

# COPERTURE



## ELEMENTI A PROFILO ALARE INTERVALLATI DA COPPELLE

di Fabio Pinardi  
[studio@engisoft.org](mailto:studio@engisoft.org)  
[www.engisoft.org](http://www.engisoft.org)

Lo studio di seguito presentato si riferisce in particolare a strutture in parete sottile con profilo trasversale deformabile, costituito da più lastre non convergenti.

Gli elementi trattati appartengono alla categoria di sistemi scatolari di setti non convergenti.

Questi tipi di elementi presentano un comportamento statico piuttosto complesso.

Infatti, combinano un comportamento taglio-flessionale longitudinale con uno trasversale, un comportamento torsionale puro alla De Saint Venant con uno d'ingobbamento alla Vlasov.

Prima di eseguire il progetto statico degli elementi a profilo sottile in questione con l'ausilio degli algoritmi di calcolo a trave, consueti della scienza e tecnica delle costruzioni, è necessario impiegare metodi di calcolo più complessi, che tengano conto della deformabilità trasversale della sezione, applicando per esempio il Metodo degli Elementi finiti.

### PROGETTO PRELIMINARE

In fase di studio preliminare, una volta stabilito il profilo inferiore dell'elemento in conformità a criteri estetico-funzionali, occorre prestare attenzione alla larghezza dell'appoggio ed agli spessori delle ali (figura 1).

La larghezza dell'appoggio deve essere valutata principalmente in funzione del soddisfacimento della verifica a ribaltamento in fase di montaggio, con coppelle solo da un lato. Lo spessore delle ali è progettato in funzione soprattutto dell'andamento dei momenti trasversali, dovuti a peso proprio e sovraccarichi distribuiti sulle ali ed ai carichi concentrati linearmente, trasmessi dalle coppelle.

Il ringrosso superiore dovrà essere dimensionato in modo da escludere fenomeni d'instabilità ed ottenere una sezione bilanciata, esente da crisi lato calcestruzzo allo stato limite ultimo per sollecitazioni flessionali.

### MODELLAZIONE AD ELEMENTI FINITI

La struttura è divisa in un numero finito di parti di piccole dimensioni che sono connesse tra loro nei nodi situati al contorno.

In primo luogo è da valutare la scelta del tipo di elementi:

-tipo Brick ad otto nodi più aderente al modello fisico ma dall'aspetto computazionale più gravoso (figura 2):

-tipo Shell a quattro nodi più agili da gestire (figura 3).

Opportuni confronti tra i risultati consentono di stabilire se la schematizzazione più semplice non riduca eccessivamente la precisione dei risultati.

Un notevole impegno richiede la messa a punto del reticolo ad elementi finiti tridimensionale, soprattutto nella zona di testata, dove si analizzano problemi tra loro differenti (figura 4). Nei casi di carico assialsimmetrici ci si può riferire a porzioni ridotte con opportuni vincoli al contorno (figure 5-6).

**VALIDAZIONE DEI MODELLI DI CALCOLO**

A conforto dello schema di calcolo adottato è necessario eseguire un confronto dei risultati del calcolo a trave con le corrispondenti del calcolo ad elementi finiti.

Sono da paragonare in particolare freccia elastica e tensioni normali in mezzeria.

Le banali formule:

