.4	363.7	0.32	4.19
191.0	0.360	171.4	363.7	0.32	4.19
191.0	0.360	171.4	363.7	0.32	4.19
270.0	0.419	228.5	254.4	0.35	5.36
270.0	0.431	228.5	263.3	0.36	5.36
270.0	0.450	228.5	290.5	0.38	4.19
270.0	0.450	228.5	290.5	0.38	4.19
270.0	0.450	228.5	290.5	0.38	4.19
386.8	0.487	306.6	125.7	0.36	4.19

B3 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Farra

EC2		MC2020			
s_f (mm)	w_{max} (mm)	$s_{f,max}$ (mm)	σ_s (MPa)	w_{max} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
252.8	0.122	233.0	65.5	0.11	5.56
252.8	0.137	233.0	78.9	0.13	5.56
252.8	0.131	233.0	27.6	0.08	8.44
252.8	0.132	233.0	29.5	0.09	8.44
252.8	0.130	233.0	82.7	0.12	4.45
252.8	0.163	233.0	99.9	0.15	5.56
252.8	0.178	233.0	119.1	0.16	4.68
252.8	0.180	233.0	125.0	0.17	3.83
252.8	0.199	233.0	133.1	0.18	5.22
252.8	0.201	233.0	134.7	0.19	5.22
252.8	0.191	233.0	126.2	0.18	5.36
252.8	0.192	233.0	126.8	0.18	5.36
252.8	0.193	233.0	127.1	0.18	5.36
252.8	0.200	233.0	137.3	0.18	4.68
252.8	0.204	233.0	136.9	0.19	5.22
252.8	0.201	233.0	137.6	0.19	4.68
252.8	0.203	233.0	137.6	0.19	4.82
252.8	0.204	233.0	138.0	0.19	4.82
252.8	0.205	233.0	135.8	0.19	5.53
252.8	0.204	233.0	138.3	0.19	4.82
252.8	0.193	233.0	130.4	0.18	5.04
252.8	0.190	233.0	123.2	0.18	5.69
252.8	0.212	233.0	141.5	0.20	5.53
252.8	0.212	233.0	141.5	0.20	5.53
252.8	0.194	233.0	125.7	0.18	5.69
252.8	0.194	233.0	126.0	0.18	5.69
252.8	0.208	233.0	146.6	0.19	3.83
252.8	0.207	233.0	141.6	0.19	5.04
252.8	0.208	233.0	142.5	0.19	5.04
252.8	0.192	233.0	128.5	0.18	5.06
252.8	0.195	233.0	131.1	0.18	5.06
252.8	0.195	233.0	131.1	0.18	5.06
252.8	0.196	233.0	131.4	0.18	5.06
252.8	0.220	233.0	156.2	0.20	3.83
252.8	0.203	233.0	138.6	0.19	4.75
252.8	0.203	233.0	138.6	0.19	4.75
252.8	0.197	233.0	133.0	0.18	5.06
252.8	0.204	233.0	139.2	0.19	4.75
252.8	0.201	233.0	136.2	0.19	5.06
252.8	0.207	233.0	143.8	0.19	4.45
252.8	0.208	233.0	144.1	0.19	4.45
347.6	0.302	299.9	115.1	0.26	4.82
347.6	0.271	299.9	101.9	0.23	4.45
347.6	0.320	299.9	109.0	0.27	5.56
347.6	0.322	299.9	111.6	0.27	5.56
347.6	0.326	299.9	114.8	0.28	5.56
347.6	0.307	299.9	92.2	0.24	5.69
347.6	0.316	299.9	126.0	0.27	4.68
347.6	0.309	299.9	94.1	0.25	5.69
347.6	0.323	299.9	126.8	0.28	4.82
347.6	0.314	299.9	110.2	0.26	5.36
347.6	0.320	299.9	116.7	0.27	5.36
347.6	0.324	299.9	129.3	0.28	4.75
347.6	0.315	299.9	120.4	0.27	5.06
347.6	0.316	299.9	121.0	0.27	5.06
347.6	0.369	299.9	153.4	0.32	4.82
347.6	0.326	299.9	130.6	0.28	4.75

