Analisi di un pavimento industriale con Straus7 ed EasyOver

Di Sciascio Giovanni¹

¹ Ingegnere Strutturista, Sviluppatore software, Libero Professionista, cofondatore della Di Sciascio srl

1 INTRODUZIONE

Il presente articolo intende mettere a confronto le analisi agli elementi finiti lineari e non lineari eseguite su un pavimento industriale con il software Straus7, [6]. Le analisi non lineari sono state eseguite con il modulo "Plate" per strutture in cemento armato presente nel software EasyOver, [7], in grado di descrivere il comportamento non lineare di elementi Shell (lastra-piastra) in calcestruzzo armato tramite il modello a fessure spalmate rotanti, descritto negli articoli [17] e [18] dello scrivente relativamente alle pareti in cemento armato.

Nell'analizzare il pavimento industriale in oggetto verranno evidenziate le principali cause di danneggiamento di una pavimentazione, i criteri di modellazione, le tipologie di analisi, nonché le verifiche agli stati limite. Prima dell'esposizione dei risultati delle analisi non lineari verranno richiamati alcuni fondamenti del modello utilizzato da EasyOver per la descrizione del comportamento delle piastre in un'analisi statica non lineare (analisi Pushover).

Per la modellazione agli elementi finiti è stato adottato il codice di calcolo <u>Straus7</u>, [6], e il software <u>EasyOver</u>, [7], applicativo di Straus7 per le analisi statiche non lineari di edifici in cemento armato e muratura, entrambi distribuiti in Italia dalla <u>HSH</u> srl di Padova.

2 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA

Si tratta di un pavimento di un magazzino di stoccaggio a temperatura ambiente di dimensioni in pianta pari a 125 x 62,5 m². Nella parte inferiore, adiacente alla ribalta (zona del magazzino adibita al carico e allo scarico delle merci), si trovano i nastri trasportatori e la zona uffici, mentre gran parte della rimanente superficie, nello specifico 97 x 45 m², è occupata dalla scaffalatura metallica (fig. 1).

In fig. 2 sono illustrati il modulo della scaffalatura e l'unità di carico con il massimo carico, pari a 1.000 daN. In virtù dei carichi e delle dimensioni in oggetto, il massimo carico statico trasmesso in esercizio dalla piastra di base della scaffalatura sul pavimento industriale risulta pari a 4.950 daN.



Fig. 1 – pianta del magazzino di stoccaggio



Fig. 2 – dettaglio modulo scaffalatura e unità di carico

Il pavimento industriale, in calcestruzzo armato con spessore pari a 200 mm, è posato su un sottofondo sabbioso molto ben costipato. Lo strato di separazione tra il pavimento di calcestruzzo e il supporto (avente la funzione di ridurre l'attrito durante il ritiro o la dilatazione del pavimento) è composto da:

- uno strato di sabbia di circa 5 cm (per migliorare anche il grado di planarità della massicciata);

- teli di tessuto non tessuto;

- un doppio foglio di polietilene (barriera al vapore).

Il calcestruzzo è di classe C28/35, mentre il ferro d'armatura è di classe B450C.

I giunti di contrazione (detti anche giunti di controllo) sono il metodo più largamente diffuso per controllare gli stati fessurativi di una pavimentazione industriale. Quando il calcestruzzo indurisce, infatti, c'è sempre una riduzione di volume che provoca molto spesso la fessurazione del pavimento. Tagliando il pavimento ad intervalli regolari, se ne indebolisce la struttura su punti precisi in modo che le fessurazioni "preferiscano" i percorsi prescelti. I giunti, in pratica, rappresentano una soluzione estetica in quanto le fessurazioni si formano al di sotto del taglio, dando l'impressione di una superficie ordinata e "senza crepe", ma anche una soluzione funzionale, che rende molto più facile sigillare e impermeabilizzare in modo continuo la pavimentazione. Nel caso in esame i giunti di contrazione sono stati eseguiti con passo 417 cm in entrambe le direzioni.

La profondità dei tagli dipende dallo spessore della piastra di calcestruzzo e dalla planarità del sottofondo. In linea generale, la profondità del taglio non deve mai risultare inferiore ad 1/5 dello spessore del pavimento. Nella pavimentazione in esame sono stati eseguiti dei tagli con profondità pari a 5 cm. Poiché tale profondità interferisce con la rete d'armatura estradossale, tali giunti costituiscono anche zone di discontinuità flessionale (fig. 3).



Fig. 3 – dettaglio giunti di contrazione

I giunti di costruzione sono soluzioni di continuità all'interno delle pavimentazioni in calcestruzzo, che separano porzioni di pavimento realizzate in periodi diversi. Estesi a tutto lo spessore, sono realizzati in maniera tale da trasmettere parte del carico presente su una piastra alla piastra adiacente (vedi ad esempio il dettaglio illustrato in fig. 4). Si cerca in tal modo di ridurre il gradino di deformazione dovuto a un diverso schema di carico delle due piastre, che risulterebbe di ostacolo alla circolazione dei mezzi e oggetto di precoce deterioramento. Nel nostro caso, la pavimentazione industriale è stata realizzata in 6 riquadri, ciascuno con dimensioni pari a 41,7 x 31,25 = 1.303 m².



Fig. 4 – dettaglio giunto di costruzione

3 MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI

La fig. 5 illustra il modello FEM utilizzato per eseguire le analisi lineari. In particolare, la fig. 6 illustra le discontinuità flessionali introdotte tramite opportuni end-release negli elementi Plate della mesh, in corrispondenza dei giunti di contrazione. Inoltre, la stessa fig. 6 illustra le molle alla Winkler, rappresentate da elementi Beam.



Fig. 5 – Modello FEM della pavimentazione industriale





procoatto	7	Valori indicativi delle caratteristiche elastiche dei sottofondi in funzione del tino di terreno
prospeno	1	valori indicativi delle caratteristiche elastiche del sottoronui in funzione del tipo di terreno

Tipo di terreno	k (N/mm³)	E_{g} (N/mm ²)
Terreno di coltura	0,005 - 0,015	14
Riporto recente	0,010 - 0,020	
Sabbia fine o leggermente costipata	0,015 - 0,03	6
Sabbia ben costipata	0,05 - 0,10	12
Sabbia molto ben costipata	0,10 - 0,15	24
Argilla (umida)	0,03 - 0,06	6
Argilla	0,08 - 0,10	12
Argilla mista a sabbia	0,08 - 0,10	12
Ghiaia frantumata e sabbia	0,10 - 0,15	12
Ghiaia frantumata grossolana	0,20 - 0,25	36

prospetto

8 Coefficiente di attrito in funzione delle diverse superfici di contatto

Superfici di contatto	Coefficiente di attrito [µ]
Sabbia pulita e ghiaia	1,6
Emulsione di asfalto	2
Sottofondo granulare	1,3
Terreno plastico (argilla)	1,7
Doppio foglio di polietilene	0.5
Singolo foglio di polietilene	0,7
Strato di sabbia	0,9
Manto di asfalto	3,2
Calcestruzzo	>2,0

Fig. 7 – Costante di sottofondo e coefficiente d'attrito tratti dalla UNI 11146

La fig. 7 illustra i valori della costante di sottofondo e del coefficiente d'attrito adottati nella modellazione: si assumono rispettivamente i valori k = 0,10 N/mm³ e μ = 0,5. Il primo valore è quello corrispondente al sottofondo sabbioso, il secondo al doppio foglio di polietilene interposto tra pavimento e supporto, come detto nel par. 2. L'attrito svolge un ruolo determinante nel contrastare le deformazioni della piastra parallele al suo piano di giacitura (ritiro e variazioni di temperatura uniformi nello spessore, descritte rispettivamente nei parr. 4.1 e 4.2).

La fig. 8 illustra l'elemento Beam di tipo *Normal Contact* utilizzato in Straus7 per simulare il sottofondo alla Winkler con attrito. La rigidezza dell'elemento è pari al prodotto tra la costante di sottofondo k di cui sopra e l'area di incidenza media del singolo elemento Beam. Di fatto, l'elemento reagisce a sola compressione, pertanto le analisi condotte sono lineari per quanto concerne il comportamento del materiale della pavimentazione, ma non lineari per quanto concerne il comportamento degli elementi a supporto della pavimentazione stessa.



Fig. 8 – Modello FEM della pavimentazione industriale

La tab. 1 riporta le armature del pavimento. Nello specifico, si prevede una doppia rete d. 12 passo 200 mm, con ganci d. 10 passo 400 mm (zona blu in fig. 9). Intorno ai pilastri e nel perimetro dei riquadri è prevista una doppia rete d. 12 passo 100 mm, con ganci d. 10 passo 200 mm (zone rosse e gialle in fig. 9).