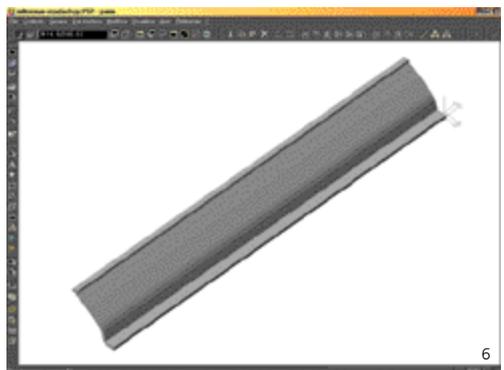
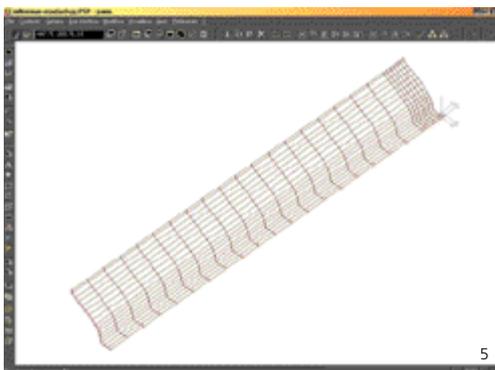
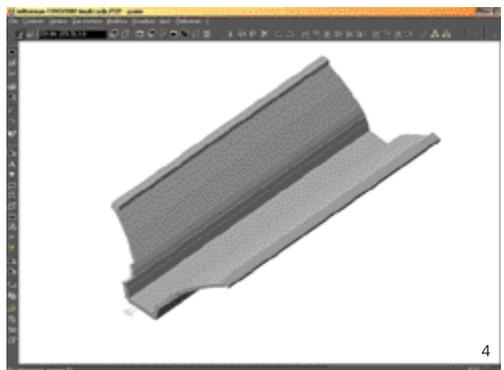
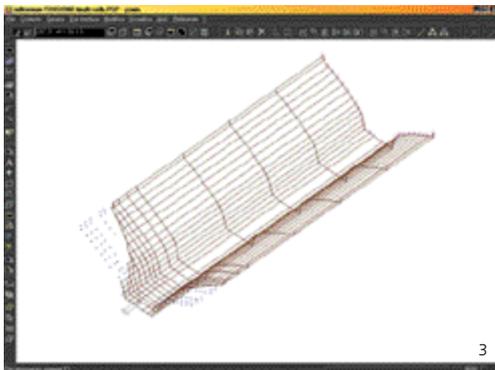
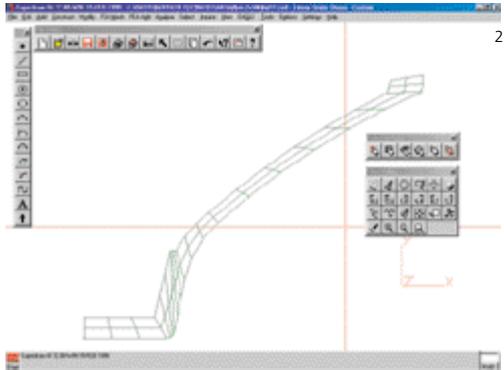
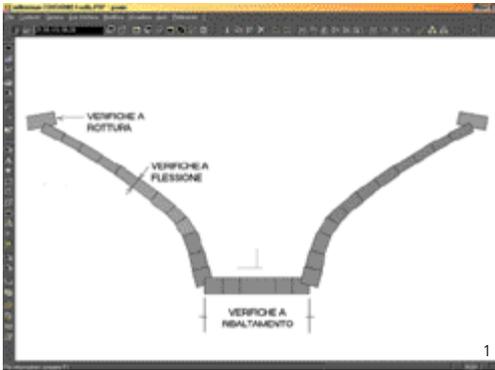
freccia in mezzeria  $f=(5/384)*(p*L^4/EJ)$  e tensioni normali per flessione  $\sigma=M/w$  serviranno nella circostanza.

**CONDIZIONI DI CARICO**

Le analisi del comportamento strutturale, allo stato limite ultimo ed in esercizio, vanno eseguite secondo le combinazioni di carico precisate dall'Eurocodice 2 (UNI/ENV 1992-1-1). Vanno esaminate tutte le condizioni di carico parziale ricavate da quella complessiva, togliendo porzioni di carico variabile.

In sostanza si devono considerare agenti i seguenti carichi permanenti ed accidentali:

- peso proprio;
- precompressione;
- sovraccarico distribuito sulla superficie dell'elemento (max. momento flettente);
- sovraccarico distribuito lungo un lato trasmesso da un elemento secondario (coppelle shed) per ottenere max momento torcente;
- vento o sisma trasmesso dalla parete verticale di tamponamento.