EC2		MC2020			
s_r (mm)	w_{max} (mm)	$s_{r,max}$ (mm)	σ_s (MPa)	w_{max} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
347.6	0.349	299.9	136.2	0.30	5.36
347.6	0.327	299.9	131.3	0.28	4.75
347.6	0.339	299.9	122.7	0.29	5.69
347.6	0.375	299.9	159.8	0.32	4.68
347.6	0.376	299.9	160.5	0.32	4.68
347.6	0.337	299.9	140.8	0.29	4.45
347.6	0.379	299.9	172.3	0.33	3.83
347.6	0.393	299.9	180.1	0.34	3.83
347.6	0.360	299.9	153.8	0.31	4.45
347.6	0.358	299.9	145.1	0.31	5.06
347.6	0.418	299.9	177.7	0.36	5.22
347.6	0.422	299.9	175.9	0.36	5.53
347.6	0.425	299.9	185.4	0.37	5.04
347.6	0.460	299.9	201.7	0.40	5.22
347.6	0.459	299.9	197.3	0.40	5.53
347.6	0.461	299.9	202.3	0.40	5.22
347.6	0.468	299.9	202.5	0.40	5.53
347.6	0.414	299.9	177.6	0.36	5.06
347.6	0.454	299.9	202.2	0.39	5.04
347.6	0.428	299.9	186.0	0.37	5.06
347.6	0.458	299.9	202.9	0.39	5.06
347.6	0.503	299.9	230.2	0.43	5.04
472.7	0.592	383.2	29.8	0.33	5.53
472.7	0.630	383.2	54.0	0.39	5.56
472.7	0.621	383.2	99.5	0.43	4.82
472.7	0.625	383.2	102.0	0.44	4.82
472.7	0.630	383.2	67.9	0.40	5.36
472.7	0.627	383.2	103.3	0.44	4.82
472.7	0.663	383.2	79.5	0.43	5.53
472.7	0.623	383.2	110.8	0.44	4.68
472.7	0.571	383.2	90.3	0.39	4.45
472.7	0.637	383.2	73.0	0.41	5.36
472.7	0.636	383.2	49.0	0.38	5.69
472.7	0.681	383.2	89.7	0.45	5.56
472.7	0.641	383.2	52.8	0.38	5.69
472.7	0.587	383.2	144.7	0.47	3.83
472.7	0.684	383.2	92.2	0.46	5.56
472.7	0.648	383.2	80.7	0.42	5.36
472.7	0.637	383.2	121.0	0.46	4.68
472.7	0.639	383.2	122.3	0.47	4.68
472.7	0.599	383.2	89.2	0.41	4.75
472.7	0.592	383.2	105.6	0.42	4.45
472.7	0.594	383.2	106.9	0.42	4.45
472.7	0.606	383.2	157.5	0.49	3.83
472.7	0.618	383.2	80.5	0.40	5.06
472.7	0.677	383.2	78.3	0.43	5.69
472.7	0.711	383.2	113.9	0.49	5.53
472.7	0.634	383.2	91.9	0.43	5.06
472.7	0.639	383.2	171.5	0.52	3.83
472.7	0.636	383.2	93.2	0.43	5.06
472.7	0.634	383.2	113.4	0.45	4.75
472.7	0.634	383.2	113.4	0.45	4.75
472.7	0.643	383.2	98.3	0.44	5.06
472.7	0.744	383.2	158.3	0.56	5.22
472.7	0.749	383.2	162.1	0.57	5.22
472.7	0.751	383.2	163.3	0.57	5.22
472.7	0.724	383.2	156.9	0.55	5.04
472.7	0.719	383.2	151.8	0.54	5.06
472.7	0.764	383.2	184.9	0.60	5.04
472.7	0.767	383.2	187.4	0.61	5.04