Fig. 9 – Layout armature pavimento industriale

ARMATURA 1	t [mm]	200				
LAYER 1			LAYER 3		GANCI	
φ1 [mm]	12		φ3 [mm]	12	φw [mm]	10
s1 [mm]	200		s3 [mm]	200	sw1 [mm]	400
c1 [mm]	35		c2 [mm]	35	sw2 [mm]	400
LAYER 2			LAYER 4			
φ2 [mm]	12		φ4 [mm]	12		
s2 [mm]	200		s4 [mm]	200		
ARMATURA 2	t [mm]	200				
LAYER 1			LAYER 3		GANCI	
φ1 [mm]	12		φ3 [mm]	12	φw [mm]	10
s1 [mm]	100		s3 [mm]	100	sw1 [mm]	200
c1 [mm]	35		c2 [mm]	35	sw2 [mm]	200
LAYER 2			LAYER 4			
φ2 [mm]	12		φ4 [mm]	12		
s2 [mm]	100		s4 [mm]	100		
ARMATURA 3	t [mm]	200				
LAYER 1			LAYER 3		GANCI	
φ1 [mm]	12		φ3 [mm]	12	φw [mm]	10

s1 [mm]	100	s3 [mm]	100	sw1 [mm]	200
c1 [mm]	35	c2 [mm]	35	sw2 [mm]	200
LAYER 2		LAYER 4			
φ2 [mm]	12	φ4 [mm]	12		
s2 [mm]	100	s4 [mm]	100		

Tab. 1

4 AZIONI SULLA PAVIMENTAZIONE

Oltre alle azioni permanenti e variabili, che sono distribuite e concentrate, vanno considerate le cosiddette azioni indirette, le quali sono determinanti nella progettazione e nella verifica delle pavimentazioni. Le più significative sono:

- Ritiro del calcestruzzo;

- Variazioni termiche naturali o indotte dall'utilizzo della pavimentazione (es. magazzini frigoriferi, forni per trattamenti termici, serpentine per il riscaldamento invernale, ecc.);

- Azioni ambientali.

4.1 Ritiro del calcestruzzo

Per quanto concerne il ritiro, per effetto dell'esposizione agli ambienti insaturi di vapore, il calcestruzzo subisce nel tempo, in assenza di carichi, una contrazione di volume, che in parte viene impedita dalla presenza di vincoli e dalla forza di attrito generata dallo scorrimento tra il pavimento di calcestruzzo e il supporto. Come vedremo anche nei paragrafi successivi, questo impedimento genera la nascita di stati tensionali che risultano superiori alla resistenza a trazione del calcestruzzo, di per sé modesta, promuovendo la nascita di quadri fessurativi che possono compromettere la durabilità, la funzionalità e l'estetica delle pavimentazioni.

La contrazione di volume del calcestruzzo è ascrivibile all'evaporazione dell'acqua presente nella matrice cementizia verso l'ambiente esterno: non è tanto la perdita di acqua libera presente nei pori a determinare il ritiro idraulico, quanto quella dell'acqua adsorbita e interstratica. Ad essere responsabile della contrazione dimensionale è esclusivamente la pasta di cemento; gli aggregati non sono invece interessati dal fenomeno, ma, al contrario, tendono ad opporsi alla diminuzione di volume della matrice cementizia. Il fenomeno può essere contrastato con l'utilizzo di un basso rapporto acqua/cemento, con agenti antiritiro SRA (Shrinkage Reducing Admixtures) o con microfibre.

In riferimento al par. 11.2.10.6 delle Norme NTC 2018, [1], quando non si ricorra ad additivi speciali, la deformazione totale da ritiro si può esprimere come:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad 1$$

dove ε_{cs} è la deformazione totale per ritiro, ε_{cd} è la deformazione per ritiro da essiccamento, ε_{ca} è la deformazione per ritiro autogeno.

Il valore medio a tempo infinito della deformazione per ritiro da essiccamento $\epsilon_{cd,\infty}$ è calcolato mediante la relazione:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \cdot \varepsilon_{c0} \quad 2)$$

dove k_h è un coefficiente dipendente dal parametro h_0 , a sua volta pari a $2A_c/u$, con:

A_c area della sezione trasversale di calcestruzzo

u perimetro della sezione trasversale del calcestruzzo esposta all'essiccamento.

Il valore finale della deformazione da ritiro da essiccamento $\varepsilon_{cd,0}$ è calcolato mediante la relazione:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad 3)$$

essendo

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad 4)$$

f_{cm} resistenza media del calcestruzzo (MPa)

f_{cm0} 10 MPa

RH umidità relativa (%)

RH₀ 100%

```
\alpha_{ds1} = \begin{cases} 3 & per \ cemento \ di \ classe \ S \\ 4 & per \ cemento \ di \ classe \ N \\ 6 & per \ cemento \ di \ classe \ R \end{cases} \qquad \alpha_{ds2} = \begin{cases} 0,13 & per \ cemento \ di \ classe \ S \\ 0,12 & per \ cemento \ di \ classe \ N \\ 0,11 & per \ cemento \ di \ classe \ R \end{cases}
```

Il ritiro autogeno è causato dall'idratazione del cemento. Infatti, benché i prodotti di idratazione occupino un volume maggiore rispetto a quello occupato dai reagenti costituiti dall'acqua e dal cemento anidro, il processo di idratazione porta alla formazione di pori capillari. Per ritiro autogeno si intende quindi quel ritiro che si ha, senza variazioni igrometriche o termiche, per un passaggio di acqua dai pori più grandi a quelli più piccoli. I pori più grandi tendono quindi a contrarsi.

Tale contrazione dipende principalmente dal tenore di cemento utilizzato per confezionare la miscela. Il ritiro autogeno si manifesta principalmente quando il calcestruzzo è plastico-deformabile e cioè nel periodo tra inizio e fine della presa. L'ulteriore idratazione del cemento durante l'indurimento determina una contrazione trascurabile mentre causa un aumento della porosità capillare interna.

Il valore medio a tempo infinito della deformazione per ritiro autogeno $\epsilon_{ca,\infty}$ può essere valutato mediante l'espressione:

$$\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$
 5)

La tab. 2 illustra i calcoli del ritiro da essiccamento, del ritiro autogeno e del ritiro totale. Si nota come il ritiro autogeno è di molto inferiore a quello da essiccamento.

RITIRO	
A _c (mm²)	12.500.000
u (mm)	62.500
h₀ (mm)	400
α _{ds1}	4
α _{ds2}	0,12
RH (%)	70
f _{ck} (MPa)	28
f _{cm} (MPa)	36
f _{cm0} (MPa)	10
βrн	1,018
Ecd,0	12.500.000 62.500 400 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40
k _h	0,725
Ecd,inf	0,000269
Eca,inf	0,000045
Ecs	0,000314
	Tab. 2

4.2 Variazioni termiche

Con riferimento alla normativa vigente, le variazioni di temperatura uniformi (variazioni termiche stagionali) per strutture in c.a. e c.a.p. da assumersi alla base del calcolo sono:

 $\Delta T = \pm 15$ °C per le strutture esposte;

 $\Delta T = \pm 10$ °C per le strutture non esposte.

Tali variazioni di temperatura uniformi nello spessore della pavimentazione comportano dilatazioni e contrazioni uniformi della piastra di calcestruzzo, impedite in maggiore o minore misura dall'attrito col supporto. Mentre nel primo caso le dilatazioni impedite generano compressioni (nel caso delle pavimentazioni generalmente di entità non significativa), nel caso di contrazioni impedite possono sorgere sollecitazioni di trazione della stessa natura di quelle indotte dal ritiro. Nel caso in esame, essendo la struttura non esposta, si ha $\Delta T = \pm 10$ °C.

Le temperature variabili nello spessore della lastra (gradiente $T_s - T_i$, vedi fig. 10) sono variazioni termiche diurne, che interessano lo spessore della lastra in modo alternato e differenziato (notte-giorno): sono

causate da variazioni della temperatura dell'aria ambientale e inducono significative sollecitazioni negli angoli, lungo i bordi ed al centro della piastra, a seconda del segno del gradiente.



Fig. 10 – Distribuzione di temperatura variabile linearmente attraverso lo spessore della lastra

A causa dell'inerzia termica del calcestruzzo, il riscaldamento e il raffreddamento della piastra sono molto più lenti di quelli dell'ambiente circostante. Pertanto, a meno di una più accurata determinazione, per le verifiche delle tensioni dovute ai gradienti termici si possono assumere i valori cautelativi indicati nella tab. 3.

Gradienti di temperatura nello spessore h della la	Gradienti di temperatura nello spessore h della lastra di pavimento ($10 < h < 25$ cm)				
Ambiente	<i>Τ</i> _s - <i>Τ</i> _i °C				
interno	±5				
esterno	+0,8 · h -0,2 · h				



Nel caso in esame, essendo la struttura interna, si ha T_s - T_i = ±5 °C.

4.3 Azioni ambientali

Tra le azioni ambientali che potrebbero influenzare la progettazione di una pavimentazione si dovranno considerare quelle che possono indurre il degrado dei materiali. A tal proposito, nella progettazione si dovrà fare riferimento alle classi di esposizione previste dalla norma UNI EN 206. La classe di esposizione potrà influenzare anche la scelta della tipologia di strato di finitura e trattamento superficiale. Nel nostro caso, trattandosi di un ambiente con umidità moderata, la classe di esposizione è la XC3.