## ANALISI DEI RISULTATI

Le analisi effettuate (figura 7) servono per tarare le più semplici e consuete analisi a trave, maggiorando o diminuendo l'intensità delle azioni, a seconda che il calcolo tradizionale sotto-stimi o sovrastimi il loro effetto. Si può affermare che, generalmente, il calcolo a trave, per le tipologie simili a quelle trattate, e, trasversalmente, a lastre isostatiche, è perfettamente valido con le opportune indicazioni della CNR 10025/98 Parte II punto 5.2.4.3. Sorprendenti analogie con il calcolo a trave si rilevano anche nella trattazione della torsione mista dove il carico torcente genera due tipi di comportamenti:

- torsione pura alla De Saint Venant, che è il predominante, con le tensioni varianti linearmente nello spessore;
- torsione d'ingobbamento, di minimo valore, con le tensioni tangenziali costanti nello spessore.

Tale circostanza invita a completare il consueto calcolo a trave per sollecitazioni pressoflessionali, taglianti e torcenti alla De Saint Venant con la teoria di Valsov valida per profili aperti con resistenza d'ingobbamento.

In prima analisi occorre ricavare il parametro adimensionale  $\chi$  (chi)

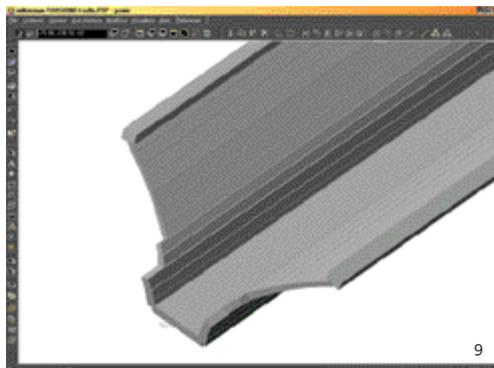
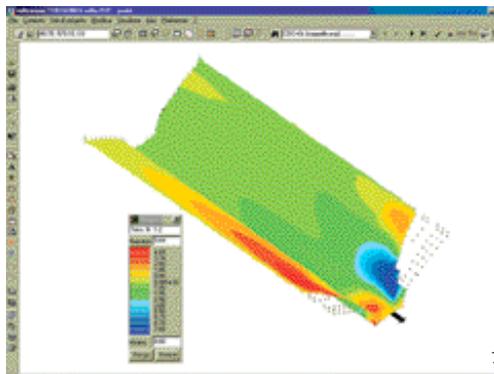
$$\chi = L \sqrt{G \cdot J_d / E \cdot J} \cdot 0.5$$

dove

L=lunghezza elemento; G=modulo elastico tangenziale;  $J_d$ =momento d'inerzia;  $J$ =momento d'inerzia settoriale.

La portanza torsionale alla De S.Venant è tanto più prossima al momento torcente complessivo quanto maggiore risulta il coefficiente  $\chi$ .

E' opportuno implementare tale tipo di analisi sull'elaboratore elettronico giacché la trattazione teorica di quantità tipo coordinate principali e settoriali, momenti statici e momenti d'inerzia settoriali bimomenti etc. non è del tutto agevole



## DETTAGLI ALL'APPOGGIO

In alcuni casi si rende necessario sagomare le testate sia per consentire la realizzazione di canali e converse per la raccolta delle acque, sia per realizzare selle Gerber per ridurre lo spessore del pacchetto di copertura (figura 8). In questo caso diventa indispensabile il calcolo ad elementi finiti, giacché le note teorie del tirante puntone all'appoggio non sono correttamente applicabili a causa della particolare conformazione della sezione.

E' altrettanto vero che all'appoggio la sezione è parzializzata e che perciò la teoria elastica ad elementi finiti cade in difetto, è prudente però individuare una sagomatura d'appoggio le cui tensioni non si discostino molto dalle corrispondenti tensioni del modello a testata integra, ovviamente sottoposto agli stessi carichi.

## STANDARDIZZAZIONE DELLE ANALISI

Tutte le analisi ad elementi finiti trattate non possono essere applicate ai quotidiani casi di progettazione.