B4 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Eligehausen

EC2		MC2020			
s_r (mm)	w_{max} (mm)	$s_{r,max}$ (mm)	σ_s (MPa)	w_{max} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
311.0	0.390	221.0	154.5	0.28	4.82
311.0	0.385	221.0	148.4	0.27	4.82
311.0	0.391	221.0	162.8	0.28	4.52
311.0	0.374	221.0	110.2	0.24	5.31
256.2	0.395	184.2	252.2	0.28	4.82
256.2	0.421	184.2	265.8	0.30	5.31

B5 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Gribniak (2018 – 2020)

2018

EC2		MC2020			
s_r (mm)	w_{max} (mm)	$s_{r,max}$ (mm)	σ_s (MPa)	w_{max} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
283.3	0.272	277.6	122.2	0.26	5.03
283.3	0.272	277.6	122.2	0.26	5.03
283.3	0.272	277.6	122.2	0.26	5.03
283.3	0.272	252.1	95.0	0.22	5.72
283.3	0.272	252.1	95.0	0.22	5.72
283.3	0.272	252.1	95.0	0.22	5.72
283.3	0.272	226.6	122.6	0.22	5.02
283.3	0.272	226.6	122.6	0.22	5.02
283.3	0.272	226.6	122.6	0.22	5.02
283.3	0.272	188.3	95.0	0.16	5.72
283.3	0.272	188.3	95.0	0.16	5.72
283.3	0.272	188.3	95.0	0.16	5.72

2020

EC2		MC2020			
s_r (mm)	w_{max} (mm)	$s_{r,max}$ (mm)	σ_s (MPa)	w_{max} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
410.1	0.394	279.9	-	0.27	5.03
410.1	0.394	279.9	-	0.27	5.03
410.1	0.394	279.9	-	0.27	5.03
376.1	0.361	254.4	-	0.22	5.72
376.1	0.361	254.4	-	0.22	5.72
376.1	0.361	254.4	-	0.22	5.72
342.1	0.329	228.9	-	0.22	5.02
342.1	0.329	228.9	-	0.22	5.02
342.1	0.329	228.9	-	0.22	5.02
291.1	0.280	190.6	-	0.17	5.72
291.1	0.280	190.6	-	0.17	5.72
291.1	0.280	190.6	-	0.17	5.72

B6 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Tan

EC2		MC2020			
s_r (mm)	w_{max} (mm)	$s_{r,max}$ (mm)	σ_s (MPa)	w_{max} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
469.3	0.373	368.3	85.8	0.27	5.15
302.9	0.143	264.3	67.3	0.11	6.76
469.3	0.412	495.8	84.3	0.38	5.99
302.9	0.207	391.8	116.3	0.27	7.22

B7 Dati di EC2 e MC2020 confrontati con Gilbert

EC2		MC2020			
s_r (mm)	w_{max} (mm)	$s_{r,max}$ (mm)	σ_s (MPa)	w_{max} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
276.5	0.117	190.0	-	0.08	3.87
276.5	0.273	190.0	-	0.19	3.87
342.4	0.311	231.2	-	0.21	3.87
276.5	0.347	190.0	-	0.24	3.67
342.4	0.445	231.2	-	0.30	3.67
276.5	0.445	190.0	-	0.31	3.87
342.4	0.464	231.2	-	0.31	3.87
276.5	0.450	190.0	-	0.31	3.67
342.4	0.472	231.2	-	0.32	3.67
276.5	0.549	190.0	-	0.38	3.87
276.5	0.553	190.0	-	0.38	3.67
342.4	0.616	231.2	-	0.42	3.87
342.4	0.624	231.2	-	0.42	3.67
276.5	0.656	190.0	-	0.45	3.67

