

MODELLAZIONE DI PROGETTO DI UN ELEMENTO STRUTTURALE IN C.A.P. DI GEOMETRIA NON REGOLARE

CRISTINA SCIUBBA
Ingegnere Strutturista

LUCA SGAMBI
Dottorando in Ingegneria Strutturale
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

ORIANA OCCHIOLINI
Ingegnere Strutturista
MABO Prefabbricati

FRANCO BONTEMPI
Professore
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

SUMMARY

This paper deals with the analysis of structural behaviour of a prestressed concrete element with a not regular geometry. Many linear and nonlinear models were developed in order to investigate the response of this structure under live and ultimate loads.

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro ha come oggetto lo studio del comportamento strutturale di una trave in calcestruzzo armato precompresso utilizzata per realizzare coperture tipo shed di grandi edifici industriali (Figura 1).

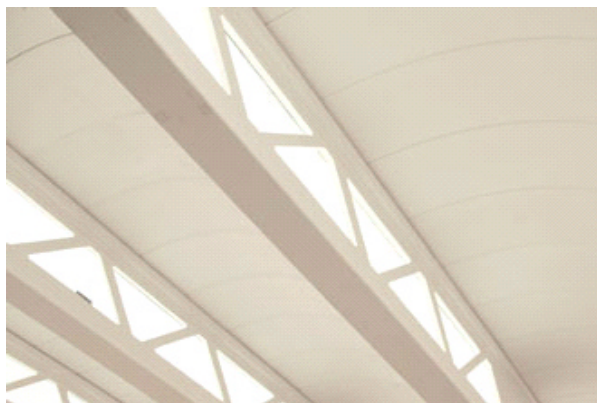


Figura 1. Elemento strutturale esaminato.

I sistemi costruttivi a shed furono appositamente studiati per consentire, con luce incidente indiretta, la migliore illuminazione naturale degli ambienti di lavoro. Sono la geometria della copertura ed il particolare orientamento della costruzione a realizzare una luminosità diffusa evitando, nel contempo, tutti gli inconvenienti che deriverebbero alla vivibilità interna dall'irraggiamento solare diretto. Le finestre sono portate in copertura, i serramenti vengono impostati in posizione quasi verticale e l'edificio viene posizionato in modo che le ampie superfici vetrate risultino orientate a nord-nord est.

A partire dall'ultimo decennio del XIX secolo la tecnica del calcestruzzo armato si affiancò a quella del metallo e, di conseguenza, già nei primi anni del secolo successivo si fece strada l'idea di prefabbricare i componenti strutturali principali. Le odierne soluzioni rappresentano la naturale evoluzione delle idee originali; evoluzione che, a partire dai primi anni del XIX secolo, ha potuto beneficiare proprio dello sviluppo e della diffusione della prefabbricazione.

Il componente principale di questo sistema è un manufatto in calcestruzzo armato precompresso sagomato ed appoggiato, tramite selle laterali di rotazione, su una struttura principale di travi piane. Rilevante importanza riveste il disegno della sezione trasversale (Figura 2): l'estradosso, che funge da canale di sgrondo, deve agevolmente convogliare le acque meteoriche fino alle converse poste ai lati dell'edificio. La presenza e la geometria di nervature strutturali all'intradosso influenzano le modalità di diffusione della luce naturale.

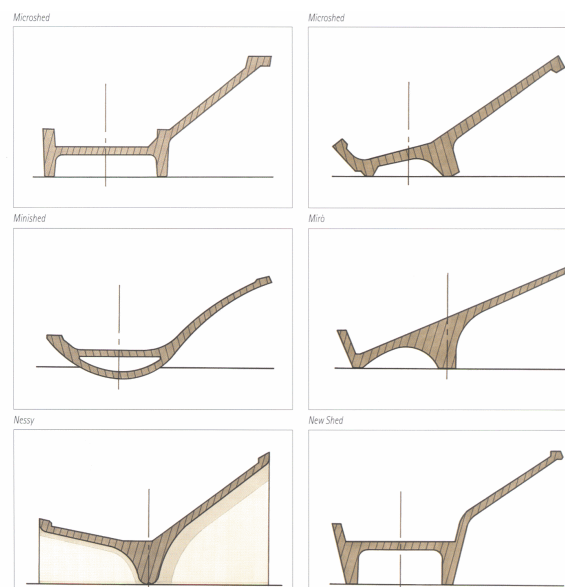


Figura 2. Alcuni esempi di profili.

Il profilo della sezione trasversale, la dimensione e la geometria delle aperture svolgono, invece, un ruolo determinante nel comportamento strutturale e, se ben calibrati, posso conferire *per effetto forma* notevoli prestazioni in termini di resistenza, consentendo l'utilizzo dell'elemento anche per luci notevoli (fino a 25-30 m).

Appare evidente che elementi strutturali di tale geometria non possono essere inquadrati e studiati nell'ambito della teoria classica della trave, alla De Saint Venant. La presenza di ampie aperture, la non simmetria della sezione trasversale e i ridotti spessori del profilo rendono necessarie analisi più approfondite (Sgambi, 2001).

Con lo scopo di descrivere e analizzare il comportamento dell'elemento in esame, il problema strutturale è stato affrontato svolgendo un attento confronto tra differenti criteri di modellazione:

- delle rigidezze
- dei materiali.

2. DESCRIZIONE DELL'ELEMENTO

L'elemento strutturale esaminato è una trave di 12 m in calcestruzzo armato precompresso con sezione a forma di L, di altezza pari a 138 cm, larghezza 60 cm e di spessore variabile da 6 a 12 cm. Le aperture ritagliano nell'anima della trave elementi diagonali inclinati a 45° (Figura 3).

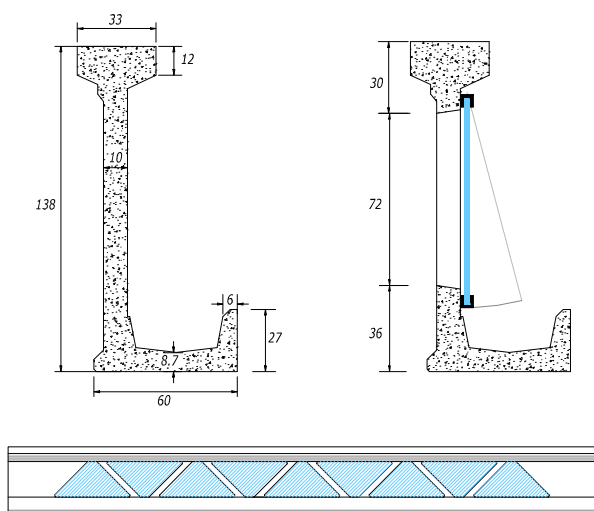


Figura 3. Sezioni e prospetto laterale della trave.