Una approfondita analisi ad elementi finiti serve per calibrare il calcolo ordinario a trave eseguito dai consueti programmi.

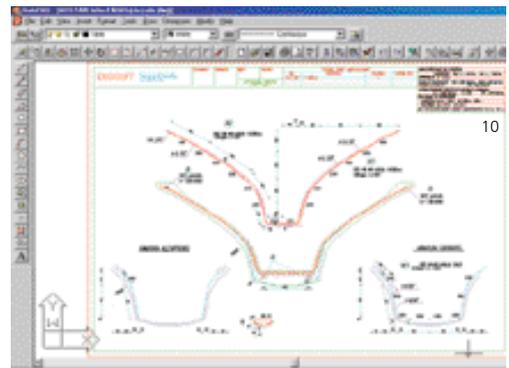
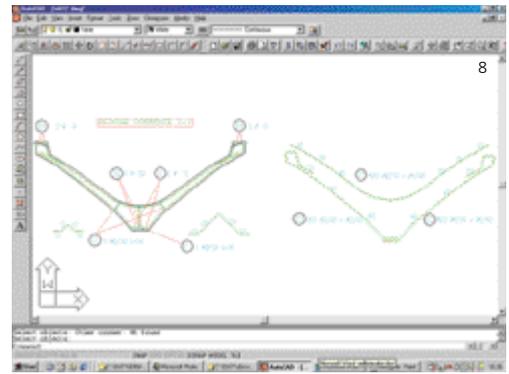
La resistenza flessionale della sezione globale dovrà tener conto anche delle prescrizioni della CNR 10025/98 Parte II punto 5.2.4.3 che prevedono limitazioni al diagramma s-e del D.M. 09.01.96:

-massima tensione del calcestruzzo compresso ridotta a  $f'_{cd}$

$$= \alpha f'_{cd}$$

■ massima contrazione al bordo del calcestruzzo compresso ridotta a  $\epsilon_{cu} = \chi \epsilon_{cu}$

dove  $\chi = 0.5 + 0.1t/d_a \leq 1$  con t=spessore della lastra e  $d_a$ =massima pezzatura dell'inerte.



## DISPOSIZIONE ARMATURE

Si possono verificare due circostanze:

- sezione massiccia (figura 9): l'elemento riesce a far fronte al cumulo di sollecitazioni torcenti e taglianti, pertanto è armato su entrambe le facce per realizzare il nucleo resistente a torsione.
- sezione sottile (figura 10): l'elemento non riesce a far fronte alle tensioni torsionali e pertanto bisognerà evitare che i casi di carico asimmetrici (coppella solo da una parte) generino momenti torcenti, ad esempio vincolando le coppelle.

## ELEMENTI SECONDARI: COPPELLE

Questi tipi di elementi (figura 11) presentano un comportamento statico piuttosto complesso, dovuto alle differenti situazioni di vincolo e di carico. Spesso esigenze delle fasi produttive definiscono situazioni di sollecitazione che sono determinanti per il dimensionamento.

Andranno analizzate le seguenti fasi:

- sollevamento;
- trasporto;
- esercizio;

Gli spessori in gioco (inferiori a 4 cm con punte che arrivano fino ad 1 cm) dei campi, compresi tra le nervature, obbligano a ritenere tali porzioni di calcestruzzo inefficaci ai fini della resistenza del manufatto.

Lo studio, in tal caso, va riferito a strutture del tipo grigliato a profilo curvilineo (figura 12)

E' in ogni caso conveniente analizzare anche l'interazione lastre sottili-grigliato mediante il metodo degli elementi finiti (figura 13) per valutare esattamente le deformazioni e per verificare che non esistano situazioni di maggiore sollecitazione per le nervature, nel caso siano ritenuti reagenti anche i campi di piastra.