4.4 Azione sismica

Per la pavimentazione in esame si hanno i seguenti parametri sismici:

a_g 0,070 g

F0 2,578

Tc* 0,282 s

Categoria di sottosuolo: C

A seguito delle verifiche sulla scaffalatura esistente, emergono le azioni sismiche sulla pavimentazione riportate in fig. 11, in conseguenza delle quali il massimo carico esercitato dalla piastra di base della scaffalatura sul pavimento industriale in condizioni sismiche risulta pari a 6.600 daN



Fig. 11 – Azioni sismiche sulla pavimentazione industriale

4.5 Combinazioni delle azioni

Nella progettazione delle pavimentazioni di calcestruzzo riveste particolare importanza la verifica allo Stato Limite di Esercizio ed in particolare allo stato limite di formazione delle fessure. Come ben noto, in base alle NTC 2018, [1], le combinazioni delle azioni da considerare per la verifica allo stato limite di esercizio sono le combinazioni caratteristiche, frequenti e quasi permanenti.

-	Combinazione caratteristica:	$F_d = G_{k1} + G_{k2} + Q_{k1} + \sum_{i=2}^N \psi_{0i} Q_{ki}$	6)
---	------------------------------	--	----

$$F_{d} = G_{k1} + G_{k2} + Q_{k1} + \sum_{i=2}^{i} \psi_{0i} Q_{ki} \quad 6)$$

$$F_{d} = G_{k1} + G_{k2} + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{i=2}^{N} \psi_{2i} Q_{ki} \quad 7)$$

$$F_{d} = G_{k1} + G_{k2} + \sum_{i=1}^{N} \psi_{2i} Q_{ki} \quad 8)$$

- Combinazione quasi permanente:

dove:

G_{1k} = valore caratteristico delle azioni permanenti strutturali;

G_{2k} = valore caratteristico delle azioni permanenti non strutturali;

Q_{k1} = valore caratteristico dell'azione variabile dominante;

Q_{ki} = valore caratteristico delle altre azioni variabili;

 Ψ_{ij} = coefficienti di combinazione.

La pavimentazione dovrà essere verificata anche nei riguardi degli Stati Limite Ultimi (ed anche nei riguardi dei meccanismi di collasso locali), mediante la combinazione fondamentale:

$$F_{d} = \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \sum_{i=2}^{N}\gamma_{Qi}\psi_{0i}Q_{ki} \quad 9)$$

dove:

 γ_{Gi} = coefficienti parziali per le azioni permanenti;

 γ_{Q_i} = coefficienti parziali per le azioni variabili.

Nel caso di azioni sismiche trasmesse alla pavimentazione, questa dovrà essere verificata anche nei riguardi dello Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) mediante la combinazione sismica:

$$F_d = E + G_{k1} + G_{k2} + \sum_{i=2}^N \psi_{2i} Q_{ki} \quad 10)$$

L'azione da ritiro calcolata al par. 4.1 verrà indicata nei paragrafi successivi con R. Per essa si assume un coefficiente parziale per la verifica allo SLU γ_R = 1,2, mentre per le verifiche agli stati limite di esercizio il coefficiente parziale assunto risulta unitario.

La variazione termica uniforme (stagionale) e il gradiente termico giornaliero calcolati al par. 4.2 verranno di seguito indicati rispettivamente con T_{stag} e T_g . Queste sono considerate azioni variabili, pertanto per la verifica allo SLU si assume γ_Q = 1,5. Inoltre, in accordo alla tab. 2.5.1 delle NTC 2018, [1], i valori dei coefficienti di combinazione ψ_0 , ψ_1 e ψ_2 risultano pari rispettivamente a 0,6, 0,5 e 0.

5 VERIFICHE AGLI STATI LIMITE E FESSURAZIONE DEL CALCESTRUZZO

Come già detto nel paragrafo precedente, le verifiche devono essere condotte soprattutto nei confronti dello Stato Limite di Esercizio (SLE), senza però trascurare lo Stato Limite Ultimo (SLU). In condizioni di esercizio rivestono particolare importanza lo stato limite di formazione delle fessure e quello di deformazione in quanto un'eccessiva deformazione potrebbe creare problemi, ad esempio alle scaffalature, al transito dei mezzi e, in generale, alla funzionalità della stessa pavimentazione.

La verifica agli stati limite ultimi delle pavimentazioni con armatura tradizionale si basa sulle usuali regole per le strutture in calcestruzzo armato.

Per quanto concerne le verifiche a flessione, in generale negli elementi Plate-Shell si ha un campo di sollecitazioni definito dalla terna (M_{xx}, M_{yy}, M_{xy}), espressa nel sistema di riferimento locale dell'elemento

Plate, vedi fig. 12. In altri termini in generale i momenti principali M₁₁ e M₂₂ non sono allineati con gli assi locali del generico elemento Plate.



Strand7 Plate Convention

Fig. 12 – campo di sollecitazioni flettenti definito nel sistema di riferimento locale dell'elemento Plate

Sia nel modulo *Plate RC* di Straus7, [6], che in EasyOver, [7], è possibile definire fino a 4 layer di armatura, che ad esempio per una configurazione di armatura simmetrica sono definiti come segue (fig. 13):

- lo strato 1 corrisponde allo strato esterno, più vicino alla superficie locale -z dell'elemento Plate
- lo strato 2 corrisponde allo strato interno, più vicino alla superficie locale -z dell'elemento Plate
- lo strato 3 corrisponde allo strato esterno, più vicino alla superficie locale +z dell'elemento Plate
- lo strato 4 corrisponde allo strato interno, più vicino alla superficie locale +z dell'elemento Plate



Fig. 13 – Layer di armatura definibili nel modulo PLATE RC di Straus7 e in EasyOver

Le equazioni di Wood-Armer consentono di calcolare i valori dei momenti da utilizzare per il progetto e la verifica delle armature dell'elemento Plate nei casi in cui le direzioni delle armature non sono allineate a quelle dei momenti principali:

$$M_x^* = M_{xx} + sgn(M_{xx}) \cdot |M_{xy}|$$

$$M_y^* = M_{yy} + sgn(M_{yy}) \cdot |M_{xy}|$$
11)

Anche se il termine "Forze di Wood-Armer" non compare in letteratura, Straus7 applica alle forze membranali definite nel riferimento locale del Plate la stessa trasformazione applicata ai momenti, vedi fig. 14.



Fig. 14 – campo di sollecitazioni membranali definito nel sistema di riferimento locale dell'elemento Plate

Per quanto riguarda gli stati limite di esercizio, vanno condotte nello specifico le seguenti verifiche:

- verifiche di deformabilità;
- verifiche di fessurazione;
- verifiche delle tensioni di esercizio.

Nelle verifiche di deformabilità si controlla che l'abbassamento massimo presente nella pavimentazione, in presenza delle azioni di esercizio, non sia tale da pregiudicare la corretta funzionalità dell'opera.

Per comprendere a pieno in che modo avviene la fessurazione, è utile seguire il comportamento di una trave al crescere dei carichi, fissando particolare attenzione ad un'asta soggetta a trazione (fig. 15).

Per bassi valori del carico si può ipotizzare una perfetta aderenza tra calcestruzzo e acciaio. In questa fase tutti i punti della sezione sono soggetti alla medesima deformazione ed il calcolo delle tensioni si svolge in base alle ipotesi del primo stadio di comportamento del conglomerato cementizio armato (sezione interamente reagente a trazione). La prima fessura si forma allorché la tensione di trazione nel calcestruzzo eguaglia la sua resistenza a trazione. Lo sforzo normale corrispondente alla fessurazione si definisce sforzo normale di fessurazione.

Nella realtà, stante la disuniformità delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo nell'ambito dell'elemento considerato, la prima fessura ha luogo nella sezione con resistenza minima. Nelle sezioni fessurate il carico è assorbito interamente dalle armature.

Lo stato tensionale in tali sezioni può essere calcolato sulla base delle ipotesi proprie del secondo stadio di comportamento del conglomerato cementizio armato (calcestruzzo non reagente a trazione).



Fig. 15 – fessurazione di un'asta soggetta a trazione

Man mano che ci si allontana dalla sezione fessurata, l'azione assiale di trazione nell'armatura diminuisce a causa dello sviluppo delle tensioni di aderenza tra acciaio e calcestruzzo. Per l'equilibrio alla traslazione lungo l'asse dell'elemento, la diminuzione dello sforzo di trazione nell'armatura deve essere accompagnata dallo sviluppo di tensioni di trazione nel calcestruzzo.

La distanza, calcolata a partire dalla sezione fessurata, alla quale corrisponde nel calcestruzzo una tensione costante pari alla resistenza a trazione del calcestruzzo, viene definita lunghezza di trasmissione ed indicata con il termine I_r . La distanza s tra due fessure successive è sempre compresa tra I_r e $2I_r$.

La lunghezza di trasmissione può essere calcolata imponendo il bilancio tra la risultante delle tensioni normali del calcestruzzo in corrispondenza dell'attingimento del valore resistente a trazione e le tensioni di aderenza che inducono tale stato di tensioni normali. La diffusione delle tensioni nel calcestruzzo non è in realtà uniforme, ma possiamo per semplicità ritenere che il fenomeno sia circoscritto ad un'area di calcestruzzo efficace, A_{c,eff}, da definire opportunamente.

