

Capacità rotazionale di travi composte acciaio-calcestruzzo: influenza delle proprietà dell'acciaio per armatura

Rotation capacity of steel-concrete composite beams: influence of reinforcing steel properties

La valutazione della capacità rotazionale disponibile delle travi composte acciaio-calcestruzzo costituisce una problematica di rilievo nel progetto delle travi composte continue, frequentemente impiegate nella realizzazione di ponti ed edifici.

I fenomeni che governano lo sviluppo della capacità rotazionale sono, d'altro canto, estremamente complessi. Nelle zone di momento negativo, infatti, sia l'interazione tra il profilo di acciaio e la soletta, che l'aderenza fra armatura ed il calcestruzzo della soletta rendono il comportamento fortemente non lineare, anche per carichi di modesta entità.

Nello stesso tempo, gli acciai da cemento armato attualmente immessi sul mercato Europeo si distinguono per valori elevati della resistenza, associati però a capacità deformative ridotte.

Allo scopo di indagare l'influenza delle proprietà meccaniche dell'armatura sulla capacità rotazionale delle travi composte soggette a momento negativo, nel presente lavoro è stato impiegato un modello di comportamento, precedentemente sviluppato, che tiene conto in maniera raffinata, sia della deformabilità della connessione sia dell'aderenza fra barre e calcestruzzo.

I risultati ottenuti evidenziano alcuni meccanismi specifici della tipologia composta, che ne differenziano il comportamento rispetto al cemento armato, e mostrano con chiarezza l'influenza delle caratteristiche dell'acciaio d'armatura sulle capacità rotazionali.

The evaluation of the available rotation capacity of steel and concrete composite beams is a key issue in the design of continuous beams for buildings and bridges, as it is strictly related to the pattern of the internal forces at collapse and affects the design criteria.

On the other hand, mechanical phenomena governing the rotation capacity are quite complex. In particular, if the hogging moment regions are considered, the interaction between the structural steel and the slab and bond between reinforcing bars and concrete make the structural behaviour strongly non-linear even for low load levels.

In addition, the reinforcing steel currently available on European markets generally has good strength, but reduced ductility.

A previously developed specific model is used in this paper to analyse the influence of the mechanical properties of reinforcing steel on the rotation capacity of composite beams under negative bending.

This takes into account the deformability of the shear connection and the bond interaction between steel rebars and concrete under tension.

The results show some specific mechanisms, which make the structural behaviour of composite beams quite different from reinforced concrete, and enable to clearly recognise the influence of the properties of reinforcement on the rotation capacity.

Dr. ing. Giovanni Fabbrocino, dr. ing. Gaetano Manfredi, prof. dr. ing. Edoardo Cosenza

Università di Napoli Federico II - Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale

1. INTRODUZIONE

L'impiego delle travi composte acciaio-calcestruzzo semplicemente appoggiate permette di esaltare le peculiari caratteristiche dei materiali che le costituiscono, giacché la soletta in calcestruzzo si presenta prevalentemente compressa, mentre l'acciaio è sollecitato da sforzi di trazione.

Talvolta, però, ricorrendo allo schema statico di trave continua e quindi introducendo la continuità in corrispondenza degli appoggi intermedi, si può ottenere una riduzione delle sollecitazioni e delle frecce a parità di sezione, ovvero una riduzione delle dimensioni strutturali, e quindi progettazioni più vantaggiose dal punto di vista economico, a parità di sollecitazioni e di limiti di deformabilità.

Il calcolo delle sollecitazioni allo stato limite ultimo nelle travi continue composte richiede, però, procedure che tengano conto della reale capacità di redistribuzione, che a sua volta è direttamente connessa alla valutazione della capacità rotazionale [1,2,3].

L'Eurocodice 4 [4], pur ammettendo un calcolo elastico con redistribuzione delle sollecitazioni, che dipende dal tipo di analisi (in regime fessurato o non fessurato) e dal profilo metallico, non fornisce indicazioni specifiche circa le proprietà dell'armatura della soletta e le rotazioni plastiche ammissibili. Queste ultime dipendono dai peculiari fenomeni di interazione che caratterizzano il comportamento meccanico delle travi composte acciaio-calcestruzzo; pertanto i criteri di progettazione e le caratteristiche dei materiali influenzano notevolmente la risposta strutturale.

