

## UN METODO NUMERICO PER IL PROGETTO DI SEZIONI ALTE IN ACCIAIO SECONDO LE NTC 2008

### A NUMERICAL PROCEDURE FOR DESIGN OF DEEP STEEL SECTION ACCORDING TO NTC 2008

Stefania Viti, Raffaele Nudo  
Università degli Studi di Firenze  
Dipartimento di Costruzioni e Restauro  
Firenze  
viti@unifi.it; raffaele.nudo@unifi.it

Massimo Viviani  
SE.I.CO. srl  
Lucca  
info@seicoingegneria.it

#### ABSTRACT

This paper deals with the optimal design of solid web steel sections of medium-large span beams. It is well known that deep steel sections are exposed to local buckling in compressed parts, so current technical codes, both European (Eurocode 3) and National (NTC 2008), give a set of specifications to limit problems connected to section stability. In particular, technical codes classify steel sections in four different types depending on their vulnerability to local buckling. Dimensions of commercial profiles are set in order to comply with code provisions whereas, when large size elements are used, compactness of each component panel has to be specifically designed. In this case, the common approach of scaling the commercial sections may not lead to the best design, since the obtained geometry, generally, is not the most suitable and competitive. The present work is aimed to support the design of deep sections, according to the current codes. Both steel and composite (steel-concrete) sections have been investigated. The effects of variations in geometry and in the steel strength have been studied.

#### SOMMARIO

Il lavoro concerne la progettazione di sezioni in acciaio a parete piena, idealmente appartenenti a travi di luce medio-lunghe. Poiché per sezioni di grande altezza i pannelli compressi sono soggetti ad imbozzamento, sia le NTC 2008 [1] che l'Eurocodice 3 [2], forniscono dei criteri di classificazione delle sezioni sulla base della loro vulnerabilità all'instabilità locale. In particolare queste sono distinte in quattro classi diverse, sulla base della snellezza dei pannelli che le costituiscono. Mentre i profilati commerciali vengono classificati direttamente dai produttori, quando si adottano sezioni composte la classificazione è a carico del progettista. In questo caso l'approccio, comunemente adottato, di scalare le proporzioni geometriche delle sezioni "a doppio T" può non essere il criterio ottimale di progettazione. Questo lavoro è finalizzato alla messa a punto di un criterio di progettazione di sezioni alte in acciaio secondo i criteri normativi attuali. Sono state considerate sia sezioni in solo acciaio, sia sezioni dotate di soletta collaborante in c.a., valutando per esse l'effetto connesso alle variazioni di geometria e di resistenza del materiale.

## 1 INTRODUZIONE

L'Eurocodice 3 (EC3), così come la vigente normativa tecnica italiana (NTC 2008) subordina la capacità resistente delle sezioni in acciaio alla loro capacità di sviluppare le risorse plastiche del materiale. Le proprietà plastiche della sezione vengono attinte quando i pannelli che la costituiscono, anche per elevati livelli di sforzo sollecitante, mantengono la geometria iniziale, ovvero non subiscono fenomeni di imbozzamento. Le normative attuali individuano quattro classi di sezione, in funzione delle snellezza dei singoli pannelli costituenti. Le sezioni di classe 1 e 2 (compatte) sono ritenute idonee a sviluppare interamente le loro risorse inelastiche; la loro capacità resistente, pertanto, può essere valutata mediante analisi plastica. Le sezioni di classe 3 sono soggette ad imbozzamento limitatamente al proprio campo plastico; la capacità resistente, pertanto, viene valutata mediante analisi elastica. Le sezioni in classe 4, infine, sono soggette ad imbozzamento anche all'interno del campo elastico. In tale ultimo caso, pertanto, la capacità resistente viene valutata mediante analisi elastica sulla base di una sezione reagente, ridotta rispetto a quella effettiva. La sezione efficace risulta dipendere dal regime di sforzo sollecitante, e la sovrapposizione degli effetti risulta quindi non applicabile.