Pertanto, considerando le tensioni di trazione del calcestruzzo costanti all'interno dell'area A_{c,eff} ed esprimendo la forza di aderenza sviluppata nella lunghezza di trasmissione in funzione del valore medio

delle tensioni di aderenza f_{bk}, tramite semplici passaggi si ottiene il seguente valore per la lunghezza di trasmissione l_r:

$$l_r = \frac{1}{4} \cdot k \cdot \frac{\phi}{\rho_{eff}} \quad 12)$$

dove:

 ρ_{eff} = A_s/A_{c,eff} è la percentuale d'armatura efficace ai fini dell'aderenza

 $k = f_{ctk}/f_{bk}$

L'esperienza ha tuttavia dimostrato che il meccanismo di trasmissione per aderenza non riflette che una parte della realtà; pertanto, come vedremo in seguito, tutte le formulazioni proposte per il calcolo della lunghezza di trasmissione sono del tipo:

$$l_r = k_1 \cdot c + k_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_{eff}} \quad 13)$$

Nell'espressione 13) sono presenti sia un meccanismo di diffusione delle tensioni all'interno del calcestruzzo, senza che si produca scorrimento relativo tra calcestruzzo e armatura (primo termine), che un meccanismo di trasmissione per aderenza (secondo termine).

Sotto uno sforzo assiale praticamente costante si formeranno via via altre fessure (fig. 16).

Stabilizzatesi le fessure, lungo l'asse dell'elemento coesistono:

- sezioni fessurate in cui gran parte dello sforzo di trazione necessario all'equilibrio è portato dall'armatura;
- sezioni in cui il comportamento è assimilabile a quello di sezione interamente reagente.

Pertanto, l'analisi dello stato deformativo del concio compreso tra due fessure consecutive non può prescindere dalla considerazione che il calcestruzzo abbia resistenza a trazione.



Fig. 16 – formazione progressiva delle fessure

In particolare, si osserva che, a fessurazione avvenuta, la deformazione media della barra (ϵ_{sm}) non coincide con quella della barra nuda, grazie proprio all'effetto irrigidente del calcestruzzo teso compreso tra due fessure consecutive. Infatti, si ha appunto che le tensioni nel calcestruzzo variano tra 0 ed f_{ct}, e parallelamente la tensione dell'armatura, massima nelle sezioni fessurate, si riduce nella parte interna del concio perché il calcestruzzo assorbe parte della forza di trazione (fig. 17). Tale effetto prende il nome di *Tension stiffening*.



Fig. 17 – fenomeno del tension stiffening

In riferimento alle verifiche di fessurazione, il calcolo dell'ampiezza delle fessure viene eseguito in ottemperanza a quanto riportato nel par. C4.1.2.2.4.5 della Circolare esplicativa delle NTC2018, [2]. Di seguito si richiamano le principali formule di verifica.

L'ampiezza caratteristica di verifica wk delle fessure può essere calcolata con la seguente espressione:

$$w_k = 1,7 \cdot \varepsilon_{sm} \cdot \Delta_{sm}$$
 14)

dove

 ϵ_{sm} è la deformazione unitaria media delle barre d'armatura;

 Δ_{sm} è la distanza media fra le fessure.

La deformazione unitaria media delle barre ε_{sm} può essere calcolata con l'espressione:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{eff}} \cdot \left(1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff}\right)}{E_s} \ge 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad 15)$$

in cui:

 $\sigma_{\!s}$ è la tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata;

 α_e è il rapporto fra i moduli elastici E_s e E_{cm} del ferro d'armatura e del calcestruzzo;

Ac,eff è l'area efficace del calcestruzzo teso attorno all'armatura;

 ρ_{eff} è pari al rapporto fra l'area As del ferro d'armatura teso e l'area efficace A_{c,eff};

 k_t è un fattore dipendente dalla durata del carico e vale 0,6 per carichi di breve durata e 0,4 per carichi di lunga durata.

Nei casi in cui l'armatura sia disposta con una spaziatura non superiore a 5(c+ $\phi/2$), la distanza media fra le fessure Δ_{sm} può essere valutata con l'espressione:

$$\Delta_{sm} = \left(k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{eff}}\right) / 1,7 \quad 16)$$

in cui:

 ϕ è il diametro delle barre;

c è il ricoprimento delle barre d'armatura;

 k_1 è pari a 0,8 per le barre ad aderenza migliorata, 1,6 per barre lisce;

$$k_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2 \cdot \varepsilon_1}$$

in cui ε_1 e ε_2 sono rispettivamente la più grande e la più piccola deformazione di trazione alle estremità della sezione considerata, calcolate considerando la sezione fessurata;

k₃ = 3,4

k₄ = 0,425

La formulazione 16) è ripresa dall'Eurocodice EC2 e, come già detto, riprende la relazione 13), con un primo termine costante ed un secondo termine legato al meccanismo di trasmissione per aderenza.

Si sottolinea che:

- il termine a numeratore della 16) rappresenta la distanza Δ_{smax} tra le fessure, la quale, divisa per il fattore 1,7, fornisce la distanza media Δ_{sm} tra le fessure;
- il prodotto $\varepsilon_{sm} \cdot \Delta_{sm}$ fornisce l'ampiezza media w_m di apertura delle fessure, la quale, moltiplicata per il fattore 1,7, fornisce l'ampiezza caratteristica w_k di apertura delle fessure, che rappresenta il valore utilizzato nelle verifiche di fessurazione.

La tab. 4, ripresa dalla tav. 4.1.IV delle NTC 2018, [1], riporta i valori limite delle aperture delle fessure, in funzione delle condizioni ambientali e della combinazione delle azioni. I valori w_1 , w_2 e w_3 sono rispettivamente pari a 0,2, 0,3 e 0,4 mm. Nel nostro caso abbiamo a che fare con condizioni ambientali ordinarie e con armatura poco sensibile, trattandosi di acciai ordinari e non di acciai da precompresso.

pi Ize	Condizioni	Combinazione di		Arma	tura	
up di gen	ambientali	azioni	Sensibile		Poco sensibile	
Gı Esi			Stato limite	w _k	Stato limite	w _k
^	Ordinaria	frequente	apertura fessure	$\leq w_2$	apertura fessure	$\leq w_3$
A	Ordinarie	quasi permanente	apertura fessure	$\leq w_1$	apertura fessure	$\leq w_2$
P	R Accreación frequente		apertura fessure	$\leq w_1$	apertura fessure	$\leq w_2$
D	Aggressive	quasi permanente	decompressione	-	apertura fessure	$\leq w_1$
Molto		frequente	formazione fessure	-	apertura fessure	$\leq w_1$
C	aggressive	quasi permanente	decompressione	-	apertura fessure	$\leq w_1$

Tab. 4.1.IV - Criteri di scelta dello stato limite di fessurazione

Tab.	4
------	---

Per quanto concerne la limitazione delle tensioni in esercizio, si deve verificare che la massima tensione del calcestruzzo $\sigma_{c,max}$ rispetti le seguenti limitazioni:

$$\sigma_{c,max} \leq 0.60 \cdot f_{ck}$$
 per combinazione caratteristica 17)
 $\sigma_{c,max} \leq 0.45 \cdot f_{ck}$ per combinazione quasi permanente 18)

Infine, la tensione massima, $\sigma_{s,max}$, per effetto delle azioni dovute alla combinazione caratteristica, deve rispettare la limitazione seguente:

$$\sigma_{s,max} \leq 0.8 \cdot f_{yk}$$
 per combinazione caratteristica 19)

Fatte tutte queste premesse, nel paragrafo successivo si riportano i risultati delle analisi lineari relative alle combinazioni di carico più significative. Si ricorda che il termine lineare fa riferimento al comportamento del materiale della pavimentazione industriale: infatti le molle a supporto della pavimentazione hanno comportamento non lineare e reagiscono a sola compressione.

Infine, dopo una breve descrizione del modello a fessure spalmate rotanti per elementi Shell presente in EasyOver, [7], eseguita nel par. 7, il par. 8 presenterà i risultati delle analisi con comportamento completamente non lineare (materiale della pavimentazione e molle a supporto della stessa).

6 RISULTATI DELLE ANALISI LINEARI

Nelle immagini seguenti vengono illustrati i risultati delle analisi eseguite considerando il materiale della pavimentazione come elastico lineare. Sono stati elaborati i risultati delle analisi e sono state eseguite le verifiche agli stati limite ultimi e di esercizio tramite un post-processore in grado di dialogare con il software Straus7 tramite il modulo API. Il post-processore è in grado di generare anche le mappe (contour) associate a tutte le verifiche. L'unica verifica non presente è quella a punzonamento, che viene riportata di seguito.

Nella pavimentazione considerata, il maggior rischio di punzonamento si verifica in corrispondenza dei supporti delle scaffalature (100 x 100 mm²), soggetti ad un carico massimo allo SLU di 74,25 kN.

Il procedimento per la verifica a punzonamento si basa sul calcolo delle sollecitazioni agenti lungo il perimetro di controllo u₁ e lungo il perimetro della superficie caricata; in particolare è necessario verificare che:

- lungo il perimetro dell'area caricata la massima tensione di taglio-punzonamento non sia superata: $v_{Ed} < v_{Rd,max}$
- l'armatura per il taglio-punzonamento non è necessaria se:
 v_{Ed} < v_{Rd,c}

dove v_{Ed} è lo sforzo di taglio sollecitante di progetto mentre v_{Rd} è la resistenza di progetto a punzonamento. La tab. 5 illustra la verifica a punzonamento nella condizione più svaforevole, rappresentata dal supporto della scaffalatura posto in prossimità del bordo di uno dei 6 riquadri nei quali è stata suddivisa la pavimentazione. In particolare, la verifica lungo il perimetro dell'area caricata è soddisfatta e l'armatura per taglio-punzonamento non risulta necessaria, pertanto la verifica a punzonamento risulta soddisfatta.