Un notevole impegno richiede la messa a punto della sagomatura dell'appoggio ove convergono diverse esigenze estetico-funzionali. (figura 14)

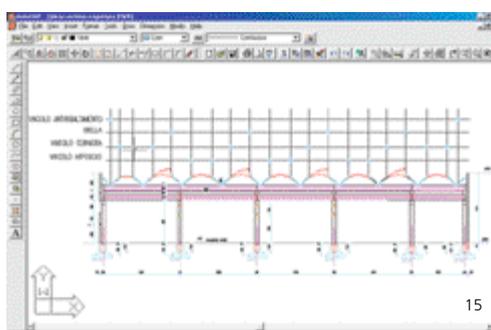
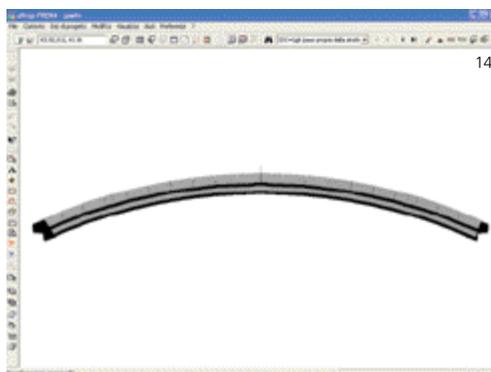
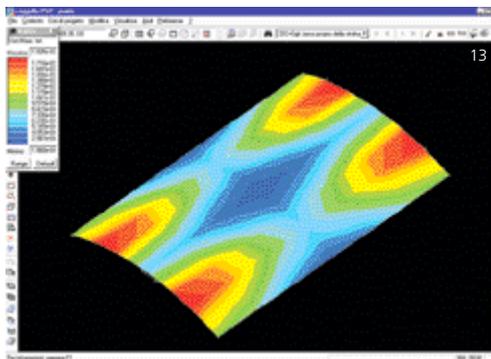
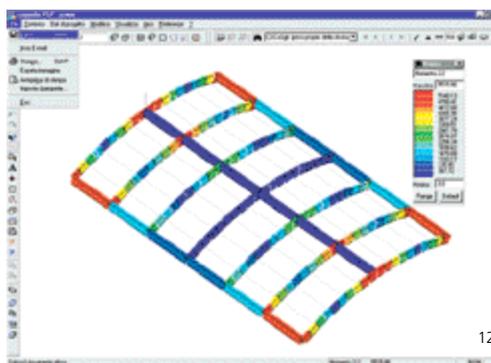
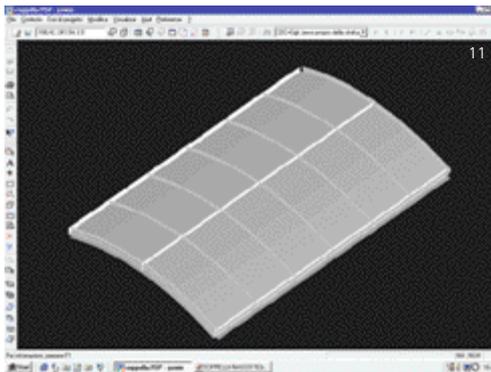
## VINCOLI

In elementi particolarmente sottili, senza opportuni accorgimenti in situazioni abituali di esercizio, gli sforzi combinati torsione-taglio, facilmente possono eccedere i valori massimi consentiti dalla normativa.

E' necessario quindi adottare delle tecniche costruttive atte a diminuire sensibilmente il valore del momento torcente, generato da asimmetrie di carico e dalla spinta orizzontale del tamponamento soggetto a sisma o vento (figura 15).

Occorre prestare attenzione alle coppelle disposte a shed dove non è possibile escludere collassi per perdita d'appoggio che vanno neutralizzati con vincoli a cerniera.

I tegoli di bordo possono, per particolari geometrie d'appoggio, non essere sufficientemente stabili in fase di montaggio, pertanto si devono predisporre particolari vincoli con la trave su cui appoggiano.



### ESEMPIO DI PROGETTAZIONE "ESTREMA"

In alcuni casi esigenze tassative, da parte degli utilizzatori di questi modelli di copertura, possono costringere i progettisti a non rispettare le prescrizioni distributive ottimali, ai fini statici, di tegoli, coppelle e shed.

Nell'esempio di figura 16 si è dovuto posizionare una striscia continua di copertura a shed a ridosso del primo tegolo portatamponamento.