Nella sezione trasversale, si possono distinguere un tratto pieno, in prossimità degli appoggi, ed un tratto forato, in cui la foratura ha una altezza variabile da 0 a 72 cm. La trave può

essere vista come composta da un corrente superiore a T, un corrente inferiore ad L e da un'anima a traliccio. Il calcestruzzo impiegato è di classe C45/55. L'acciaio per armatura lenta è di tipo FeB44K. Il sistema di precompressione della trave è a fili aderenti pre-tesi.

3. MODELLAZIONE DELL'ELEMENTO

Data la simmetria del problema, è stata modellata soltanto metà della trave. La modellazione è stata effettuata utilizzando i seguenti codici di calcolo:

- SAP2000, per l'analisi in campo elastico lineare
- ADINA per l'analisi non lineare.

La reale sezione della trave è stata semplificata nei modelli di calcolo, eliminando smussature e ringrossamenti di piccola entità ed ottenendo, in tal modo, una geometria discretizzabile in una serie di elementi rettangolari. La modellazione della geometria della trave è stata affrontata realizzando 7 modelli, impiegando elementi finiti di diverse formulazioni (Figura 4) (Sciubba, 2004).

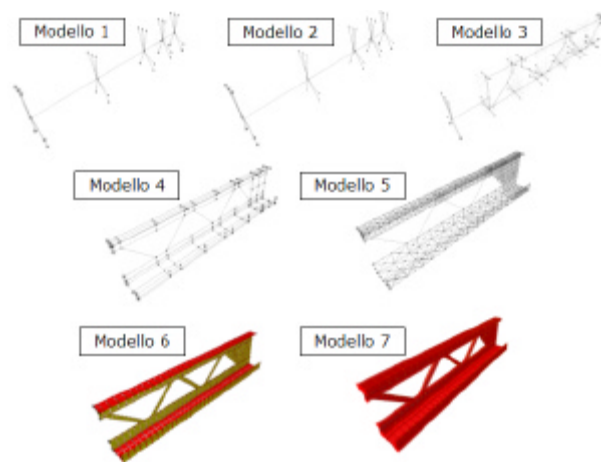


Figura 4. Modelli realizzati in campo lineare.

Tutti i modelli realizzati sono stati studiati e confrontati in campo elastico lineare al fine di estrarre tra questi un modello capace di descrivere efficacemente il comportamento strutturale dell'elemento, ed inoltre, un modello valido per l'analisi in campo non lineare. Nei modelli 1 e 2, la trave è stata modellata differenziando la zona di appoggio dalla restante parte. Il tratto iniziale è stato modellato con un elemento di tipo *frame* avente le caratteristiche geometriche ed inerziali della sezione piena, la restante parte della trave è stata modellata con un elemento *frame* avente le caratteristiche della

sezione di simmetria di una delle aperture, caratterizzata dalla più piccola area di calcestruzzo. Nel modello 1 le due zone sono state collegate con continuità facendo coincidere i due nodi corrispondenti, come se i baricentri delle due sezioni fossero coassiali. Nel modello 2, invece, i baricentri delle due zone sono stati collocati nelle loro rispettive posizioni e sono stati collegati con bracci rigidi. A varie ascisse inoltre gruppi di bracci rigidi, partendo da un nodo sull'asse della trave, raggiungono con l'altra estremità i punti geometrici ai quali corrispondono i vertici del profilo trasversale della trave (in questo modo è possibile ottenere direttamente gli spostamenti negli spigoli della trave da confrontare con gli altri modelli). I due modelli, apparentemente simili, differiscono per un dettaglio tutt'altro che trascurabile, meglio evidenziato dai modelli successivi. L'eccentricità della zona forata, rispetto alla zona piena costituisce un fattore importante per la deformabilità della trave. Tali modelli non colgono in modo appropriato un aspetto fondamentale del comportamento strutturale: la rotazione della sezione.

I modelli 3 e 4, entrambi costituiti da elementi monodimensionali, ma disposti anche in direzione trasversale, riescono a cogliere, anche se solo in maniera qualitativa, il comportamento strutturale dell'elemento.

Il successivo modello 5, schematizza la trave secondo il *framework-method* e riesce ad accoppiare in maniera soddisfacente il comportamento a *lastra-piastra* dell'elemento. Tale metodo consente di modellare un continuo bidimensionale caricato nel suo piano (*lastra*) con un *traliccio* di bielle il cui modulo base è costituito da un sistema di 6 aste interconnesse loro da cerniere sferiche nel quale le diagonali sono tra loro vincolate con un incastro e tutte le bielle sono caratterizzate ciascuna da un opportuno valore dell'area della sezione (Toniolo, 1981). Analogamente, un continuo caricato fuori il piano, può essere schematizzato con un *graticcio* nel quale questa volta le aste sono interconnesse con incastri, le diagonali sono indipendenti e tutte le aste sono caratterizzate ciascuna da opportuni parametri inerziali (inerzia flessionale e torsionale). Costruendo separatamente due modelli, uno a traliccio ed uno a graticcio, e sovrapponendo opportunamente i due, è stato ottenuto il modello finale della trave (Figura 5).

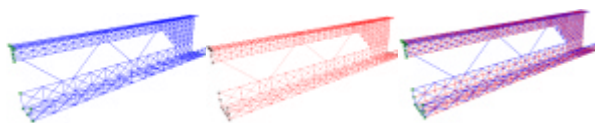


Figura 5. Modello 5 (modello a traliccio, modello a graticcio, modello finale).

L'utilità di una schematizzazione a telaio risiede nella possibilità di utilizzare un modello "tradizionale", in cui gli elementi, essendo monodimensionali, sono caratterizzati da una facile lettura dei risultati, soprattutto in termini di sollecitazione e di sforzo. Questo tipo di modellazione, però, trova limiti applicativi nella modellazione di contorni strutturali non regolari. Utilizzando elementi *shell* rettangolari a 4 nodi, si è costruito un altro modello della trave. Facendo riferimento alla geometria semplificata mostrata, la sezione della trave è stata discretizzata in elementi rettangolari. Utilizzando un solo elemento nello spessore, gli elementi *shell* sono stati posizionati in corrispondenza delle linee baricentriche.