R _{ck} 35 MPa		
γc 1,5		
d 153 mm		
A _{s,x} 5,652 mm ²		
A _{s,y} 5,652 mm ²		
σ _{c,x} 0 MPa		
σ _{с,γ} 0 MPa		
coeff. C _{Rd,c} 0,18		
k1 0,1		
A _{sw} 1,76625 mm ² C _{Rd,c}	0,12	
s _R 200 mm k	2	
f _{ywd} 391 Mpa ρ ₁	0	
α 90 ° f _{ck}	29,05	MPa
σ_{cp}	0	MPa
V _{Ed} 7,43E+04 N v _{min}	0,53	MPa
β 1,15		
v _{Rd,c} (1)	0,11	MPa
CASO 2 v _{Rd,c} (2)	0,53	MPa
A 100 mm		
B 100 mm v _{Ed}	0,36	MPa





Tab. 5

La fig. 18 illustra gli spostamenti verticali prodotti dalla combinazione allo SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q. I cedimenti massimi sono dell'ordine del millimetro, mentre i sollevamenti sono pari al massimo a 0,35 mm.

La fig. 19 illustra le contrazioni orizzontali massime, prodotte dalla combinazione allo SLU $1,3G_1+1,5G_2+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R$: in questa combinazione la variazione di temperatura stagionale T_{stag} agisce concordemente con il ritiro R: si hanno contrazioni massime ai bordi dei riquadri dell'ordine dei 17 mm, valore evidentemente troppo elevato, che obbliga al ricorso di additivi speciali, al fine di ottenere un calcestruzzo a ritiro compensato.

La fig. 20 illustra gli spostamenti orizzontali massimi prodotti allo SLU dalla sola variazione di temperatura stagionale T_{stag}. In particolare si ottengono spostamenti massimi ai bordi dei riquadri pari a 5 mm. Tali spostamenti saranno di espansione o di contrazione in base al segno della variazione di temperatura. Nota l'entità di tali spostamenti è possibile dimensionare i giunti tra i vari riquadri e quelli tra la pavimentazione e i pilastri della struttura principale.



Fig. 18 – Mappa degli spostamenti verticali – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q



Fig. 19 – Mappa degli spostamenti orizzontali, contrazione – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R



Fig. 20 – Mappa degli spostamenti orizzontali, allungamento – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q+1,5T_{stag}

Nonostante la necessità di utilizzare un calcestruzzo a ritiro compensato, l'azione del ritiro R verrà comunque presa in considerazione nei paragrafi successivi, soprattutto per l'analisi dei quadri fessurativi prodotti dall'azione dell'attrito tra la pavimentazione e il supporto, il quale tende a contrastare l'azione del ritiro in questione e a generare stati di trazione nella pavimentazione.

La fig. 21 illustra la mappa riepilogativa di tutte le verifiche in termini del rapporto Domanda/Capacità. Tutti gli elementi Plate costituenti il pavimento industriale sono verificati, essendo il valore massimo del rapporto Domanda/Capacità pari a 0,91, valore che risulta minore di 1.

Sono quindi riportate le seguenti verifiche:

- verifiche a flessione dei 4 layer d'armatura, figg. 22, 23, 24 e 25;
- verifiche a taglio nelle due direzioni principali, figg. 26 e 27;
- verifiche di riepilogo degli stati limite di esercizio per i 4 layer d'armatura, figg. 28, 29, 30 e 31;
- mappe tensionali dell'ampiezza caratteristica delle fessure prodotte dalla combinazione di carico frequente $G_1+G_2+Q-0,5T_{stag}+R$ nei 4 layer d'armatura, figg. 32, 33, 34 e 35.

Per l'identificazione dei 4 layer d'armatura, si faccia riferimento alla fig. 13 e si tenga presente che la normale locale z degli elementi Plate della pavimentazione nel modello FEM in oggetto è verticale e rivolta verso l'alto.

Dalle ultime mappe si ricavano valori massimi dell'ampiezza caratteristica delle fessure pari a 0,14 mm (layer d'armatura 2). Una scelta molto importante che il progettista deve attuare quando esegue analisi lineari è rappresentata dalla percentuale di riduzione della rigidezza flessionale e a taglio degli elementi in calcestruzzo non fessurati, al fine di tener conto della riduzione di rigidezza per opera della fessurazione. Al fine di comprendere la sensibilità delle analisi al variare del modulo di Young E del materiale della pavimentazione, sono state eseguite le analisi lineari anche con un valore E del modulo di Young pari al 50% del valore E_{cm} fornito dalla relazione 11.2.5 delle NTC 2018, [1]. Dalle relative figg. 36 e 37 si ottiene, sempre per il layer d'armatura 2, un valore massimo dell'ampiezza caratteristica delle fessure leggermente minore, pari a 0,12 mm. Chiaramente, queste considerazioni non saranno necessarie per le analisi con materiale non lineare, poiché in questo caso la rigidezza secante degli elementi viene calcolata automaticamente da EasyOver (vedi articoli [17] e [18] dello scrivente).



Fig. 21 – Esito verifica pavimento industriale

1,665903				1.1			1.1			-h		
(671999 (671999												
400015		and the	human	The Part	Section 1	wall to the	A DECKE AND A	Destination	Lingal	State of the		
334024			and the second s	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				diama.	SHOW:	CONTRACTOR OF	State of the	STATES.
(9294							Sin III		-	12.00		
openet			strengt filter	1.0	der enter aller	-	and the second			-		and the second second
		100	10.00				-	- 77384				1.1
					And the second second		AND MARKED	The strength second				
			and and a state of the					C. C		STATES.	12 State	Sector Sector
Statement and a second second	1			101	111111		101			1.0		10 20 20 20
		-		life and		ALCONT. F	and the second	Distant.		p anne	D.D.D.	
		-	-					C. Hannes				
								THE R.				
			a second s				200 -	C. C	104 11			C (1H)
	0				distant.			-		dia.	-	4.4
				and the second	-			-		a shields		
		illin -	TE STREET		Corrego Co.		State and	I Street Street	- HERRICAL	Constitute of	and survey of	THE STORE STORE
	and the second second			A DISCOUTE								
		THE REAL										
2	Q.			0	(0.1886)	CONTRACTO	0					

Fig. 22 – Momento flettente layer 1 – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R

776	and the second second second			12.7			THE R. P. LEWIS CO.			THE REAL PROPERTY OF		
1500												
525												
					CONTRACTOR OF				STATEMENT.		(COLUMN)	
817			a Million Mile		CHINESE		and diverse	au Printer		-	-	
521				The second second	in the second state	CONTRACTOR OF	CONTRACTOR OF	I have been a fille	Internet in	The Average of the State	In the second	In the second second
	0"	Containty.		ALC: NO.			10		ALL DE CONTRACTOR	10.000		
979×31. ⁰ (F62)• 0 (100000000000000000000000000000000000					-	-						
		-	-				-				-	-
	and a second second			The state of the s		A service and	in the sector of	1 APRIL 1	The second second			The part of the
	IN ALL	a all a standard and a standard		de seren entre								
3 1 1 1 1 1 1 1 1 1	6			Million II.					ALL ALL			
				1000				and the second				
	1000	C. C		ACCOUNTS OF	-			MALING STREET				
	and the second second	Thursday and	Incontrast and	Contraction of the second second								
	(Berl	- 1		A DESCRIPTION OF THE OWNER OF THE	Telephone In	THE R. LANSING	1	(Collector)	dimension.	I SHOW	In the second se	(
	- 1 11			CITATION CONTRACT	CONTRACTOR OF		The state of the s	Contrast and	I. DIAMONTALIA		In state of the local division of the	and the second sec
And the second s			Provide Links									
	and a subsection of			1000								
				I the second	Contraction of the local division of the loc	COLUMN TWO IS NOT	Construction of the	Constantin and	The submerse of	Constant of the local division of the local	CONTRACTOR OFFICE	And the second s
Second and a few particular second and				THE REAL PROPERTY.								
				THE REAL PROPERTY.								
	(19 <mark>4</mark> 1)				The sector		The second		THE R. LEWIS CO., LANSING MICH.	All of the local division of the local divis	a pinte sente a pr	
					21100000000	CONTRACTOR NO.	and the second second	STREET, STREET		ALC: NOT THE REAL PROPERTY OF		VENINER

Fig. 23 – Momento flettente layer 2 – Comb. SLU 1,3 G_1 +1,5 G_2 +1,5Q-1,5 T_{stag} +1,2R



Fig. 24 – Momento flettente layer 3 – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R

												and a second second
	-					1111111111						10000000
200	9					-						11 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
* PL25	ditter.	a #1	10-0	The second	1.00		A ROUTE	and the	internet in the second	5	d	Billin (Ba)
	100	-			-	-					and the later.	a distante de
									(25)			
3	- 6			0.0	CHILDRENS!	ALC: NO.	all other	a standard	WIII CARACTER STR	MILE COMPANY	penismon	
	entre:	TRAINING BOT		Contract of the local division of the local					Charles and Press			
	Statistics of the second s											
								and a second				
	and the second second	Contraction of the	and the second second	in the second			I Hogener					
	in the second second			Same attac								(distant to
	and the second											100000000
						- de				(Provide)	al the	delle (Bas
				There are a			1966 - 198			10.2181		ALC: NO.
				Sec. 1	(Receiption)	CHARGE ST.				-	(III)	(SING)