Inoltre, i risultati di campagne sperimentali [5,6,7] condotte negli ultimi anni hanno chiaramente mostrato che il collasso di elementi composti soggetti a momento negativo può attingersi a causa della rottura delle barre di armatura, evidenziando in tal modo un legame tra le caratteristiche meccaniche dell'armatura e le prestazioni in campo plastico della tipologia strutturale in esame.

Tale problematica è di un certo interesse, dal momento che per le strutture in cemento armato estese analisi sia teoriche che sperimentali [8,9] hanno dimostrato che la capacità rotazionale può essere significativamente ridotta dall'impiego di acciai fragili, caratterizzati da bassi valori dei rapporti di incrudimento e della deformazione ultima.

Numerosi modelli di comportamento caratterizzati da differente livello di dettaglio possono essere utilizzati, ma un'affidabile stima della deformabilità in condizioni ultime richiede l'impiego di modelli molto raffinati, capaci di tenere conto della forte non linearità dei fenomeni di interazione.

In [10, 11] è discusso un sofisticato modello di comportamento ed illustrata una procedura numerica di analisi non lineare che tiene conto in maniera esplicita della deformabilità della connessione soletta-profilo e della fessurazione che si innesca nella soletta.

Nel presente lavoro vengono presentati alcuni risultati applicativi, ottenuti impiegando il modello descritto in [10, 11], che consentono di valutare l'influenza dei criteri di progetto e delle caratteristiche dei materiali sulla capacità rotazionale delle travi continue composte.

In particolare, dopo aver esaminato la risposta al variare delle caratteristiche meccaniche delle barre dell'armatura secondo la classificazione contenuta nel Model Code 90 [12], si discutono alcuni risultati di un'analisi parametrica finalizzata alla definizione dell'influenza delle proprietà meccaniche dell'armatura e della connessione tra soletta e profilo di acciaio.

2. IL MODELLO STRUTTURALE

Il modello monodimensionale di calcolo per l'analisi non lineare della trave composta soggetta a momento negativo ammette la presenza di uno scorrimento s_1 tra le barre di acciaio ed il calcestruzzo teso circostante e di uno scorrimento s_2 tra la trave di acciaio e la soletta, come illustrato nella Figura 1.

L'ipotesi di planeità della sezione viene applicata separatamente alle due parti che la costituiscono (soletta in c.a. e profilo di acciaio); esse si considerano dotate dalla stessa rotazione e dalla stessa curvatura. Viene pertanto escluso il fenomeno di sollevamento della soletta rispetto al sottostante profilo metallico [13]. Nella soletta si ipotizza la presenza di sezioni fessurate, la cui distanza dipende dalle caratteristiche geometriche della soletta, dalle proprietà meccaniche e dal diametro delle barre di armatura [12, 14].

Il calcestruzzo tra due fessure successive si considera capace di sopportare sforzi di trazione e si ammette che all'interfaccia tra le barre ed il calcestruzzo teso possano aversi scorrimenti relativi. In tal caso, l'ipotesi di linearità delle deformazioni della soletta si applica esclusivamente al calcestruzzo compresso e all'armatura tesa.

La definizione della funzione $w(x,y,z)$, rappresentativa degli spostamenti longitudinali della sezione composta, dipende dai seguenti parametri cinematici: la rotazione della sezione φ , lo spostamento di uno dei baricentri (w_c , ovvero w_s), lo scorrimento s_1 all'interfaccia barra di armatura-calcestruzzo teso e lo scorrimento s_2 all'interfaccia soletta-profilo.