E' evidente che l'adozione di sezioni compatte presenta indubbi vantaggi in termini di sfruttamento delle capacità meccaniche del materiale e pertanto di economia del progetto. In caso di profilati ordinari, la classificazione delle sezioni viene effettuata dalle industrie produttrici; l'adozione di sezioni di classe assegnata risulta pertanto di facile attuazione per il progettista. Per la realizzazione di opere di media e grande luce, invece, vengono utilizzate sezioni composte da più elementi piatti, la cui definizione dimensionale è a carico del progettista strutturale. In questo caso l'adozione di sezioni compatte risulta più difficoltosa in quanto connessa a procedure di dimensionamento caratterizzate da un notevole livello di articolazione.

In questo lavoro viene proposta una procedura progettuale volta ad individuare le caratteristiche dimensionali di sezioni compatte a parete piena "ottime" rispetto alle azioni sollecitanti di progetto. L'analisi è limitata alla sola sezione trasversale, assumendo quali condizioni limite quelle imposte dalle NTC 2008 per sezioni di classe 2; la procedura non mette in conto gli aspetti che caratterizzano il comportamento globale della struttura, come la deformabilità, le diverse condizioni di carico all'interno delle fasi di costruzione, etc.

Il criterio di ottimizzazione è basato sull'ottenimento dell'area minima della sezione necessaria a sostenere uno sforzo sollecitante (momento flettente) di assegnata entità. Lo schema strutturale di riferimento è quello di trave semplicemente appoggiata, soggetta quindi a solo momento positivo, a sezione costante. Il criterio adottato, pur prescindendo dai costi relativi alla preparazione dell'elemento, può tuttavia essere assunto come indicativo della convenienza economica dalla struttura realizzata.

## 2 LA PROCEDURA D'ANALISI

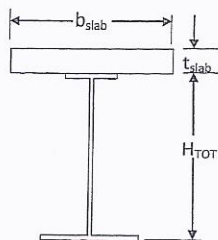
L'analisi svolta è orientata all'individuazione della sezione minima di sezioni in acciaio per assegnate soglie di resistenza. L'approccio analitico si prefigura pertanto come un problema di ottimizzazione, in cui le variabili sono costituite dalle dimensioni geometriche dei singoli pannelli che costituiscono la sezione, mentre la funzione obiettivo è l'area della stessa.

L'individuazione della sezione ottima viene effettuata per via numerica, attraverso un programma di calcolo appositamente messo a punto dagli autori, in cui le variabili vengono trattate come continue. Il problema non lineare, viene risolto attraverso il metodo del gradiente [3] [4] modificando le variabili finali di spessore ad una serie di valori discreti, compatibili con gli standard di produzione correnti [5] [6].

## 2.1 Sezioni esaminate

In questo lavoro sono state assunte due tipologie di sezioni campione, rispettivamente in solo acciaio ovvero dotate di soletta collaborante. In quest'ultimo caso sono state ipotizzate due diverse geometrie di soletta, estensivamente utilizzate in ponti stradali di luce media [7]: la prima, realizzata in calcestruzzo di resistenza ordinaria (C28/35) di altezza pari a 28 cm, la seconda in calcestruzzo più resistente (C40/50) di altezza pari a 15 cm (Fig. 1). Per ciascuna tipologia di sezione sono state prese in esame tre diverse dimensioni, di altezza complessiva pari, rispettivamente, a 1000 mm (H1000), 2000 mm (H2000) e 3000 mm (H3000).

Nei diversi casi esaminati è stato studiato l'effetto, in termini di resistenza flessionale della sezione, di variazioni geometriche e di materiale, descritte nei paragrafi seguenti.



	solo acciaio			soletta collaborante standard (sottile)		
$H_{TOT}$ (mm)	1000	2000	3000	1000	2000	3000
$B_{slab}$ (mm)		-		2000	3000	3000
$t_{slab}$ (mm)		-		280 (150)		
classe cls		-		C28/35 (C40/50)		
classe acciaio	S355			S355		

Fig. 1: Dati relativi alle sezioni campione.