Appendice C

C1 Rizkalla

Linear Method sr = 2Ls				
m)	fct (MPa)	w_{max} (mm)	x_{sc} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
200.3	2.88	0.281	75.1	3.83
195.7	2.72	0.292	81.3	3.29
196.1	2.75	0.293	81.4	3.31
214.5	2.62	0.276	68.4	3.89
205.0	2.71	0.293	79.1	3.53
218.1	2.67	0.278	68.1	3.90
195.2	1.79	0.302	85.5	3.45
207.7	2.72	0.317	89.1	3.42
214.4	2.96	0.322	90.0	3.62
235.2	2.61	0.305	76.1	4.17
215.5	2.10	0.326	91.1	3.68
208.9	2.28	0.326	92.7	3.42
226.4	2.43	0.324	87.8	3.58
239.5	2.61	0.311	77.5	4.10
239.7	2.29	0.328	85.5	3.59
236.6	2.63	0.331	88.3	3.70
245.0	2.45	0.326	83.4	3.76
249.5	2.68	0.319	78.5	4.04
251.1	2.76	0.316	76.5	4.14
250.3	2.68	0.320	78.7	4.03
251.2	2.68	0.321	79.0	4.01
254.4	2.84	0.316	75.2	4.20
254.6	2.84	0.316	75.2	4.20
252.5	2.68	0.323	79.4	3.99
249.7	2.52	0.328	82.9	3.80
257.6	2.92	0.314	73.4	4.27
226.9	2.54	0.349	98.7	3.51
259.6	2.72	0.329	80.3	3.93
264.6	2.75	0.333	80.6	3.91
269.1	2.91	0.328	76.7	4.07
268.4	2.73	0.338	81.5	3.83
279.5	3.14	0.324	71.1	4.22
283.2	2.48	0.355	85.2	4.18
285.0	2.48	0.357	85.8	4.16

C2 Hartl

Linear Method $s_r = 2L_s$				
s_i (mm)	fct (MPa)	w_{max} (mm)	x_{sc} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
195.2	3.48	0.270	88.7	2.81
195.2	3.48	0.270	88.7	2.81
195.2	3.48	0.270	88.7	2.81
194.4	2.98	0.272	89.7	2.42
194.4	2.98	0.272	89.7	2.42
194.4	2.98	0.272	89.7	2.42
193.3	2.33	0.274	90.9	1.90
193.3	2.33	0.274	90.9	1.90
193.3	2.33	0.274	90.9	1.90
229.9	3.48	0.299	95.5	3.29
229.9	3.48	0.299	95.5	3.29
229.9	3.48	0.299	95.5	3.29
229.3	2.98	0.305	98.7	2.83
229.3	2.98	0.305	98.7	2.83
229.3	2.98	0.305	98.7	2.83
229.3	2.98	0.305	98.7	2.83
228.5	2.33	0.313	102.5	2.22
228.5	2.33	0.313	102.5	2.22
228.5	2.33	0.313	102.5	2.22
279.8	2.98	0.298	80.2	3.55
279.8	2.98	0.298	80.2	3.55
279.4	2.33	0.333	99.9	2.78
279.4	2.33	0.333	99.9	2.78
279.4	2.33	0.333	99.9	2.78
186.1	3.48	0.363	85.5	2.95
186.1	3.48	0.363	85.5	2.95
186.1	3.48	0.363	85.5	2.95
186.1	3.48	0.363	85.5	2.95
195.2	3.48	0.388	91.7	2.81
195.2	3.48	0.388	91.7	2.81
194.4	2.98	0.389	92.2	2.42
194.4	2.98	0.389	92.2	2.42
195.2	2.98	0.391	92.7	2.41
193.3	2.33	0.391	92.7	1.90
193.3	2.33	0.391	92.7	1.90
194.5	2.33	0.394	93.4	1.89
229.9	3.48	0.439	102.6	3.29
229.9	3.48	0.439	102.6	3.29
229.9	3.48	0.439	102.6	3.29
229.3	2.98	0.444	104.4	2.83
229.3	2.98	0.444	104.4	2.83
229.3	2.98	0.444	104.4	2.83
229.3	2.98	0.444	104.4	2.83
228.5	2.33	0.451	106.5	2.22
228.5	2.33	0.451	106.5	2.22
228.5	2.33	0.451	106.5	2.22
279.8	2.98	0.482	106.0	3.55
279.8	2.98	0.495	107.1	3.55
279.4	2.33	0.508	116.0	2.78
279.4	2.33	0.508	116.0	2.78
279.4	2.33	0.508	116.0	2.78
334.5	2.33	0.427	67.2	3.52