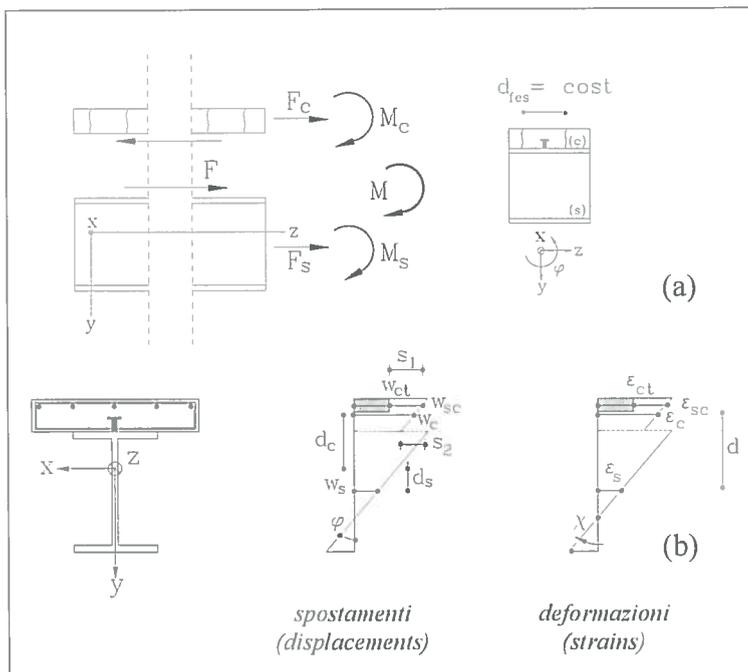
La soluzione delle equazioni che reggono il problema è assai complessa; in primo luogo perché i modelli di comportamento dei fenomeni di interazione (dovuti all'aderenza ed ai connettori) sono fortemente non lineari, in secondo luogo perché le necessarie condizioni al contorno impongono la soluzione contemporanea dell'intera trave anche in un caso staticamente determinato, con un gravoso onere computazionale.

La procedura risolutiva descritta in [10, 11] è basata sulla definizione di un legame momento-curvatura generalizzato per la sezione composta; infatti, la presenza degli scorrimenti implica l'esistenza di un'intera famiglia di curve momento-curvatura, e non dell'unica curva derivante dall'ipotesi di Bernoulli. L'applicazione delle equazioni di compatibilità cinematica lungo la trave consente di definire sezione per sezione nell'ambito di tutte le soluzioni equilibrate l'effettiva relazione momento-curvatura.

Il modello richiede l'introduzione di opportuni legami costitutivi per i materiali (calcestruzzo teso e compresso, acciaio da carpenteria, acciaio per armatura) e per i fenomeni di interazione (aderenza barre-calcestruzzo e connettori).

La struttura del modello consente di introdurre per tali legami costitutivi formulazioni del tutto generali. Nelle applicazioni successive si è fatto riferimento, a titolo di esempio, a formulazioni consolidate, che saranno brevemente introdotte.

Figura 1:
Il modello
cinematico
della sezione
composta.



2.1. I fenomeni di interazione

Gli aspetti salienti connessi alla modellazione dei fenomeni di interazione dell'aderenza acciaio-calcestruzzo e dei connettori sono brevemente discussi nel seguito.

Per ciò che concerne il collegamento tra trave di acciaio e soletta, esso può essere realizzato mediante diversi dispositivi, i quali agiscono in un numero discreto di sezioni. Nel seguito si farà riferimento ai connettori a piolo muniti di testa, i quali sono tra quelli più comunemente usati. Il loro comportamento meccanico è modellato attraverso l'introduzione di un legame P-s₂ dove P è la forza trasmessa dal connettore e s₂ è lo scorrimento relativo tra soletta ed ala del profilo di acciaio. La formulazione proposta da Ollgaard [15], introdotta nelle analisi successive, è stata frequentemente impiegata e presenta l'espressione:

$$P = P_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\beta \cdot s_2}\right)^\alpha \quad (1)$$

Essa dipende dal carico massimo compatibile con le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo e dell'acciaio dei pioli (P_{max}), e da due parametri α e β. In Figura 2 è mostrata graficamente la variabilità del rapporto P/P_{max} con il parametro α, il quale generalmente è inferiore all'unità e governa la pendenza iniziale della curva; il parametro β influenza, invece, la scala degli scorrimenti.