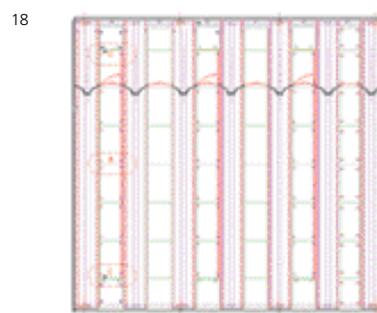
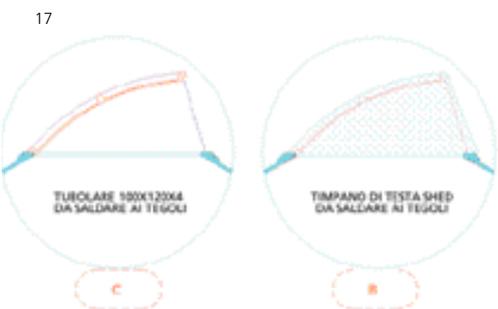
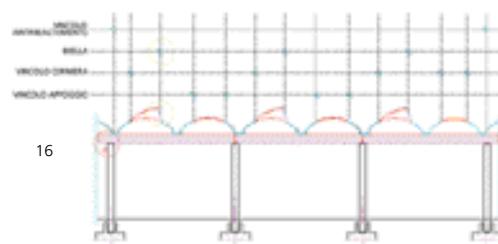
E' evidente che tale tegolo non risulta vincolato a quello adiacente e pertanto, essendo soggetto sia all'azione del vento sia ad una situazione di carico verticale disimmetrica, gli sforzi combinati torsione-taglio, facilmente possono oltrepassare i valori permessi dalla normativa.

Bisogna quindi intervenire ripristinando la collaborazione con il tegolo adiacente inserendo elementi strutturali supplementari come indicato in figura 17.

In figura 18 si nota la distribuzione in pianta degli elementi strutturali principali e di quelli supplementari.

Assai di rado, per fortuna, si può assistere al vincolamento del tegolo laterale al tamponamento con vincoli a cerniera (anziché gli usuali pattini) per impedirne il ribaltamento. In questo caso non è assolutamente chiaro né il comportamento statico né l'interazione tra due elementi: uno, il tamponamento, assai rigido; l'altro, il tegolo alare, estremamente flessibile.

Ad ogni modo, affidare la sicurezza statica di un elemento strutturale ad un elemento di tamponamento è senza dubbio sconsigliabile.



### CONCLUSIONI

La facilità di modellazione con il metodo degli elementi finiti, raggiunta dai moderni programmi di elaborazione elettronica, consente di eseguire numerose analisi di elementi con diverse lunghezze e situazione di carico e di approfondire gli aspetti più complessi (deformabilità trasversale, fenomeni torsionali e d'instabilità, collaborazione tra elementi contigui).

Ciò permette a sua volta di calibrare opportunamente il calcolo a trave per la consueta progettazione di routine.

Non si deve dimenticare che lo stato dell'arte nella realizzazione di elementi alari a spessore sottile ha raggiunto un buon livello di affidabilità, grazie ad una notevole attività di sperimentazione ed all'esperienza maturata per merito di numerose realizzazioni.

Vista però l'incertezza nella realizzazione di calcestruzzo avente caratteristiche omogenee in tutta la sezione, accompagnata alla difficoltà nella disposizione delle armature (soprattutto quelle per flessione trasversale e torsione) con la quasi millimetrica precisione richiesta dagli esigui spessori in gioco, è conveniente sottoporre il processo produttivo a periodiche prove sperimentali.

### BIBLIOGRAFIA

- [1]. Antonio Migliacci, "Teoria tecnica delle travi a profilo aperto con pareti di piccolo spessore", Atti del collegio degli Ingegneri di Como, Tamburini Editore Milano 1972.
- [2]. CNR 10025/98, "Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture prefabbricate in calcestruzzo", Roma 10 Dicembre 1998.
- [3]. Brebbia L.A., Connor J. "Fondamenti del metodo degli elementi finiti", Clup, Milano.