C3 Farra

Linear Method sr = 2Ls				
*L _s (mm)	fct (MPa)	w _{max} (mm)	x _{sc} (mm)	τ _{bs,m} (MPa)
241.1	3.09	0.126	57.3	3.95
241.1	3.09	0.146	65.8	3.95
279.1	4.69	0.088	6.0	5.18
279.1	4.69	0.092	8.3	5.18
278.9	2.47	0.161	84.0	2.73
241.1	3.09	0.175	75.8	3.95
252.8	2.60	0.198	89.1	3.17
263.9	2.13	0.208	101.9	2.49
245.6	2.90	0.216	87.1	3.64
245.6	2.90	0.218	87.6	3.64
255.5	2.98	0.217	87.9	3.60
255.5	2.98	0.217	88.1	3.60
255.5	2.98	0.218	88.2	3.60
252.8	2.60	0.223	94.0	3.17
245.6	2.90	0.221	88.1	3.64
252.8	2.60	0.223	94.1	3.17
250.2	2.68	0.224	93.3	3.30
250.2	2.68	0.224	93.4	3.30
243.9	3.07	0.221	85.6	3.88
250.2	2.68	0.225	93.5	3.30
260.1	2.80	0.222	91.5	3.32
262.1	3.16	0.221	87.4	3.72
243.9	3.07	0.228	87.1	3.88
243.9	3.07	0.228	87.1	3.88
262.1	3.16	0.225	88.3	3.72
262.1	3.16	0.225	88.4	3.72
263.9	2.13	0.238	106.4	2.49
260.1	2.80	0.237	94.5	3.32
260.1	2.80	0.239	94.8	3.32
280.6	2.81	0.238	99.0	3.09
277.8	2.81	0.240	99.2	3.12
277.8	2.81	0.240	99.2	3.12
277.8	2.81	0.240	99.3	3.12
263.9	2.13	0.251	108.0	2.49
276.0	2.64	0.246	102.9	2.95
276.0	2.64	0.246	102.9	2.95
280.6	2.81	0.245	100.3	3.09
276.0	2.64	0.247	103.0	2.95
280.6	2.81	0.249	101.3	3.09
278.9	2.47	0.253	107.1	2.73
278.9	2.47	0.254	107.2	2.73
296.6	2.68	0.287	76.5	4.05
331.4	2.47	0.285	81.3	3.34
285.0	3.09	0.282	66.1	4.85
285.0	3.09	0.286	67.3	4.85
285.0	3.09	0.292	68.7	4.85
310.8	3.16	0.271	58.8	4.55
300.4	2.60	0.305	82.3	3.88
310.8	3.16	0.275	60.0	4.55
296.6	2.68	0.308	81.4	4.05
303.2	2.98	0.293	69.4	4.40
303.2	2.98	0.305	72.5	4.40
327.6	2.64	0.341	90.9	3.61
329.8	2.81	0.332	83.8	3.81
329.8	2.81	0.334	84.1	3.81
296.6	2.68	0.353	90.8	4.05
327.6	2.64	0.344	91.5	3.61