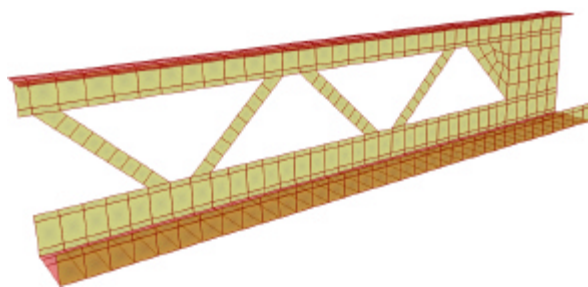


Figura 6. Discretizzazione del modello 6.

La discretizzazione della trave adottata è quella riportata in Figura 6, ottenuta dividendo gli elementi *shell* nei punti in cui, come si vedrà in seguito, saranno aggiunti al modello elementi frame a modellare i cavi di precompressione. L'anima della trave è stata discretizzata in modo da avere un elemento in corrispondenza della foratura, elemento che, compare ovviamente solo nel tratto iniziale di appoggio. Ai nodi di questo elemento, nella parte restante della trave sono collegati gli elementi *shell* che modellano le diagonali.

Il 7° modello è stato realizzato utilizzando elementi finiti tridimensionali. La trave è stata modellata con elementi *solidi* ad 8 nodi.

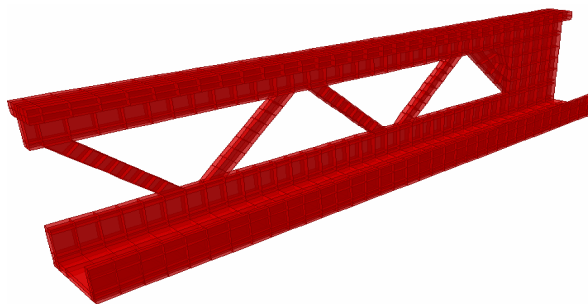


Figura 7. Modello 7 ad elementi finiti solidi.

Con elementi *solidi* è possibile modellare con maggior cura "l'intersezione" delle linee che disegnano il profilo di un volume e modellare una sezione così come si presenta realmente, seguendo anche piccole sporgenze o rientranze. Per evitare una discretizzazione molto fine e per un agevole confronto con gli altri modelli, in particolare con il modello ad elementi *shell*, il modello ad elementi *solidi* è stato costruito facendo riferimento alla sezione geometrica semplificata. Si è scelta la medesima discretizzazione utilizzata per il modello ad elementi *shell*, ma con due elementi nello spessore (Figura 7) riuscendo in tal modo a coprire con la modellazione gli spigoli, assenti nel modello ad elementi *shell*, anche se questo ultimo aspetto, data la modesta entità degli spessori dell'elemento strutturale esaminato, risulta di poca rilevanza. Tale discretizzazione consente agevolmente l'inserimento nel modello nelle reali posizioni degli elementi che modellano i cavi di precompressione.

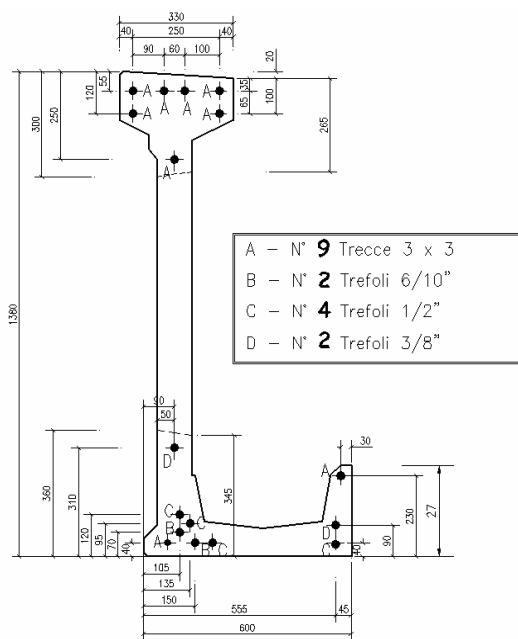


Figura 8. Posizione e tipologia delle armature di precompressione.

4. RISULTATI DELL'ANALISI LINEARE ELASTICA

La condizione di esercizio è stata simulata nei modelli 5, 6 e 7. In Figura 8 sono riportate le posizioni e le caratteristiche delle armature di precompressione. I 17 cavi di precompressione sono stati raggruppati in 8 cavi equivalenti

modellati con elementi di tipo *frame* e posizionati in corrispondenza del baricentro del gruppo corrispondente. La precompressione è stata simulata assegnando ai cavi una opportuna variazione negativa di temperatura.

Nella Figura 9 sono riportate a confronto le deformate della trave in esercizio. Tutti i modelli evidenziano:

- una forte rotazione della sezione direzione trasversale;
- una deformazione trasversale dello stesso ordine di grandezza di quella verticale;
- una distorsione della trave in corrispondenza dell'anima, a carico, quindi, degli elementi diagonali.

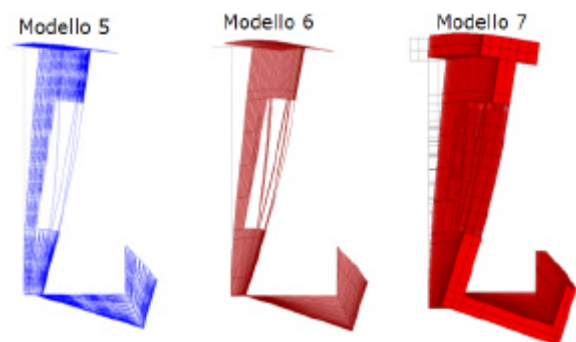


Figura 9. Rotazione e distorsione della sezione.

La deformazione della trave è stata descritta dalla posizione, nella configurazione deformata, dei nodi corrispondenti agli spigoli della sezione. Nei grafici che seguono (Figure 10, 11 e 12) sono riportate a confronto le deformate di uno spigolo del corrente inferiore della trave per i tre modelli di Figura 9 (a sinistra: modello 5 ad elementi *frame*; al centro: modello 6 ad elementi *shell*; a destra: modello 7 ad elementi *solidi*).