Fig. 25 – Momento flettente layer 4 – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R

71931 Ph 3898, Ach 11470] 20142							U.					
35727												
H307				-					-		-	a como c
2876			-							-		
				-		-	1002-00	-	-	-		STATISTICS.
nas nex la ^e (Plis2 <mark>Equation de la</mark>	1916								-			
								10000	-		STATES	
	100 A					-			-	-	Optimp:	
				-			141			i o II	-	
	44				a da data a	10.05		444				
	ani or	and the second										
							and which		aller i Maria			
	- 6 -			18 al.		-	1.0	-		- Case		
	HOR	1981		-181	(100000)		-			-		
				-	A CONTRACTOR		i enter	(Charles)	dian (gene		a serier	
			and feet dailtin	COLUMN STREET		-	-	10201			-	AND TRADE
1	140				(billion)		10 ger	- Catillar	1			a second
							54			10 ¹⁰ 10-		

Fig. 26 – Taglio layer 1-3 – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R

677									(0) (0)			
R11				(*******					(111)			-
*			(8)(8)				100	-	(111)	(); (#)		
na, ben <mark>edanan</mark>					-			-			-	
	(111)	-	(()))))))))))))))))))))))))))))))))))))			-	(100.0)		(111)			
						**						
			-				181			Tatte		
			(*)						-			
		A the set of										
		(tappent)		CLEP:	-				-	-		
						-		-		C.m.	-	
						-	-					
										-		
					-			-	-			
	and the second second				Constant of	Constant In		1776414ml	-		-	(diam'r

Fig. 27 – Taglio layer 2-4 – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R

.

341 (Pe2158, nd 9571) 28 697					Aller		Mit.					
1134 371			Sum?	lon di l								
445				-				4		-		10.000
319	1 (6)			HE officient	10.00	1002	181		(10.0)	15.0	111.00	
104 Pt 29444 A 1000			-						100.00		-	
		ter u		* *								. 🔫
		a the in-	19109		a de la come					(B) (T)	Cine:	11 (C)
4	. (ð:		121021	* * # #			1156.			E 06-1		
			4.09	•				100101		-	44.000	
	and the second second		1.61.66									
			And the second					en in	-			
	4			P. DE						(. 🔫
					i perte i							
					1.		1994					
			(it) and a	Veril Street			t de l	-		e e		
	h. ?		(b-c) the				199 F					

Fig. 28 – Esito verifiche SLE, layer 1

777.50	the second second second						-					
17668												
95287												
\$3107	100	CONTRACTOR OF	COLUMN TWO IS NOT	COMPRESS OF	Sectores 1	Same and	IN THE R. C.	CONTRACTOR OF	(Internet	Contractory.	C. C	CONTRACTOR OF
(1925) (1925)		Contraction of the		The Part of	A PROPERTY OF	Interesting and	The party of the	THE OWNER OF	in the second	I sector to all	Contraction of the	CONTRACTOR OF
8746		CONTRACTOR OF	- CALIFORNIA CONTRACTOR	A REAL PROPERTY.			COLUMN ADDRESS		Internet and the second	(Internet and	and the second second	
4393		ALC: NOT THE OWNER.	Contraction of the					and the second second		CONTRACTOR OF	and the state	
2205	<u>.</u>	APRIL PROPERTY		10 A	The strength	THAT IS NOT		THE REAL PROPERTY.	Manager 1			
1184 30. ⁵ (Pet 190 0), 111 10 10		a distantia		In the second second	I THEFT	ALC: NO.	ATTACK BUT	ALCONTRACT.	all sectors in		- Interneters	
			and the second second			CONTRACTOR OFFICE			A DESCRIPTION OF		and the second second	-
		The state of the s			IL CLASS CONTRACTOR	A BELLEVILLE	APPENDING.	I STREET OF		AND DESCRIPTION OF		
	1000		-		all all the		Contractory	COMPANIE:	(MARKED BARK)	Contractory)	- Animali	Sec. Million
	and the second se	And Address of the owner, where the owne	Constanting Street	Person Property	Contract (Investige		a building of the life	The start of		Protection of	Edit Holester	
2	Ö	PACTO CALE	ALLER AN				0			0		
		Contraction ()		A DESCRIPTION			Littler I.			In the Public		
		Contractor of the second	A STREET							(Contents)		
				and the second states of	the state of the s	Augenter general	And the second	A MARKED AND	ALCONTRACTOR OF		a make the sal	-
										-		
		APRIL OF A	A CONTRACTOR OF	All days in section	City and Designed	A STREET, STRE		Contraction of the second	THE R. LANSING MICH.		a second second	Constant of the second second
	CONTRACTOR OF THE OWNER				a strengt		illine the little	ALL DESCRIPTION OF		100000000		
				terret.	And Address of the Owner, or t	Statutes and states	Contract Office	Barren ungebalt	En the second	ALC: NO. OF THE	Contraction of the local division of the loc	
					Number of Contract	(1121122040)		State Land	These sectors in	(ALLER LAND)		
				And the second		II Internet		1100001011	-			
	1 A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	Contraction of	Contraction of the	and the statement	The second second	all a bener and a b	Martin Statistics	and the strength of the st		The second	the second	
										- Q1		

Fig. 29 – Esito verifiche SLE, layer 2



Fig. 30 – Esito verifiche SLE, layer 3

								and the lot of the lot of the		and the second second	
					Contraction of the local division of the loc						
				Constant of		Concession of the local division of the loca		Street Lines		Constanting of the	a second
						(Internet)					
							-		Carlot Ca	-	
	11	(Indiana)	Same Provide Street				Contraction of the local division of the loc	official periods	(0010107003)	out the second	
-		-	CHINES .								
					5 1 - 6		Part and a state	and the second			
1 2						all and a second					
SHID OF		TRANSFER	THE OWNER OF THE OWNER OF				(TIME)				
						Contraction of the					
					-						
		ele.				1.00			10. 1 11		
					Comp.					C THE C	
	•••••••										

Fig. 31 – Esito verifiche SLE, layer 4

filling and the second s		100 I.				
				100 B		
				1000	() and ()	1.00
ų.			CONTRACT OF	100		
			(11.(11))		÷ +	1
				-	1	- i i i i i i i i i i i i i i i i i i i
_				100.00		
4				The second second		
					N.	
				- 1	4 000	1 1 1 1 1 1
			- 4	1.0		
					(inter-	
1		<u>.</u>		100	- P - 6	
				- 100 (B)		
			an ei	(in e	- 0	
1		 1 - C - C - C - C - C - C - C - C - C -		an a	0	
						12.1
	100 Mar 100	in the second			100	

Fig. 32 – Ampiezza fessure layer 1 – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0,5T_{stag}+R$

() () () () () () () () () ()	L. L			1			1			1		
		-0000		-					-			
			1				-	-		-		Contraction of the second s
		-		-	(8.90)	-		-	-			station -
				-	-	-			-	-	-	
							-		-			
								-				i an
		-		-						0		
	÷.	-		-								
				-	1111000				-	-		
		-	-	-			and the set					TI I THE REAL PROPERTY OF
				(1)								iteraculation and a second
												Transfer of the second
	*											
												and the second se

Fig. 33 – Ampiezza fessure layer 2 – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0,5T_{stag}+R$



Fig. 34 – Ampiezza fessure layer 3 – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0,5T_{stag}+R$

	*							***		-	.
eiz.							and the second second				Constraint of the second
	6		-					(1140)	-	(1111-	(100)
				STREET.	Tinter -		-			Ben	THE R.
- <u>-</u>	ji)ii							STREET IN.	0		
							-				
			(HEHRE)								500
						-	(100)	(1110)			<u> </u>
1				- control					- V		
	i.	-	and the loss			-					
R								-		(III)	(int)

Fig. 35 – Ampiezza fessure layer 4 – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0,5T_{stag}+R$

12561				and the second			HE WEIT			<u>.</u>		
621												
44L					-			-		-		
201.	Suit i	La di se di se				TTTT-	in the				a lazadi	and the second
n												
	ģ.		1000	. 🌅 🗰			10			-0		
:1		a an	8 1110	. <u>(†</u> 1917)	0.000					**		
			Bio Ha is		-		1986	(CHING)				1 (11)
		(Report	-									
			(1111)				-	-	elline dation			-
			e distante								the set	
							(Canada)	Li			The second	ILE
		diam'r.	-									
3	i	and the second	from the	- C	(8793)	-0.020	0.0	000			(in the last	-0.000
					-		- Bit				1000	
				e 💮	-0.000	-		-			(etc.)	-
							-			-	10.00	
	l (j			0			0			0		
Party and a state of the state	and the second state of the		وسيتحص والمتحد المالية					ويتبار سيابا بسيالي الم		and the second second	and the second second	and the second second

Fig. 36 – Ampiezza fessure layer 2 – $E = 0.5E_{cm}$ – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0.5T_{stag}+R$



Fig. 37 – Ampiezza fessure layer 4 – $E = 0.5E_{cm}$ – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0.5T_{stag}+R$

7 MODELLO A FESSURE SPALMATE ROTANTI PER ELEMENTI SHELL IN CALCESTRUZZO ARMATO

Prima di esporre i risultati delle analisi non lineari, nel presente paragrafo si fornisce un breve richiamo del modello messo a disposizione da EasyOver per la descrizione del comportamento non lineare di elementi Shell (lastra-piastra) in calcestruzzo armato. Come già spiegato negli articoli [17] e [18] dello scrivente, il calcestruzzo fessurato è modellato come materiale ortotropo tramite l'approccio delle fessure spalmate rotanti. La relazione costitutiva utilizzata per descrivere il comportamento del calcestruzzo a compressione tiene conto della riduzione di resistenza e rigidezza dovuta alla presenza di fessure trasversali. Il modello utilizzato per la descrizione del calcestruzzo a trazione ha il ramo di softening modificato, per tenere in conto del fenomeno del tension stiffening, il quale, come abbiamo visto nel par. 5, influenza significativamente la risposta del calcestruzzo fessurato.