Linear Method sr = 2Ls				
2*L _s (mm)	fct (MPa)	w _{max} (mm)	x _{sc} (mm)	τ _{bs,m} (MPa)
303.2	2.98	0.340	80.8	4.40
327.6	2.64	0.345	91.8	3.61
310.8	3.16	0.330	74.5	4.55
300.4	2.60	0.363	94.2	3.88
300.4	2.60	0.364	94.4	3.88
331.4	2.47	0.360	100.0	3.34
313.4	2.13	0.382	111.2	3.04
313.4	2.13	0.395	113.0	3.04
331.4	2.47	0.384	104.7	3.34
329.8	2.81	0.380	94.5	3.81
291.6	2.90	0.393	91.7	4.45
289.4	3.07	0.394	88.3	4.75
309.5	2.80	0.424	100.0	4.05
291.6	2.90	0.432	97.4	4.45
289.4	3.07	0.429	93.5	4.75
291.6	2.90	0.433	97.5	4.45
289.4	3.07	0.437	94.6	4.75
333.3	2.81	0.445	106.1	3.77
309.5	2.80	0.453	104.0	4.05
333.3	2.81	0.460	108.5	3.77
333.3	2.81	0.491	112.8	3.77
309.5	2.80	0.500	109.7	4.05
335.6	3.07	0.254	6.3	5.78
329.8	3.09	0.317	22.2	5.92
343.9	2.68	0.406	50.2	4.92
343.9	2.68	0.412	51.4	4.92
351.7	2.98	0.357	29.6	5.35
343.9	2.68	0.414	52.0	4.92
335.6	3.07	0.373	33.1	5.78
348.6	2.60	0.429	56.6	4.71
384.6	2.47	0.411	53.8	4.06
351.7	2.98	0.369	32.3	5.35
360.3	3.16	0.330	18.2	5.54
329.8	3.09	0.400	39.5	5.92
360.3	3.16	0.340	20.4	5.54
363.6	2.13	0.491	86.4	3.70
329.8	3.09	0.405	40.6	5.92
351.7	2.98	0.388	36.3	5.35
348.6	2.60	0.452	61.2	4.71
348.6	2.60	0.455	61.8	4.71
380.1	2.64	0.417	49.6	4.39
384.6	2.47	0.450	62.6	4.06
384.6	2.47	0.453	63.3	4.06
363.6	2.13	0.519	91.5	3.70
382.6	2.81	0.409	41.8	4.64
360.3	3.16	0.405	34.1	5.54
335.6	3.07	0.452	48.5	5.78
382.6	2.81	0.439	48.3	4.64
363.6	2.13	0.549	96.6	3.70
382.6	2.81	0.442	49.0	4.64
380.1	2.64	0.478	62.6	4.39
380.1	2.64	0.478	62.6	4.39
386.8	2.81	0.459	51.9	4.59
338.3	2.90	0.541	68.4	5.41
338.3	2.90	0.549	69.7	5.41
338.3	2.90	0.552	70.1	5.41
359.4	2.80	0.560	73.0	4.92
386.8	2.81	0.594	77.2	4.59
359.4	2.80	0.623	82.8	4.92
359.4	2.80	0.628	83.6	4.92

C4 Eligehausen

Linear Method $sr = 2L_s$				
2^*L_s (mm)	fct (MPa)	w_{max} (mm)	x_{sc} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
313.7	2.68	0.434	76.9	3.37
313.7	2.68	0.422	74.8	3.37
313.6	2.51	0.439	82.9	3.15
314.0	2.95	0.362	54.9	3.70
283.9	2.68	0.487	106.7	2.96
284.3	2.95	0.519	105.6	3.25

C5 Gribniak (2018-2020)

2018

Linear Method $sr = 2L_s$				
2^*L_s (mm)	fct (MPa)	w_{max} (mm)	x_{sc} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
277.2	2.80	0.294	68.4	3.56
277.2	2.80	0.294	68.4	3.56
277.2	2.80	0.294	68.4	3.56
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98
277.1	2.79	0.294	68.6	3.55
277.1	2.79	0.294	68.6	3.55
277.1	2.79	0.294	68.6	3.55
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98