Come si può vedere, le differenze tra i modelli sono molto piccole. I modelli ad elementi *shell* e ad elementi *solidi* sono da ritenersi, in pratica, equivalenti.

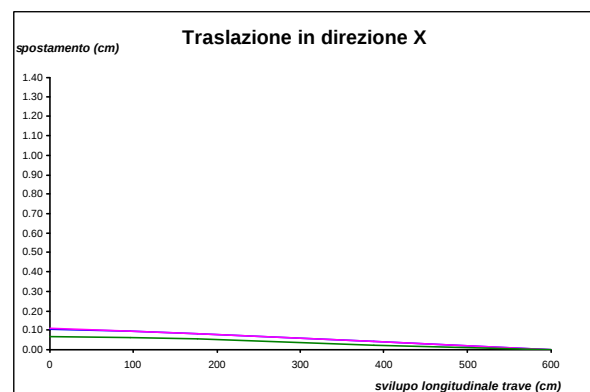


Figura 10. Confronto sugli spostamenti.

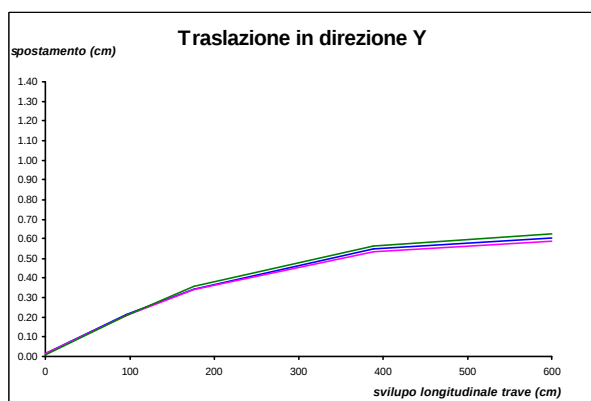


Figura 11. Confronto sugli spostamenti.

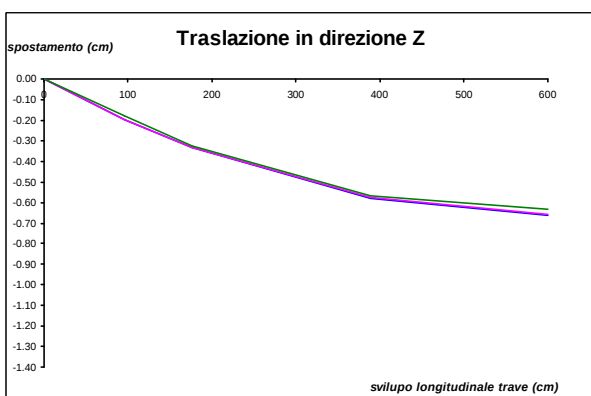


Figura 12. Confronto sugli spostamenti.

In termini di tensione le differenze tra i valori offerti dai tre modelli sono più marcate, anche se ugualmente trascurabili. Tutti i modelli mettono in luce che con un opportuno stato di precompressione si riesce a mantenere in esercizio uno stato di compressione sia nel corrente inferiore che in quello superiore. Il punto debole della trave, come ci si poteva aspettare osservando la deformata, è il traliccio d'anima. La prima diagonale, ossia quella più vicina all'appoggio, e la terza sono fortemente tese.

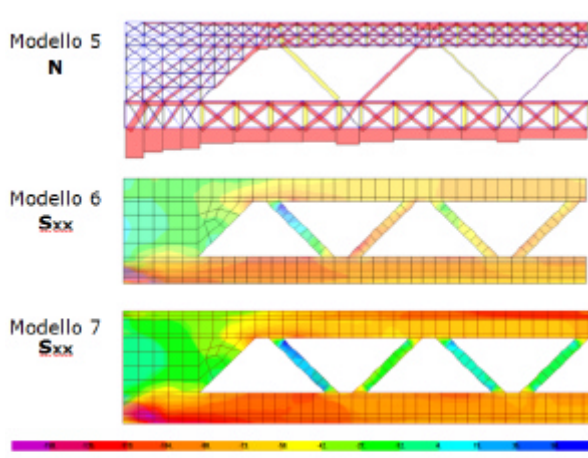


Figura 13. Tensioni in direzione longitudinale (X).

4. MODELLO PER L'ANALISI NON LINEARE

I risultati dell'analisi svolte fin qui evidenziano che il modello realizzato con elementi *shell* costituisce un modello sufficientemente valido per l'analisi e per il progetto dell'elemento strutturale in campo elastico lineare, descrivendo in maniera dettagliata e senza grosse incertezze lo stato deformativo e tensionale di tutte le parti. Per l'analisi non lineare della trave si è, invece, scelto di impiegare nella modellazione elementi *solidi*. La modellazione e le analisi sono state effettuate con il codice di calcolo ADINA.

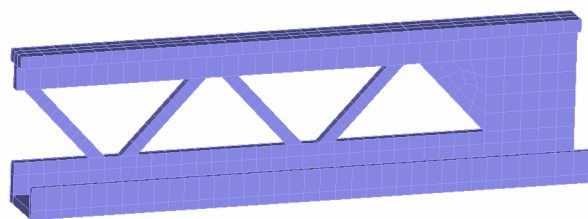


Figura 14. Modello solido per l'analisi non lineare.

La sezione in calcestruzzo è stata modellata con 420 elementi *solidi* ad 8 nodi seguendo il profilo semplificato già utilizzato nei precedenti modelli. Nella direzione longitudinale l'elemento è stato discretizzato come il modello 7 (elementi *solidi*), mentre nella direzione trasversale, l'anima della trave ed i correnti superiore ed inferiore sono stati modellati con un solo elemento nello spessore. I cavi di precompressione sono stati modellati ugualmente con elementi bidimensionali a due nodi, del tipo *truss*. Sostanziale modifica, ai fini dell'analisi non lineare, è stata l'aggiunta nel modello di elementi di tipo *truss* a modellare l'armatura lenta a flessione e a taglio. Tali elementi sono stati inseriti nel modello nelle posizioni il più vicine possibili a quelle reali.

L'armatura a taglio, è stata, dunque, modellata in tutta la trave con una "gabbia" di elementi *truss* perfettamente fusa, attraverso la sovrapposizione dei nodi, con il modello in calcestruzzo.