L'elemento Shell viene suddiviso in un numero di strati, o layer, definito dall'utente (fig. 38), per ognuno dei quali vengono definiti i legami costitutivi già visti negli articoli [17] e [18]. I layer di calcestruzzo fessurato vengono rappresentati come un materiale ortotropo con fessure spalmate rotanti, mentre ciascun layer di armatura viene rappresentato come un materiale ortotropo con rigidezza non nulla esclusivamente nella direzione delle barre dello stesso layer. Vengono quindi ottenute per ciascun layer delle matrici di rigidezza che vengono poi assemblate per formare un materiale elastico anisotropo.



Fig. 38 – Elemento Shell: sistema di riferimento, azioni risultanti e descrizione strati

Il modello valuta sia le tensioni e le deformazioni medie (nella regione compresa tra le fessure) che le tensioni e deformazioni locali di calcestruzzo e armatura nelle fessure (fig. 39), oltre all'apertura e all'orientamento delle fessure stesse durante le varie fasi di carico.



Fig. 39 – Tensioni medie e lungo le fessure nel modello a fessure spalmate rotanti

La deformazione continua è il risultato della cedevolezza meccanica alle sollecitazioni e degli scorrimenti lungo fessure spalmate su una determinata area finita. La componente di scorrimento è il risultato dello scorrimento tra corpi rigidi lungo la fessura. Utilizzando estensimetri di una lunghezza sufficiente per coprire diverse fessure, si potrebbero misurare le deformazioni medie all'interno dell'elemento. Relativamente a un sistema di riferimento locale x,y, le deformazioni misurate conterrebbero intrinsecamente entrambe le componenti della deformazione. Le deformazioni misurate (totali) o "apparenti" saranno indicate come [ε] = [ε_x , ε_y , γ_{xy}].

Disaccoppiando i due effetti delle deformazioni, le deformazioni effettive (nette) nel continuo tra le fessure saranno indicate come [ε_c] = [ε_{cx} , ε_{cy} , γ_{cxy}], mentre le deformazioni dovute agli scorrimenti lungo le fessure saranno indicate con [ε_s] = [ε_{sx} , ε_{sy} , γ_{sxy}]. Pertanto:

$$[\epsilon] = [\epsilon_c] + [\epsilon_s] \quad 20)$$

Sono le deformazioni [ϵ_c] che devono essere impiegate in appropriate relazioni costitutive per determinare le sollecitazioni medie dalle deformazioni medie per il calcestruzzo e per il ferro d'armatura. A tale scopo, si determinano le deformazioni principali dalle deformazioni nette utilizzando le ben note trasformazioni:

$$\epsilon_{c1}, \epsilon_{c2} = \frac{\epsilon_{cx} + \epsilon_{cy}}{2} \pm \sqrt{\left(\epsilon_{cx} - \epsilon_{cy}\right)^2 + \gamma_{cxy}^2} \quad 21)$$

L'inclinazione effettiva delle deformazioni principali nel continuum θ sarà pari a

$$\theta = \frac{1}{2} tan^{-1} \left[\frac{\gamma_{cxy}}{\epsilon_{cx} - \epsilon_{cy}} \right] \quad 22)$$

Il modello a fessure spalmate rotanti ragiona in termini di valori medi di ampiezza delle fessure e spaziatura tra le fessure. L'espressione utilizzata per il calcolo della spaziatura media tra le fessure è quella proposta dal CEB-FIP Model Code 1990:

$$s_m = 2 \cdot \left(c + \frac{s}{10}\right) + k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{d_b}{\rho_{eff}} \quad 23)$$

dove:

c è il ricoprimento delle barre d'armatura;

d_b è il diametro delle barre longitudinali;

s è la distanza massima tra le armature longitudinali (non maggiore di 15 volte il diametro d_b);

 $A_{c,ef}$ è l'area efficace di calcestruzzo teso attorno all'armatura, pari all'area di calcestruzzo attorno alla barra, ad una distanza pari a 7,5 volte il diametro d_b ;

 k_1 è pari a 0,8 per le barre ad aderenza migliorata, 1,6 per barre lisce;

$$k_2 = 0.25 \cdot \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2 \cdot \varepsilon_1}$$

in cui $\varepsilon 1 \in \varepsilon 2$ sono rispettivamente la più grande e la più piccola deformazione di trazione alle estremità della sezione considerata.

Il modello a fessure spalmate rotanti considera fessure con direzioni connesse alla direzione delle tensioni/deformazioni principali; pertanto, calcolate con la relazione 23) le spaziature medie s_{mx} ed s_{my} (nel sistema di riferimento locale x,y dell'elemento Plate, con le armature definite nei layer 1, 2, 3 e 4 come indicato in fig. 13) e nota l'inclinazione θ delle deformazioni principali, la spaziatura media s delle fessure inclinate nel calcestruzzo è definita dalla seguente relazione:

$$s_{m\theta} = \frac{1}{\frac{\sin\theta}{s_{mx}} + \frac{\cos\theta}{s_{my}}} \quad 24)$$

Ignorando la piccola deformazione elastica nel calcestruzzo tra le fessure, possiamo mettere in relazione l'ampiezza della fessura con la deformazione dell'elemento tramite la relazione:

$$w_m = \varepsilon_{c1} \cdot s_m$$
 25)

Si sottolinea che il valore fornito dalla relazione 25) rappresenta l'ampiezza media della fessura; dalla relazione 14) si evince che, volendo confrontare i valori di ampiezza media delle fessure forniti dal modello a fessure spalmate rotanti con i valori caratteristici di ampiezza delle fessure ottenuti dalle analisi lineari, occorre moltiplicare i valori ricavati da EasyOver per il fattore 1,7.

Nel paragrafo successivo verranno esaminati i risultati forniti dalle analisi non lineari eseguite con il modulo *Plate* di EasyOver, [7], nel riquadro centrale in basso della pavimentazione industriale, che dalle analisi lineari è risultato essere quello maggiormente sollecitato. Verranno quindi effettuati i dovuti confronti tra le due analisi eseguite.

8 RISULTATI DELLE ANALISI NON LINEARI

Nelle immagini seguenti vengono illustrati i contour riepilogativi delle analisi non lineari eseguite. In particolare vengono presentate:

- per lo stato limite ultimo le mappe delle tensioni nei vari layer d'armatura, sia le tensioni nelle zone comprese fra le fessure (figg. 40, 41, 42 e 43) che quelle attraverso le fessure (figg. 44, 45, 46 e 47), nonché l'ampiezza media delle fessure (fig. 48);
- per la combinazione rara dello stato limite di esercizio le mappe delle tensioni nei vari layer d'armatura nelle zone comprese fra le fessure (figg. 49, 50, 51 e 52) e l'ampiezza media delle fessure (fig. 53)
- per la combinazione frequente dello stato limite di esercizio le mappe delle tensioni nei vari layer d'armatura nelle zone comprese fra le fessure (figg. 54, 55, 56 e 57) e l'ampiezza media delle fessure (fig. 58).

Dal confronto con i risultati delle analisi lineari, emerge immediatamente come queste ultime siano più cautelative e conducano, quindi, a maggiori costi di esecuzione dell'opera. In particolare, considerando le ampiezze medie delle fessure prodotte dalla combinazione frequente, dai contour si evince che anche in questo caso le fessure sono orientate in maniera tale da sollecitare il layer 2 d'armatura, con valori massimi pari a 0,015 mm. Ricordando quanto detto al par. precedente, se si moltiplica tale valore per 1,7 per passare dalle ampiezze medie alle ampiezze caratteristiche, si ottiene un valore pari a 0,025 mm, che risulta minore dei valori massimi ottenuti con le analisi lineari, variabili da 0,12 mm a 0,14 mm in funzione del modulo di Young adottato.

La tensione massima raggiunta allo SLU dal ferro d'armatura è pari a 239 MPa (tensione attraverso le fessure del layer 2), valore minore della tensione di snervamento.