## 2.2 Effetti indotti dalla geometria della sezione in acciaio

La geometria base assunta nelle indagini per la sezione in acciaio è quella "a doppio T", con ali differenziate in modo da poter conferire una maggior compattezza all'ala compressa. La variazione geometrica introdotta consiste nell'introduzione di un irrigiditore d'anima [8], che sortisce il duplice effetto di limitare la lunghezza libera d'inflessione del pannello d'anima e di consentire l'uso di spessori diversificati nelle due porzioni d'anima, al di sopra e al di sotto dell'irrigidimento. Nelle analisi tutte le grandezze geometriche caratterizzanti la sezione sono state assunte come incognite. In Fig. 2 è riportata la geometria delle due sezioni di riferimento: standard (DT) ed irrigidita (STIFF), insieme alle condizioni limite (valore massimo e minimo) assunte per ciascuna variabile. Le caratteristiche geometriche dell'irrigiditore sono state definite sulla base delle indicazioni fornite dalle norme CNR-UNI 10030 [9].

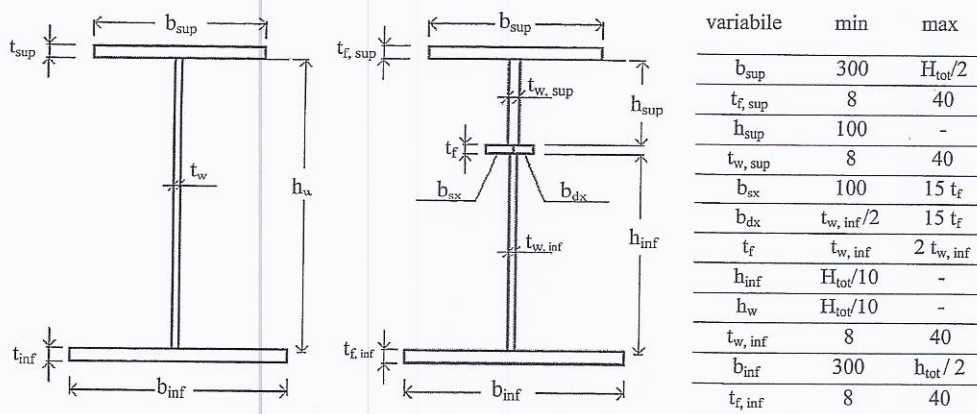
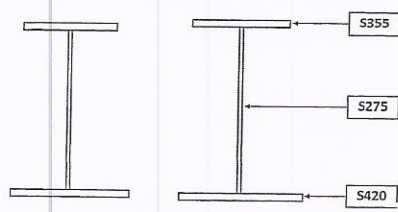


Fig. 2: Geometria delle sezioni in acciaio e limiti dimensionali (misure in mm).

### 2.3 Effetti indotti dalla variazione di resistenza dell'acciaio

L'analisi della sezione ha incluso anche la possibilità di variare la resistenza del materiale. Poiché lo studio è rivolto a sezioni composte, infatti, può essere ipotizzato di realizzare le diverse parti della sezione con acciaio di diverse classi resistenti, in modo da sfruttare maggiormente le caratteristiche meccaniche del materiale. In particolare, la variazione di materiale considerata consiste nell'adozione di un acciaio di maggior resistenza (S420) per l'ala inferiore della sezione e di un acciaio di minore qualità (S275) per l'anima. L'efficacia di tale criterio può risultare più evidente nel caso di sezioni con soletta collaborante; per esse, infatti, è possibile compensare l'elevato sforzo di compressione presente nella parte superiore della sezione attraverso l'utilizzo nell'ala inferiore di un acciaio più resistente, con necessità pertanto di minori incrementi della geometria della sezione. L'adozione di un acciaio di minore resistenza nel pannello d'anima risulta poco significativo ai fini della capacità flessionale della sezione, mentre induce un aumento dei limiti di snellezza dell'anima, consentendo una maggiore flessibilità di progettazione. In Fig. 3 è riportata la descrizione della composizione delle sezioni esaminate in termini di resistenza dell'acciaio. E' da sottolineare che la realizzazione dei diversi pannelli della sezione con materiale di diversa classe resistente risulta conveniente solo nell'ipotesi di opere che richiedono un elevato numero di elementi seriali.



Elemento	Sezione omogenea (S355)	Sezione mista (MIX)
ala superiore		S355
anima	S355	S275
ala inferiore		S420

Fig. 3: Distribuzione delle classi di resistenza all'interno della sezione in acciaio.