Il passo delle staffe nei correnti superiore ed inferiore è più piccolo che nella realtà e di questo si è tenuto conto nella valutazione dell'area della sezione dell'elemento.

Negli elementi diagonali, lungo 4 quattro spigoli dell'asta ed intorno ad essa, sono stati inseriti, con la medesima discretizzazione dei corrispondenti elementi *solidi*, elementi *truss* a modellare l'armatura lenta longitudinale e le staffe.

5. MODELLAZIONE DEI MATERIALI

Per il calcestruzzo (classe 45/55), è stato utilizzato il materiale *concrete* implementato nel codice di calcolo attraverso il quale è possibile caratterizzare il calcestruzzo con un legame costitutivo non lineare (Figura 15). Il materiale così modellato è stato sottoposto ad alcuni test di affidabilità.

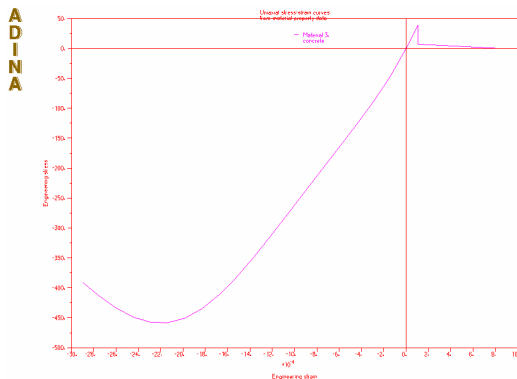


Figura 15. Legame costitutivo del calcestruzzo.

Modellando un provino di calcestruzzo, si sono simulate diverse prove biassiali con lo scopo di ricavare i valori delle tensioni principali a rottura. I valori ottenuti, normalizzati al valore della resistenza a compressione del calcestruzzo, hanno fornito (Figura 16) una curva qualitativamente simile al dominio di resistenza a stati di tensione biassiali.

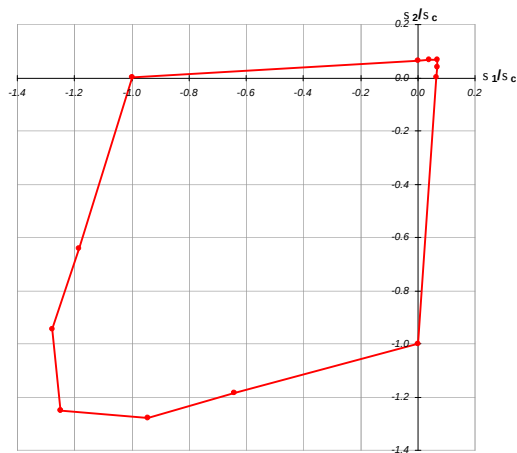


Figura 16. Test I - Curva limite del provino analizzato per campo di sforzo biassiale.

Sollecitando il modello del provino a varie combinazioni di sforzo normale e taglio, registrando i valori delle tensioni a rottura e normalizzandole ai valori della resistenza a compressione del calcestruzzo, si è ottenuta una curva differente che poco si discosta da quella

ottenuta da Chalos e Beteille, ottenuta per interpolazione di risultati sperimentali (Figura 17).

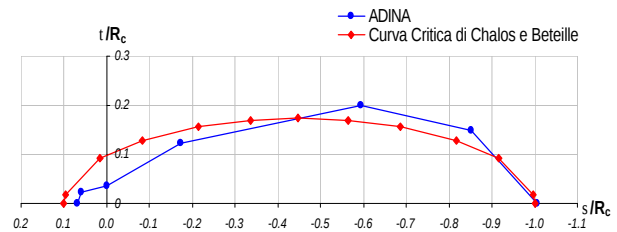


Figura 17. Test II - Curva critica di Chalos-Beteille e curva ottenuta dalle analisi numeriche.

Il terzo ed ultimo test sul materiale ha avuto come oggetto una delle travi provate sperimentalmente da Bresler e Scordelis nel 1963, nota come trave A-1. La bontà del modello è stata valutata confrontando l'andamento della freccia al crescere del carico con la curva ottenuta sperimentalmente dal Bresler e Scordelis (Figura 18) (Bresler & Scordelis 1963). Tale test numerico risulta particolarmente severo per il verificarsi nella trave di una rottura per taglio.

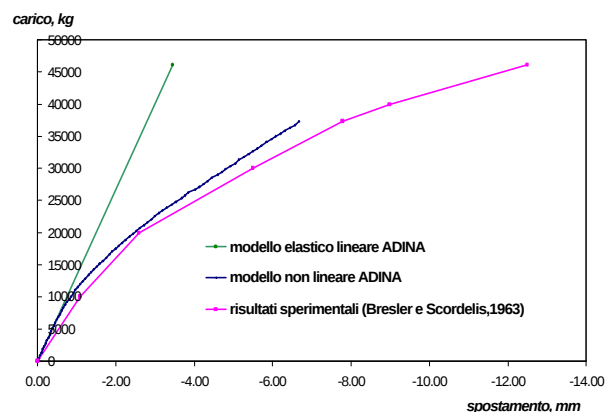
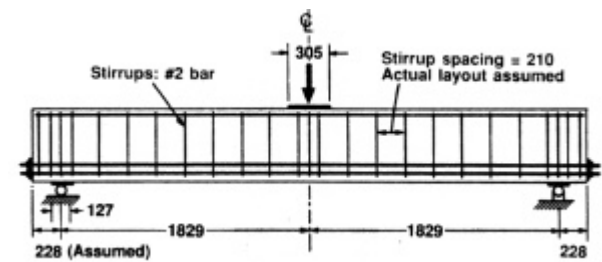


Figura 18. Test III - Curve carico-spostamento per la trave di Bresler-Scordelis.

L'acciaio delle armature è stato modellato con il materiale *Plastic bilinear* implementato nel codice di calcolo caratterizzato da un legame costitutivo di tipo elasto-plastico.

6. SCELTA DEL PROCESSO RISOLUTIVO E MODELLAZIONE DEI CARICHI

Il processo risolutivo scelto per l'analisi è quello di Newton-Raphson, implementato nel codice di calcolo. Ad ogni iterazione il codice ADINA costruisce e fattorizza la matrice di rigidezza tangente: nota la situazione al termine del precedente passo, cerca di passare allo step successivo, caratterizzato da un incremento di carico e da una nuova matrice di rigidezza. Il codice, quindi, per cicli successivi effettua le relative correzioni alla soluzione, cercando di non superare il valore limite concesso di iterazioni (Bontempi, Malerba & Romano, 1994).