2020

Linear Method $sr = 2L_s$				
2^*L_s (mm)	fct (MPa)	w_{max} (mm)	x_{sc} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
277.2	2.80	0.293	68.3	3.56
277.2	2.80	0.293	68.3	3.56
277.2	2.80	0.293	68.3	3.56
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98
277.1	2.79	0.294	68.6	3.55
277.1	2.79	0.294	68.6	3.55
277.1	2.79	0.294	68.6	3.55
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98
281.8	3.18	0.264	51.5	3.98

C6 Tan

Linear Method $sr = 2L_s$				
$2*L_s$ (mm)	fct (MPa)	w_{max} (mm)	x_{sc} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
340.7	2.86	0.267	63.8	5.26
317.4	3.76	0.149	61.6	4.52
373.3	3.33	0.303	58.7	5.59
330.1	4.01	0.254	98.8	4.64

C7 Gilbert

Linear Method $sr = 2L_s$				
$2*L_s$ (mm)	fct (MPa)	w_{max} (mm)	x_{sc} (mm)	$\tau_{bs,m}$ (MPa)
236.3	2.15	0.111	64.2	2.24
236.3	2.15	0.254	97.9	2.24
273.3	2.15	0.278	91.6	2.62
242.3	2.04	0.325	106.3	2.08
280.0	2.04	0.399	111.5	2.43
236.3	2.15	0.403	106.4	2.24
273.3	2.15	0.407	108.3	2.62
242.3	2.04	0.416	110.0	2.08
280.0	2.04	0.423	113.4	2.43
236.3	2.15	0.492	108.8	2.24
242.3	2.04	0.507	112.3	2.08
273.3	2.15	0.532	116.2	2.62
280.0	2.04	0.549	120.6	2.43
242.3	2.04	0.598	113.8	2.08

Bibliografia

- [1] “Structural Concrete Textbook on behaviour, design and performance Second edition Volume 2,” 2010.
- [2] Cristian Maldrella, “Metodi per il Calcolo dell’apertura della fessura in elementi in calcestruzzo armato,” 2020.
- [3] O. Terjesen, G. Pinto, T. Kanstad, and R. Tan, “Performance study of crack width calculation methods according to Eurocodes, fib model codes and the modified tension chord model,” *Structural Concrete*, vol. 25, no. 4, pp. 2375–2399, Aug. 2024, doi: 10.1002/suco.202300367.
- [4] J. Vitek, “fib Bulletin 114. Serviceability Limit States of Concrete Structures Background document of fib MC2020,” *fib Bulletins*, vol. 2024-November, no. 114, pp. 1–251, Nov. 2024, doi: 10.35789/fib.bull.0114.
- [5] “0_Pagine da BS EN1992-1-1_2023”.
- [6] B. B. Broms, “Crack width and spacing in reinforced concrete members. ACI Journal,” 1965.
- [7] Y. Goto, “Cracks formed in concrete around deformed tension bars. ACI Journal,” pp. 244–252, 1971.
- [8] A. W. Beeby, “Crack control in reinforced concrete structures. The Structural Engineer,” 2004.
- [9] A. , S. M. Borosnyói, “Crack spacing in reinforced concrete members: influence of bar diameter and cover. Construction and Building Materials,” 2010.
- [10] V. , R. A. Gribniak, “Bond behaviour and crack formation in RC elements. Structural Concrete,” pp. 747–758, 2016.
- [11] R. , P. C. A. García, “Experimental analysis of crack spacing and width in reinforced concrete beams. UPM Reports; fib Bulletin 114,” 2020.
- [12] R. , S. L. Combrinck, “op bar effect and bond quality in RC beams. Materials and Structures,” 2018.
- [13] A. , F. R. , A. G. Castel, “Effect of casting position on bond strength. Cement and Concrete Research,” 2006.
- [14] “3_Linear method_Debernardi-Taliano_AICAP-CTE 2020”.