## 3 RISULTATI

L'analisi numerica è stata eseguita sulle sezioni tipo precedentemente descritte, per assegnati valori di altezza totale della sezione. In tutti i casi esaminati è stato valutato l'effetto delle variazioni geometriche e di materiale ipotizzate.

### 3.1 Sezioni costituite da solo acciaio

I risultati relativi alle sezioni in solo acciaio sono mostrati in Fig. 4, in termini di sollecitazione flessionale agente e corrispondente sezione minima. In assenza di soletta collaborante, una porzione di sezione di entità non trascurabile risulta compressa, e quindi soggetta ai limiti di snellezza indicati dalla Normativa Tecnica, che ne condizionano il progetto. Dai diagrammi riportati in figura, si può notare che la sezione di minore altezza (H1000) non risulta sensibile alle variazioni considerate; al contrario, le sezioni di altezza maggiore evidenziano una spiccata sensibilità alla variazione di geometria, soprattutto per sollecitazioni elevate. La variazione di materiale, invece, non produce effetti apprezzabili in nessuno dei casi considerati.

In Fig. 5 sono riportate le differenze di area associate alle variazioni di geometria e di materiale. Dai diagrammi si può osservare che l'introduzione dell'irrigidimento produce effetti significativi, la cui entità è legata alla dimensione della sezione. Si rileva infatti una riduzione massima dell'area richiesta del 20% per le sezioni H2000 e del 30% per le sezioni H3000. Tale evidenza può essere facilmente spiegata osservando che l'efficacia dell'irrigidimento limita la snellezza del pannello d'anima, risultando maggiormente significativo nei casi in cui il problema di progetto è governato da tale parametro geometrico (sezioni alte).

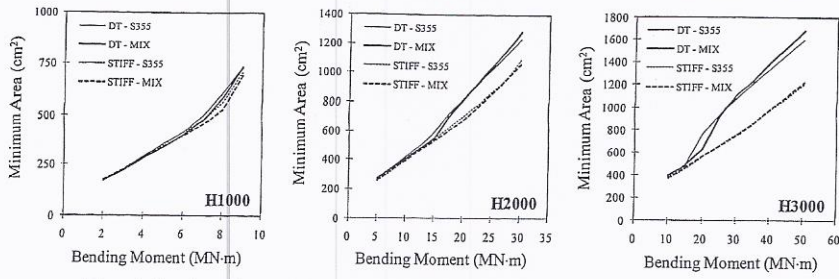


Fig. 4: Sezione in acciaio: area minima in funzione del momento agente.

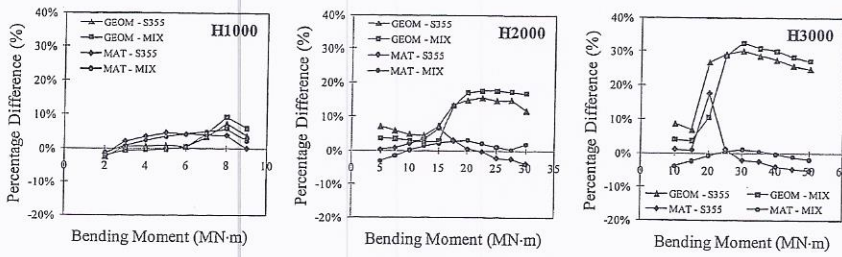


Fig. 5: Sezione in acciaio: differenze percentuali relative alle variazioni ipotizzate.

L'effetto legato alla variazione di materiale risulta, in tutti i casi, al di sotto del 10%. Nelle sezioni di altezza maggiore ed elevati valori di momento flettente, si osserva addirittura un lieve incremento di area legato alla variazione di materiale. Ciò è dovuto all'abbassamento dell'asse neutro indotto dal minor contributo resistente dell'anima compressa (realizzata in acciaio di classe S275); quest'ultima, malgrado il maggior limite di snellezza, risulta penalizzata dall'elevato livello di tensioni di compressione, che induce un incremento di spessore.

### 3.2 Sezioni con soletta collaborante

I risultati ottenuti per le sezioni con soletta collaborante, nei due spessori considerati, sono riportati nelle Figg. 6 e 7. Anche in questo caso per le sezioni H1000 e H2000 i risultati ottenuti con i diversi modelli non presentano differenze sostanziali, mentre la sezione H3000 rivela, relativamente alla sola variazione geometrica, effetti più marcati.