I carichi, sono stati applicati al modello a piccoli passi in un intervallo temporale complessivo di 3 secondi. In questo intervallo temporale sono stati definiti due storie di carico.

La prima storia di carico, associata alla *time function 1* governa il carico da peso proprio e la precompressione. Tale funzione è una funzione lineare crescente che partendo dall'istante 0 dell'analisi raggiunge il suo valore massimo al tempo di 1 secondo per poi rimanere costante.

La seconda storia di carico, associata alla *time function 2* governa tutti i carichi di esercizio. Tale funzione vale 0 nell'intervallo tra 0 ed 1 secondi e cresce linearmente tra 2 e 3 secondi sino a raggiungere un valore unitario.

7. RISULTATI DELL'ANALISI NON LINEARE

L'analisi è stata suddivisa in 300 steps, ciascuno di 0.01 secondi, per un totale di 3 secondi. Da notare che, essendo le analisi eseguite in ambito statico la variabile temporale viene assunta solo come variabile ordinatrice delle storie di carico. Con i primi 100 steps, e quindi durante il primo secondo, alla trave vengono applicati simultaneamente il peso proprio e il carico di precompressione.

Nell'ambito della seconda funzione di carico che parte dal tempo $t=1$ secondo, con i successivi 80 step si raggiunge il livello di carico di progetto della trave, quindi al tempo $t=1.8$ secondi tutti i carichi di esercizio sono applicati alla struttura. Con i successivi incrementi di carico, la trave viene portata a rottura, questa si verifica in corrispondenza del tempo 2.85 secondi al quale corrisponde un carico pari al doppio del carico di progetto.

Quanto detto è ben "leggibile" nel grafico riportato in Figura 19 dove è stata tracciata la curva carico-spostamento per un nodo posto all'estradosso del corrente inferiore, nella sezione di mezzzeria. Sull'asse X vi è lo spostamento lungo la verticale, sull'asse Y il tempo di analisi, proporzionale al carico, dopo il primo secondo.

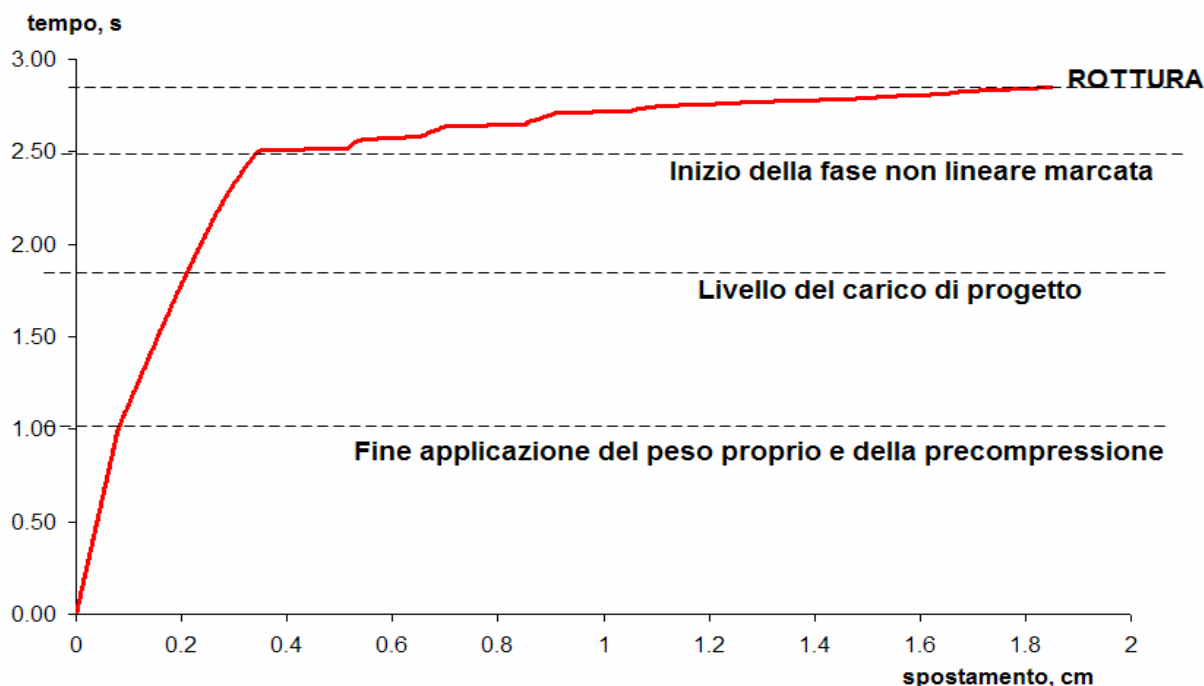


Figura 19. curva carico-spostamento per un nodo della sezione di mezzzeria.

Osservando la curva, si possono notare:

- il cambiamento di pendenza al passaggio, al tempo 1 secondo, dalla storia di carico 1 alla storia di carico 2. Tale cambiamento è dovuto alla diversa tipologia di carico.
- l'andamento pressoché lineare della curva fino al valore di 2.5 secondi nella storia temporale (oltre il livello del carico di progetto).
- la rapida variazione della pendenza della curva in corrispondenza dell'istante di 2.5 secondi con l'ingresso della trave in una fase marcatamente non lineare;
- l'andamento quasi piatto della fase non lineare marcata, sinonimo di una piccola risorsa di resistenza in campo plastico.

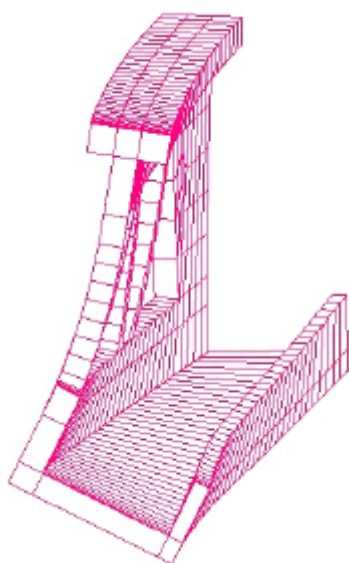


Figura 20. Deformazione della trave nell'istante di prossima rottura.