Fig. 40 – Tensione armatura layer 1 – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R



Fig. 41 – Tensione armatura layer 2 – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R



Fig. 42 – *Tensione armatura layer* 3 – *Comb. SLU* 1,3*G*₁+1,5*G*₂+1,5*Q*-1,5*T*_{stag}+1,2*R*



Fig. 43 – Tensione armatura layer 4 – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R



Fig. 44 – Tensione armatura layer 1 attraverso le fessure – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R



Fig. 45 – Tensione armatura layer 2 attraverso le fessure – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R



Fig. 46 – Tensione armatura layer 3 attraverso le fessure – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R



Fig. 47 – Tensione armatura layer 4 attraverso le fessure – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R



Fig. 48 – Ampiezza media delle fessure – Comb. SLU 1,3G₁+1,5G₂+1,5Q-1,5T_{stag}+1,2R



Fig. 49 – Tensione armatura layer 1 – Comb. Rara $G_1+G_2+Q-T_{stag}+R$



Fig. 50 – Tensione armatura layer 2 – Comb. Rara $G_1+G_2+Q-T_{stag}+R$



Fig. 51 – Tensione armatura layer 3 – Comb. Rara $G_1+G_2+Q-T_{stag}+R$



Fig. 52 – Tensione armatura layer 4 – Comb. Rara $G_1+G_2+Q-T_{stag}+R$

014211					
(012632					
011053					
.009424		and the second s	CONTRACTOR OF STREET,	at the state the	
007895					
004717				and the second se	
.003158					
.001579		CARGE DISTRICT	Contraction in the	and the second	
0 [24:1]		and the second second			
10.0					
				a test de la companya	
		Contraction of the second s			HITP.
1.1					
28					
		Contrast (
	246				
20					
21					
10					
1.2					
63					
0					

Fig. 53 – Ampiezza media delle fessure – Comb. Rara $G_1+G_2+Q-T_{stag}+R$



Fig. 54 – Tensione armatura layer 1 – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0,5T_{stag}+R$



Fig. 55 – Tensione armatura layer 2 – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0,5T_{stag}+R$



Fig. 56 – Tensione armatura layer 3 – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0,5T_{stag}+R$



Fig. 57 – Tensione armatura layer 4 – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0,5T_{stag}+R$



Fig. 58 – Ampiezza media delle fessure – Comb. Frequente $G_1+G_2+Q-0,5T_{stag}+R$

9 OSSERVAZIONI SUI QUADRI FESSURATIVI OTTENUTI CON I DUE APPROCCI

Di seguito si cerca di dare una spiegazione alla differente ampiezza caratteristica delle fessure ottenuta con i due approcci.

La fig. 59 illustra il calcolo corrispondente alla combinazione frequente per il layer 2 di uno degli elementi Plate caratterizzati dal valore massimo dell'ampiezza caratteristica della fessura (w_k = 0,14 mm), ottenuto nell'approccio lineare. Si ottiene una tensoflessione fuori dal nocciolo, con una tensione σ_s del ferro d'armatura pari a 138 MPa, una spaziatura massima tra le fessure Δ_{smax} pari a 355 mm ed una deformazione unitaria media delle barre ε_{sm} pari 0,039%.



Presso/tensoflessione fuori nocciolo

Fig. 59 – Esempio calcolo ampiezza fessura layer 2 nell'approccio lineare

La tab. 6 illustra nel dettaglio il calcolo del termine ε_{sm} . Nello specifico, come è possibile riscontrare nella relazione 15), il calcolo prodotto dal fenomeno del tension stiffening deve essere sempre maggiore del termine $0.6 \cdot \sigma_s/E_s$. In tab. 6 vengono indicati sia i valori dell'ampiezza w_{k1} derivante dal calcolo del tension stiffening, che dell'ampiezza w_{k2} derivante dal valore $0.6 \cdot \sigma_s/E_s = 0.6 \cdot 138/210.000 = 0.039\%$, il quale, moltiplicato per Δ_{smax} = 355 mm, fornisce appunto il valore w_{k2} = 0.14 mm.

Pertanto, è proprio per la presenza di questo limite inferiore che si ottiene $w_k = 0,14$ mm. Infatti, la deformazione unitaria media delle barre ε_{sm} prodotta dal fenomeno del tension stiffening fornirebbe un valore $w_{k1} = 0,04$ mm, in linea con il valore 0,025 mm ottenuto dall'applicazione del modello a fessure spalmate rotanti.

σ_{s} (MPa)	138
k _t	0,40
f _{ck} (MPa)	28
E _s (MPa)	210.000
d _b (mm)	12
h (mm)	200
c (mm)	35
s (mm)	200
ρ_{eff}	0,0104
f _{ctm} (MPa)	2,77
f _{cm} (MPa)	36,0
E _{cm} (MPa)	32.308
α_{e}	6,50
€ _{sm1}	0,00012
0,6*σs/Es	0,00039
k ₁	0,80
k ₂	0,50
k ₃	3,40
k ₄	0,425
$\Delta_{\sf sm}$ (mm)	355
w _{k1} (mm)	0,04
w _{k2} (mm)	0,14
Tab. 6	

10 CONCLUSIONI

Nel presente articolo si sono illustrati i principali aspetti tecnici e di modellazione agli elementi finiti di un pavimento industriale. In merito al legame costitutivo degli elementi finiti della pavimentazione, sono state presentate e confrontate le analisi lineari e non lineari eseguite su una pavimentazione reale. L'analisi dei risultati ha permesso di evidenziare le principali cause di danneggiamento delle pavimentazioni: ritiro idraulico e carichi concentrati.

Sono stati eseguiti gli opportuni richiami teorici e normativi, propedeutici alla comprensione dei differenti approcci alla base delle due tipologie di analisi eseguite.

Nell'esaminare i risultati delle analisi, si è posta particolare attenzione ai quadri fessurativi, evidenziando che le analisi lineari forniscono quadri fessurativi più cautelativi (comportando di conseguenza costi di esecuzione più onerosi) rispetto alle analisi non lineari eseguite con il modello a fessure spalmate rotanti.

11 BIBLIOGRAFIA

[1] D.M. 17/01/2018 – Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" – 2018

[2] Circ. esplicativa NTC 2018 n. 7 del 21/01/2019

[3] EC2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici

[4] UNI 11146:2005 - Pavimenti di calcestruzzo ad uso industriale: criteri per la progettazione, la costruzione ed il collaudo

[5] CNR-DT 211/2014 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Pavimentazioni di Calcestruzzo

[6] Straus7, codice di calcolo agli elementi finiti, sviluppato da <u>Strand7 Pty Ltd.</u> e distribuito in Italia dalla HSH srl di Padova, <u>www.hsh.info</u>

[7] EasyOver, applicativo di Straus7 per le analisi statiche non lineari di edifici in cemento armato e muratura, <u>www.straus7.it/easyover1.htm</u>, sviluppato dalla <u>Di Sciascio srl</u> e distribuito in Italia dalla HSH srl di Padova, <u>www.hsh.info</u>

[8] Nonlinear analysis of reinforced-concrete shells – M. A. Polak, F. J. Vecchio (1993) - J. Struct. Engrg., ASCE 119 (12), 3439-3462

[9] Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation - F. J. Vecchio (2000) - J. Struct. Engrg., ASCE 126 (9), 1070-1077

[10] Le deformazioni lente del conglomerato cementizio e i quadri fessurativi nelle strutture – Prof. Ing. L. Coppola – Università degli studi di Bergamo, Facoltà di Ingegneria

[11] Codice di buona pratica per i pavimenti in calcestruzzo ad uso industriale (2003) – CONPAVIPER

[12] Il cemento armato. Dalle tensioni ammissibili agli stati limite: un approccio unitario – A. Ghersi (2006) – Dario Flaccovio Editore

[13] Straus7 Theoretical Manual. Theoretical background to the Straus7 finite element analysis system - 2004 G+D Computing

[14] ST7-1.57.40.4 - Review of Wood-Armer Moments in the RC module – Strand7 Webnotes – Theory/Results – Strand7 Pty Ltd.

[15] Analisi non lineari con Straus7 ed EasyOver per la valutazione della vulnerabilità sismica di strutture in c.a. – G. Di Sciascio – Ingenio <u>https://www.ingenio-web.it/20290-analisi-non-lineari-con-straus7-ed-easyover-per-la-valutazione-della-vulnerabilita-sismica-di-strutture-in-ca</u>

[16] NTC18 con Straus7 ed EasyOver: cosa cambia nella valutazione della vulnerabilità sismica di strutture in c.a. – G. Di Sciascio – Ingenio <u>https://www.ingenio-web.it/22953-ntc18-con-straus7-ed-easyover-cosa-cambia-nella-valutazione-della-vulnerabilita-sismica-di-strutture-in-ca</u>

[17] Modello a fessure spalmate rotanti per l'analisi dei meccanismi di collasso di pareti in cemento armato con Straus7 ed EasyOver – G. Di Sciascio – Ingenio <u>https://www.ingenio-web.it/26242-meccanismi-di-</u>collasso-di-pareti-in-ca-il-modello-a-fessure-spalmate-rotanti-di-straus7-ed-easyover

[18] Analisi di strutture miste telaio-pareti con Straus7 ed EasyOver: metodi prescrittivo e prestazionale a confronto – G. Di Sciascio – Ingenio <u>https://www.ingenio-web.it/27482-analisi-di-strutture-miste-telaio-pareti-con-straus7-ed-easyover-metodi-prescrittivo-e-prestazionale-a-confronto</u>

[19] Analisi non lineare di strutture in muratura con Straus7 ed EasyOver – G. Di Sciascio – Ingenio <u>https://www.ingenio-web.it/29450-analisi-non-lineare-di-strutture-in-muratura-con-straus7-ed-easyover</u>