Gli effetti delle variazioni introdotte sono evidenziati nelle Figg. 8 e 9, in termini di differenze percentuali. Si può osservare che nel caso della sezione H3000 la riduzione di sezione legata alla variazione di geometria è del 23%.

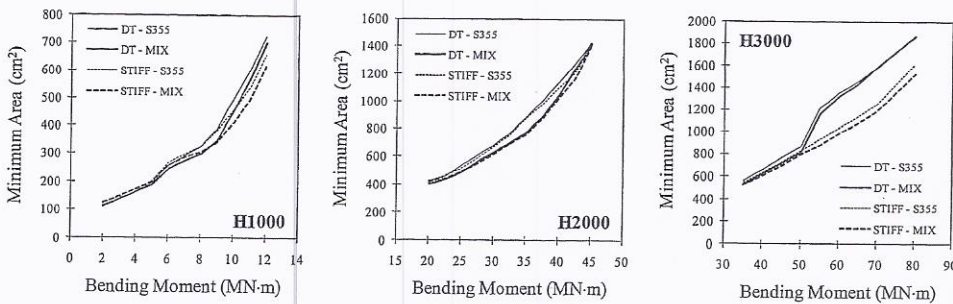


Fig. 6: Sezione con soletta standard (spessore 28 cm): area minima in funzione del momento agente.

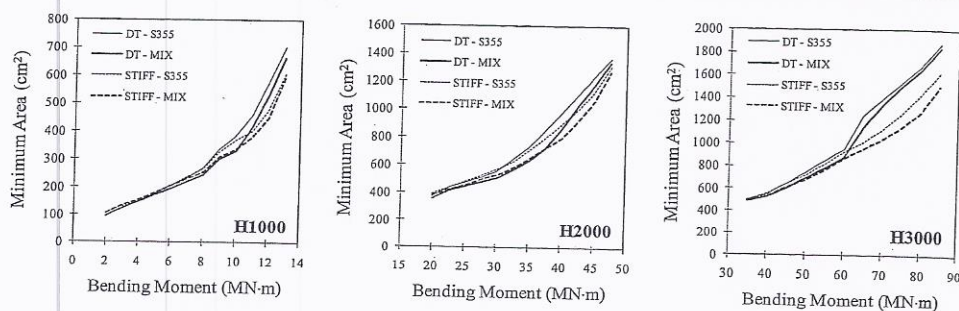


Fig. 7: Sezione con soletta sottile (spessore 15 cm): area minima in funzione del momento agente.

Nelle sezioni H1000 e H2000 la resistenza a compressione è prevalentemente fornita dalla soletta in calcestruzzo, così la sezione metallica risulta quasi completamente tesa, e pertanto non condizionata dalle limitazioni geometriche legate alla snellezza, ma da soli criteri di resistenza. In questi casi l'adozione di acciaio di classe diversa induce una riduzione di area non trascurabile, nell'ordine del 10%, con picchi superiori al 15% nel caso della soletta di spessore standard.

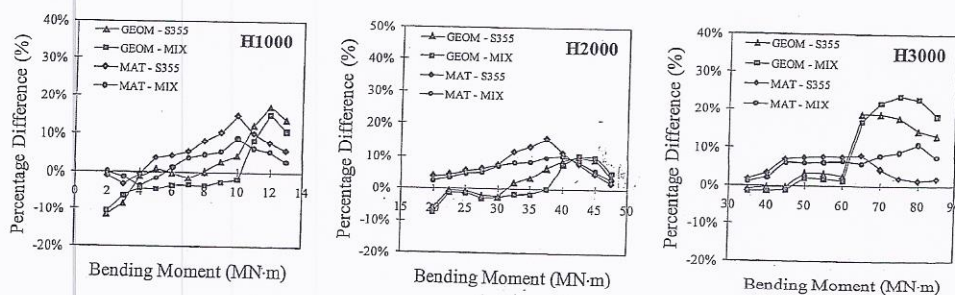


Fig. 8: Sezione con soletta standard ( $s = 28$  cm): diff. percentuali relative alle variazioni ipotizzate.