Ad 1.8 secondi si raggiunge il livello di carico di progetto con un andamento quasi lineare a significare che in esercizio la trave è poco /o non fessurata. La fessurazione compare nell'intervallo temporale tra 2,5 e 3 secondi, iniziando dal primo elemento diagonale teso, poi il secondo e via via lungo tutto il corrente inferiore (Figura 21 e 22). L'analisi termina al tempo di 2.85 secondi e questo implica che il massimo carico da neve sopportabile dalla trave è circa 2.1 volte maggiore del carico di progetto. Il moltiplicatore del carico per cui si ha l'ingresso in fase non lineare è 1.9 il carico di progetto. Il gap tra 1.9 e 2.1 rappresenta la risorsa in campo non lineare della trave. Come si evince dall'analisi eseguita questa risorsa è

ridotta: non ci sono, quindi, grandi risorse di resistenza in campo non lineare.

Per la sua geometria, la trave ha un funzionamento simile a quello di una trave reticolare isostatica. In virtù di questo, appena l'armatura di una diagonale o di corrente entra in campo plastico, l'intera struttura tende a fluire senza impegnare una resistenza aggiuntiva e senza un'apprezzabile redistribuzione delle azioni interne.

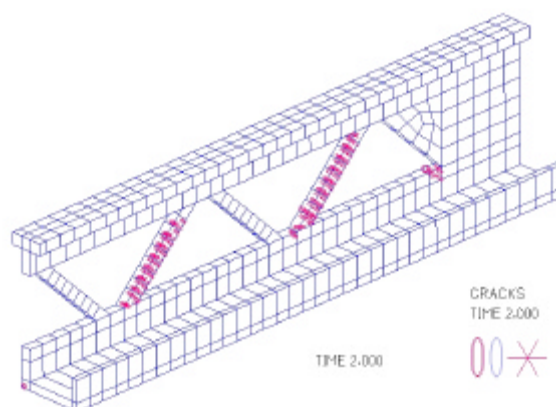
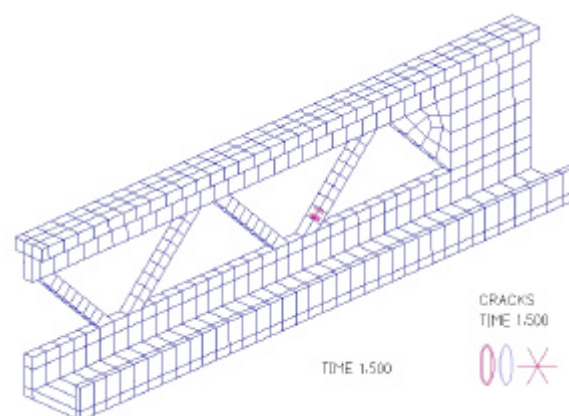
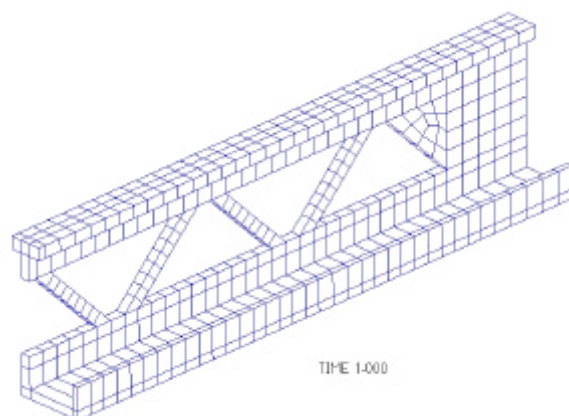


Figura 21. Quadro fessurativo a 1, 1.5 e 2 secondi.

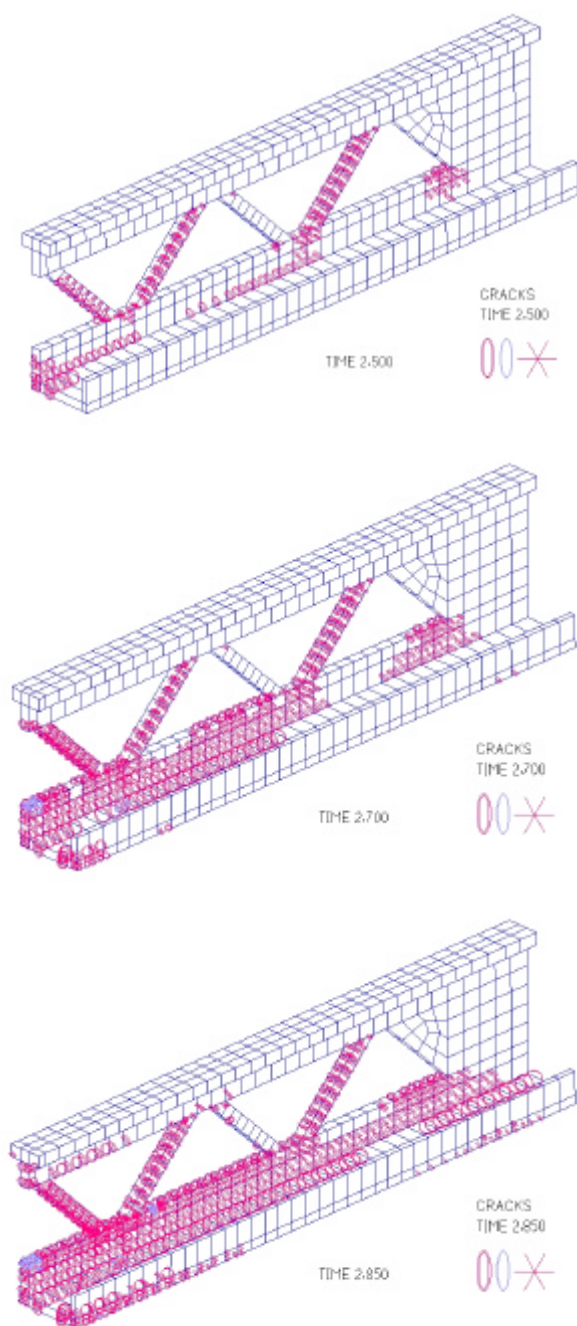


Figura 22. Quadro fessurativo a 2.5, 2.7 e 2.85 secondi (rottura).

8. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come oggetto una trave in calcestruzzo armato precompresso utilizzata per realizzare coperture tipo *shed* di grandi edifici industriali.