I connettori sono modellati nella loro effettiva posizione, quindi agiscono sulla soletta come forze concentrate. Le caratteristiche meccaniche della connessione tra il profilo metallico e la soletta possono essere sinteticamente espresse mediante il parametro N/N_r, che rappresenta il rapporto tra il numero N di connettori presenti nella trave composta, ed il numero N_r di connettori strettamente necessari a garantire il completo ripristino di resistenza. A tal proposito, va evidenziato che l'Eurocodice 4 attualmente limita il ricorso al parziale ripristino di resistenza nelle zone delle travi continue soggette a momento negativo.

I complessi fenomeni di interazione tra calcestruzzo teso e barre di armatura, che governano il comporta-

mento strutturale della soletta in c.a., possono essere introdotti nella procedura numerica attraverso l'impiego di un legame di aderenza τ-s₁. Nelle analisi successive è stato implementato il legame costitutivo di Ciampi et al. [16] e successivamente modificato da Langer [17].

Si tratta di un modello di comportamento ampiamente utilizzato: esso si presenta fortemente non lineare e tiene conto dei fenomeni di degrado dell'aderenza che si innescano in prossimità delle sezioni fessurate; di conseguenza esso dipende non solo dallo scorrimento s₁, ma anche dalla distanza tra la sezione considerata e quella fessurata.

3. PRESTAZIONI DEGLI ACCIAI DI ARMATURA E LIMITI NORMATIVI

Gli acciai per armatura attualmente disponibili sul mercato europeo, e contemplati nei codici normativi di ultima generazione, presentano da un lato elevate prestazioni meccaniche, dall'altro sono caratterizzati da ridotta duttilità [8,9]. Tali caratteristiche possono limitare la capacità rotazionale delle travi; per questo motivo nel caso delle strutture in cemento armato le minime prestazioni degli acciai sono stabilite fornendo le corrispondenti rotazioni plastiche disponibili [12,14].

Nel caso delle strutture composte, sebbene l'evidenza sperimentale [5,6,7] mostri chiaramente che il collasso di elementi composti soggetti a momento negativo può attingersi a causa della rottura delle barre di armatura, non vi è a livello normativo alcuna prescrizione specifica riguardante gli acciai da impiegare per l'armatura.

Allo scopo di evidenziare l'influenza delle caratteristiche meccaniche dell'armatura sulla capacità rotazionale delle travi composte, si è analizzato, a titolo di esempio, il comportamento a rottura di una trave caratterizzata dai parametri meccanici e geometrici contenuti in Figura 3, [18]. Sono stati considerati due differenti tipi di acciaio per armatura, compatibili con i limiti dell'allungamento ultimo e del rapporto di incrudimento forniti dal CEB Model Code

Figura 2: Dipendenza del legame costitutivo di Ollgaard da α e β.

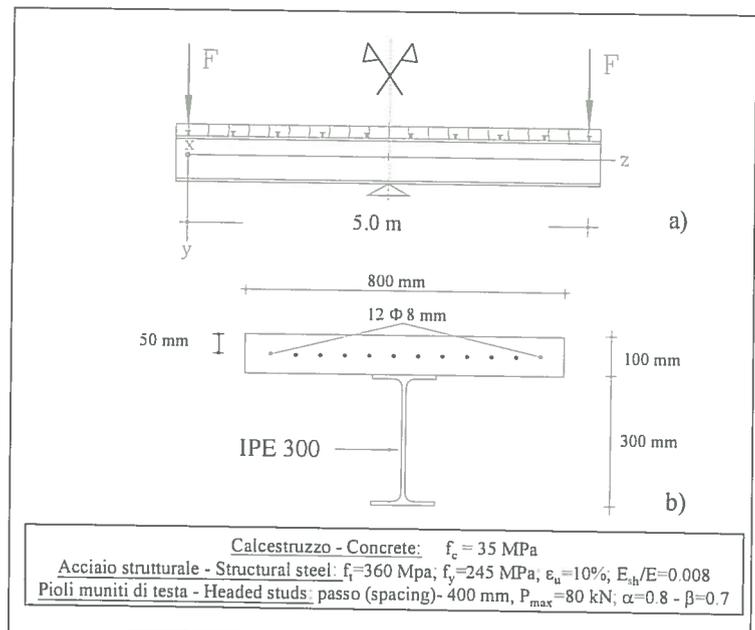
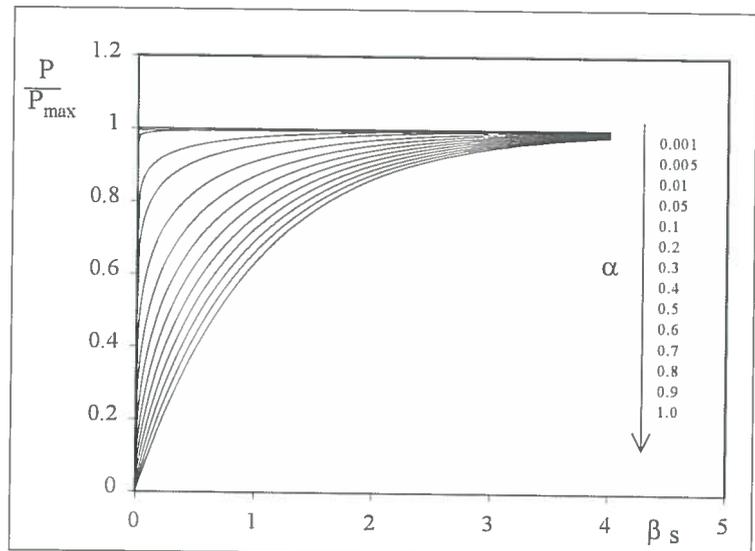