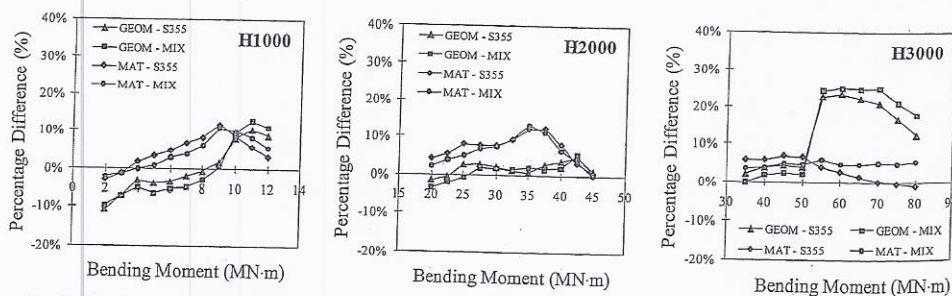


Fig. 9: Sezione con soletta sottile ( $s = 15$  cm): diff. percentuali relative alle variazioni ipotizzate.

#### 4 APPLICAZIONE A UN CASO REALE

Le sezioni di grande altezza a parete piena sono utilizzate, in genere, per costruzioni speciali, come ponti, edifici industriali o parcheggi.

Di seguito viene presentato, come esempio applicativo, un ponte progettato da uno degli autori e realizzato in Toscana nel 2010; esso presenta una campata centrale di 66.0 m ed un'ampiezza d'impalcato di 10.5 m. La struttura principale è costituita da una coppia di travi

semplicemente appoggiate, la cui sezione, rappresentata in Fig. 10, risulta del tutto analoga alla tipologia con irrigidimento considerata nel presente lavoro. In particolare, la sezione trasversale è costituita da sezioni “a doppio T” non simmetriche in acciaio S355, completate superiormente da un soletta collaborante in c.a.. La sezione presenta un irrigidimento nella parte superiore dell’anima, che corrisponde all’altezza delle travi secondarie. La soletta collaborante, che costituisce il piano carrabile del ponte, presenta un’altezza media di 0.28 m. La sezione del ponte, pertanto, può essere assimilata alla sezione con soletta collaborante di dimensione standard. La sezione utilizzata per la realizzazione del ponte in oggetto è stata messa a confronto con quella fornita dalla procedura proposta. Al fine di rendere i risultati comparabili, le valutazioni hanno riguardato la sezione di mezzzeria (essendo questa la più sollecitata), assumendo quale azione sollecitante il momento di progetto utilizzato per il ponte. I risultati sono riportati in Tab. 1. Si può osservare che la possibilità di differenziare lo spessore delle due porzioni d’anima, unita alla valutazione della capacità resistente della sezione con analisi plastica, determina una riduzione dell’area della sezione trasversale dell’ordine del 30%.

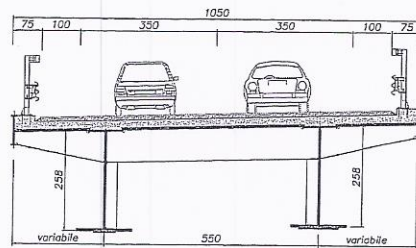


Fig. 10: Sezione trasversale del “Ponte sul torrente Pescia”.

Tabella 1: Aree di progetto della sezione del ponte valutate con la procedura proposta.

area utilizzata (cm <sup>2</sup> )	area progetto (cm <sup>2</sup> )		diff. percentuale	
	IRR-S355	IRR-MIX	IRR-S355	IRR-MIX
2109	1528	1411	29%	34%

## 5 CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata messa a punto una procedura di ottimizzazione di sezioni “a doppio T” compatte e non simmetriche, eventualmente dotate di soletta collaborante. Sono state considerate tre dimensioni di sezioni, caratterizzate rispettivamente da un’altezza totale di 1000, 2000, 3000 mm. L’area di ciascuna sezione è stata definita in funzione delle incognite assunte per rappresentare le dimensioni geometriche di ciascun pannello costituente la sezione stessa. L’ottimizzazione è basata sulla valutazione delle incognite cui corrisponde l’area minima della sezione relativa ad un’assegnata soglia di resistenza. La ricerca della soluzione tiene conto delle limitazioni di snellezza indicate dalle NTC 2008 relativamente alle sezioni di classe 2, per le quali è ancora possibile applicare l’analisi plastica. Per ogni tipologia di sezione sono stati considerati gli effetti dovuti alla variazione di geometria (consistente nell’inserimento di un irrigiditore d’anima e nella contestuale differenziazione dello spessore dei due pannelli d’anima individuati) ed alla variazione di materiale (consistente nell’adozione di classi di acciaio diverse all’interno della sezione trasversale).