La presenza di ampie aperture atte a garantire l'illuminazione naturale degli interni, la non

simmetria della sezione trasversale e i ridotti spessori delle parti hanno subito escluso la possibilità di adottare il modello di trave alla De Saint Venant e hanno reso evidente la necessità di eseguire approfondite analisi agli elementi finiti.

Con lo scopo di descrivere e analizzare il comportamento strutturale dell'elemento, è stato svolto un dettagliato confronto tra numerosi criteri di modellazione delle rigidità e dei materiali.

Le numerose analisi svolte e i confronti eseguiti tra i risultati hanno mostrato che, fino a livelli di carico pari a quelli di esercizio, le analisi elastiche lineari sono sufficienti per descrivere con buona approssimazione il comportamento dell'elemento. Metodi più raffinati di modellazione del materiale restano comunque necessari per valutare la resistenza della trave e l'entità del carico di rottura.

Tra i modelli utilizzati nelle analisi lineari, l'uso di elementi solidi si è rivelato non indispensabile per le trascurabili differenze riscontrate con il modello ad elementi bidimensionali. Per la semplicità di costruzione e di assegnazione dei carichi, per la bontà dei risultati ottenuti anche con una rada discretizzazione (riduzione dei tempi di elaborazione), il modello realizzato con elementi shell risulta essere il preferibile.

L'uso di elementi finiti monodimensionali è valido solo per realizzare modellazioni tipo *framework* che, nonostante gli ottimi risultati forniti, presenta grandi difficoltà di costruzione e notevoli limiti di utilizzo legati al rispetto di precisi rapporti geometrici.

L'utilizzo di varie modellazioni nello studio di una struttura di così complessa geometria e comportamento è risultato fondamentale per la comprensione dell'accuratezza e dei limiti di ciascun modello. Ogni modellazione numerica infatti, pur riproducendo la struttura reale più o meno fedelmente, non si comporta come essa, ma il suo comportamento è legato alle formulazioni meccaniche e numeriche su cui si basa. In una struttura complessa, come quella in esame, comportamenti come la perdita di forma della sezione o la flessione trasversale del corrente inferiore, possono risultare importanti e non tutti i modelli sono in grado di metterli in luce con adeguata accuratezza.

L'analisi in campo non lineare viene sviluppata utilizzando un modello ad elementi finiti solidi, che sembra essere il più adeguato a mettere in luce tutti i possibili comportamenti della trave. È noto che, passando dal campo lineare al campo non lineare, la complessità dell'analisi aumenta pesantemente. Fenomeni diffusivi o danneggiamenti per tensioni di taglio (non sempre riprodotti fedelmente dai codici di calcolo) possono governare il comportamento della struttura. Per questi motivi, in campo non lineare,

è di fondamentale importanza modellare in modo fedele il comportamento delle barre di armatura, sia in termini di posizione che in termini di legame costitutivo. Una errata modellazione delle barre di armatura potrebbe dar luogo a rotture non realistiche della struttura. Un modello tridimensionale risulta anche per questo aspetto la soluzione più naturale quando la struttura da analizzare presenta grandi irregolarità geometriche (Sgambi, 2001).

L'analisi in campo non lineare dalla struttura in studio mostra un comportamento ultimo con poca risorsa in campo plastico, evidenziando un comportamento principale a trave reticolare isostatica (Sciubba, 2004). Non si evidenziano fenomeni di rottura secondari, come ad esempio la crisi locale del corrente inferiore per flessione trasversale, ossia fenomeni che, pur non danneggiando la stabilità globale dell'opera, possono impedirne l'utilizzo.

9. RIGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato possibile grazie al materiale e alla collaborazione degli Ingegneri della MABO Prefabbricati S.P.A. In particolare gli autori desiderano ringraziare per la loro disponibilità l'Ing. Bittoni e l'Ing. Tarquini.

10. BIBLIOGRAFIA

- [01] **R. ATTARNEJAD, A.M. AMIREBRAHIMI, K.H. FAKHARABADI** "Application of elastoplastic theories in modelling the behaviour of reinforced concrete beams". ASCE, June 2002, Columbia University, New York.
- [02] **F. BONTEMPI, P.G. MALERBA, L. ROMANO**, "Formulazione diretta secante dell'analisi non lineare di telai in C.A. e C.A.P.", Studi e Ricerche, n. 16, 1994.
- [03] **F. BONTEMPI** "Strutture in C.A./C.A.P. Tecniche di progetto avanzate". Corso CISM.
- [04] **B. BRESLER, A.C. SCORDELIS** "Shear strength of reinforced Concrete Beams" ACI Journal, Proceeding Vol. 60 No. 1, January, pp.51-72, 1963.
- [05] **D.D. LEE** "Stresses and crack angles in concrete membrane elements" Journal of Structural Engineering, 2000.
- [06] **P.G. MALERBA, F. BONTEMPI** "Metodi generali per l'analisi di strutture sottili in calcestruzzo armato" CISM, Collana di Ingegneria Strutturale – n°10, 1998.
- [07] **C. SCIUBBA** "Modellazione di progetto di un elemento strutturale in c.a.p. di geometria non regolare", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 2004.
- [08] **L. SGAMBI**, "Modellazione tridimensionale di strutture in C.A. e C.A.P. in campo non lineare", Tesi di Specializzazione alla Scuola F.lli Pesenti. Politecnico di Milano, 2000.
- [09] **L. SGAMBI**, "Modellazione tridimensionale di strutture in C.A. in campo non lineare", Atti del convegno Hilti : Innovazione nello sviluppo e nella progettazione degli ancoraggi su calcestruzzo, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma, 16 Novembre 2001.
- [10] **L. SGAMBI**, "Analisi tridimensionale delle tensioni generate dalla precompressione nei pannelli alveolari", Congresso CTE, Mantova, 2002.
- [11] **L. SGAMBI, L. CATALLO, F. BONTEMPI** "Ottimizzazione delle caratteristiche geometriche dei solai alveolari", Congresso AICAP, Verona, 2004.
- [12] **G. TONIOLO, P.G. MALERBA** "Metodi di discretizzazione dell'analisi strutturale", Masson Editore, 1981.

Contatti con gli autori:

Cristina Sciubba:

c.sciubba@libero.it

Luca Sgambi:

luca.sgambi@uniroma1.it

Oriana Occhiolini:

o.occhiolini@maboprefabbricati.com

Franco Bontempi:

franco.bontempi@uniroma1.it