Figura 3: La sezione trasversale e lo schema statico del primo test numerico.

90, riassunti nella Tabella 1. In particolare si fa riferimento all'acciaio di *Classe B* e all'acciaio sismico di *Classe S*. Per ciascuna classe di acciaio si è fissata una tensione di rottura di 600 MPa, mentre la tensione di snervamento e la deformazione ultima sono fissati coincidenti con i valori riportati in Tabella 1, nella quale con il pedice *k* si individuano grandezze caratteristiche.

Nelle analisi numeriche è stato introdotto per l'acciaio da armatura un legame di tipo Ramberg-Osgood. Tale legame dipende da due parametri, la deformazione ultima ϵ_u ed il rapporto di incrudimento f_t/f_y , gli stessi su cui si basano le classificazioni dei codici normativi relativi al cemento armato; in Figura 4 si riportano i legami costitutivi ottenuti facendo riferimento ai limiti suggeriti dal Model Code 90 per l'acciaio Classe B e Classe S.

Tabella 1: Classificazione dell'acciaio per armatura secondo il CEB Model Code 90 [12].

CEB MODEL CODE 90			
	Class B	Class A	Class S
$\epsilon_{u,k}$	$\geq 2.5 \%$	$\geq 5 \%$	$\geq 6 \%$
$(f_t / f_y)_k$	≥ 1.05	≥ 1.08	≥ 1.15

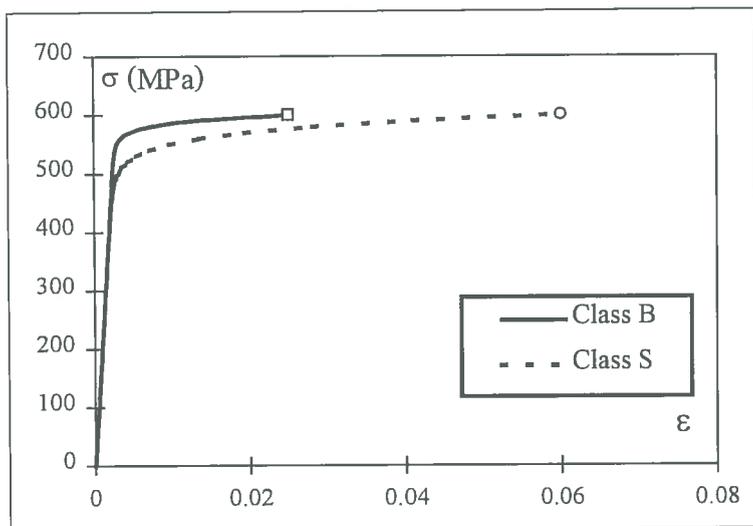


Figura 4: Legami costitutivi dell'acciaio per armatura Classe B ed S del Model Code 90.