Dalle analisi eseguite è emerso che le sezioni di altezza minore (H1000) non risultano particolarmente sensibili alle variazioni geometriche e di materiale considerate. La differenza, in termine di variazione percentuale dell’area minima, è in tutti i casi esaminati dell’ordine del 10%. Le sezioni di altezza maggiore presentano invece una maggiore sensibilità alle variazioni considerate, che dipende dalla specificità del caso esaminato.

Nelle sezioni in solo acciaio, la variazione di geometria induce significative riduzioni dell'area minima, con un massimo del 18% per la H2000 e del 32% per la H3000. Al contrario, la variazione di materiale risulta praticamente inefficace, determinando una riduzione di area inferiore al 7%. Nelle sezioni con soletta collaborante, la variazione di materiale produce maggiori effetti, inducendo una riduzione dell'area della sezione nell'ordine del 10% in tutti i casi considerati. Gli effetti legati alla variazione geometrica risultano fortemente legati alla dimensione della sezione; nelle sezioni H2000 la riduzione dell'area indotta non supera il 10%, mentre nelle sezioni H3000 la variazione geometrica produce (nel caso di soletta sottile) una riduzione del 25%.

Si può osservare, in sintesi, che quando il progetto della sezione è governato dalla resistenza dei pannelli costituenti la variazione di materiale induce una contenuta riduzione dell'area minima necessaria, mentre quando il progetto è governato dalla snellezza degli stessi la variazione di geometria determina una riduzione di area estremamente significativa, dell'ordine del 30% per sezioni di solo acciaio e del 25% per sezioni composte.

Si può quindi concludere che la procedura progettuale proposta risulta efficace ai fini dell'individuazione della geometria "ottima" della sezione, cui corrisponde cioè la minima area necessaria a garantire la soglia di resistenza imposta. Risulta tuttavia necessaria un'estensione dell'indagine alle problematiche che interessano il comportamento globale della struttura, in termini di deformabilità della membratura e di verifiche riferite alle diverse fasi esecutive.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. 14 Gennaio 2008, Nuove norme tecniche per le costruzioni (NTC), G.U. n. 29 del 04/02/2008, Suppl. Ord. N. 30 (in Italian), 2008
- [2] Eurocode 3, Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, ENV 1993-1-1, 1993
- [3] Himmelblau D. M., Applied Nonlinear Programming, McGraw Hill Book Company, New York, 1972
- [4] Powell, M.J.D., A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations. *Proceedings of the Biennial Conference on Numerical Analysis*, Dundee (Scotland), June 1977. Watson G.A., editor. Vol. 630. Berlin: Springer
- [5] Arora, J.S., Huang, M.W. and Hsieh, C.C., Method for optimization on nonlinear problems with discrete variables: a review, *Structural Optimization* 8, 69-85, 1994
- [6] Huang, M.W. and Arora, J.S., Optimal design of steel structures using standard sections, *Structural Optimization* 14, 24-35, 1997
- [7] Viviani, M., The new bridge over the river Arno at Pontedera, near Pisa, *Costruzioni Metalliche* 62, 1, 28-36, 2010
- [8] Viti, S., Nudo, R., Pintucchi, B., Viviani, M., Optimization of steel sections according to Eurocode 3 provisions, *Proceedings of the 14<sup>th</sup> ECEE*, Ohrid, 2010
- [9] CNR-UNI 10030, Anime irrigidite di travi in acciaio a parete piena, Milano (in Italian), 1987

#### PAROLE CHIAVE

Strutture in acciaio, sezioni a parete piena, imbozzamento, ottimizzazione, NTC08.