	F_u (kN)	δ_u (mm)	χ_u (1/mm)	θ_y (rad)	θ_u (rad)	θ_{pl} (rad)
Class B	86.28	100.11	0.00018	0.0167	0.0906	0.0739
Class S	97.90	289.75	0.00039	0.0178	0.2591	0.2413

Tabella 2: Sommario dei risultati globali più rilevanti.

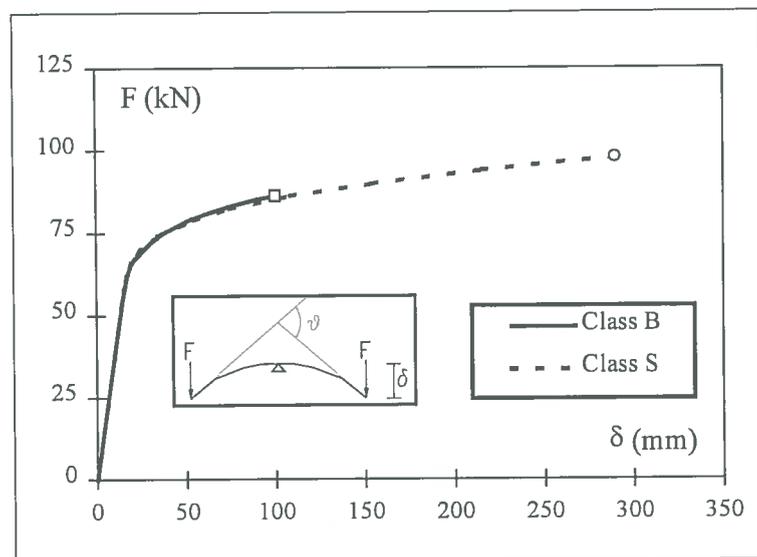


Figura 5: Confronto in termini di legame carico-freccia.

L'acciaio da carpenteria del profilo è stato invece modellato mediante l'uso di un legame costitutivo elasto-plastico incrudente, che può essere definito a partire dai parametri indicati in Figura 3.b, nella quale con ϵ_{sh} ed E_{sh} sono indicati rispettivamente la deformazione limite del tratto plastico ed il modulo di incrudimento.

Nel seguito non si tiene conto dei fenomeni di instabilità locale del profilo metallico: si assume, quindi, che l'acciaio da carpenteria sia caratterizzato dalle stesse proprietà meccaniche sia in trazione che in compressione; pertanto i risultati che seguono si riferiscono a sezioni trasversali compatte. Queste ultime consentono di sviluppare pienamente una cerniera plastica ed una capacità rotazionale compatibile con l'analisi plastica; soddisfano, quindi, i limiti dimensionali forniti dall'Eurocodice 4 della Classe 1 tanto per l'ala che per l'anima. Alcune osservazioni circa il confronto numerico possono essere sviluppate con riferimento alla Tabella 2, dove sono riportati: il carico F_u e la freccia δ_u al collasso, la curvatura χ_u al collasso, la rotazione relativa tra le sezioni di estremità (riquadro di Figura 5) valutata tanto allo snervamento θ_y , che al collasso θ_u , e infine la corrispondente rotazione plastica $\theta_{pl} = \theta_u - \theta_y$. In entrambi i casi il collasso è dovuto alla rottura delle barre di armatura.

L'impiego dell'acciaio più fragile, Classe B, determina una significativa riduzione della freccia al collasso δ_u , come si nota dalla Figura 5 in cui è riportata la curva carico-freccia calcolata per ciascuna classe di acciaio. Pertanto il ricorso all'acciaio Classe S consente di incrementare la capacità rotazionale delle travi composte. Infatti, la rotazione plastica calcolata per ciascuna delle due classi si incrementa notevolmente nel passare dalla Classe B alla Classe S. Tale variazione è circa del 325%.

Per ciò che concerne la resistenza, l'acciaio di Classe S consente di raggiungere un carico ultimo pari a 97.90 kN, mentre per quello di Classe B è pari a 86.28 kN, con una riduzione della resistenza che è circa del 13%.

Nella Figura 6, i diagrammi (a) e (c) rappresentano l'andamento della deformazione delle barre di armatura, mentre quelli (b) e (d) la distribuzione della curvatura. L'esame dei diagrammi consente di apprezzare la differenza in termini di risposta in campo plastico della trave, connessa alle differenti proprietà dell'armatura.

Si può osservare che impiegando l'acciaio di Classe S la maggiore deformazione ultima ed il maggiore rapporto di incrudimento consentono di attingere valori della curvatura ultima χ_u crescenti (l'incremento è di circa il 216%, Tabella 2) e di incrementare l'estensione della zona plasticizzata, che passa al collasso dal 9.6% (Classe B) al 36% (Classe S) della luce.

4. LO SVILUPPO DELLA CAPACITÀ ROTAZIONALE E L'INFLUENZA DEI PARAMETRI MECCANICI DELL'ACCIAIO D'ARMATURA

I risultati delle analisi numeriche discussi nel precedente paragrafo hanno mostrato un'influenza rilevante delle proprietà meccaniche dell'armatura metallica sulla capacità rotazionale delle travi composte. Tale risultato è connesso ad un effetto combinato dell'allungamento ultimo e del rapporto di incrudimento: pertanto un'estesa analisi parametrica è stata effettuata per identificare l'influenza di ciascun parametro sulla rotazione plastica.

I risultati più rilevanti emersi da tale analisi sono brevemente descritti nel seguito; essi si riferiscono ad una trave caratterizzata dallo schema statico considerato in precedenza (Figura 3.a), che si può ritenere significativo del comportamento delle regioni soggette a momento negativo delle travi continue acciaio-calcestruzzo ed è per questo motivo frequentemente utilizzato in analisi sperimentali [19, 20].

I risultati descritti nel seguito sono relativi ad una sezione trasversale costituita da un profilo metallico tipo HEB 180 e da una soletta 800x110 mm², realizzata con calcestruzzo con resistenza cilindrica pari a 30 MPa. L'acciaio strutturale è modellato attraverso un legame costitutivo derivato direttamente da una prova a trazione; la tensione di snervamento è di 315 MPa, quella di rottura è di 414 MPa e l'allungamento ultimo è pari al 25%.

La distanza tra le fessure è stata valutata a priori ed è pari a 100 mm. Le principali grandezze considerate variabili nell'analisi parametrica sono invece l'allungamento a rottura dell'armatura metallica ϵ_u ; il rapporto di incrudimento dell'armatura metallica f_t/f_y ; il rapporto di connessione N/N_f . È stata altresì esaminata l'influenza della capacità di scorrimento dei connettori e del tipo di carico (forza concentrata oppure carico distribuito). Il campo parametrico è riassunto in Tabella 3; a tal proposito si osservi che il campo di variazione considerato per il rapporto di incrudimento risulta molto più ampio rispetto a quello dell'allungamento ultimo, come dimostra la variazione della differenza $(f_t/f_y - 1)$, alla quale è legata la capacità rotazionale [8].

La variazione del rapporto di connessione è stata ottenuta prefissando la forma del legame costitutivo dei connettori e la loro posizione lungo l'asse della trave, successivamente il valore del carico massimo degli stessi è stato opportunamente scalato. In tal modo, la posizione dei connettori lungo l'asse della trave rimane invariata in tutte le analisi.

Per ciò che concerne l'armatura metallica della soletta, si è fissato il valore della resistenza ultima $f_t = 635$ MPa; conseguentemente il valore della tensione allo snervamento è stata fissata in dipendenza del rapporto di incrudimento considerato. Le travi analizzate presentano una percentuale geometrica di armatura ρ pari a 0.45% ($5 \Phi 10$ mm).

Il primo punto da discutere riguarda le modalità di sviluppo della capacità rotazionale nella trave composta. I contributi dei fenomeni di interazione alla deformabilità del sistema possono essere individuati dai diagrammi della Figura 7, relativi ad una trave nella quale l'armatura è dotata di rapporto di incrudimento uguale a 1.25, la snellezza L/H , data dal rapporto tra la luce L della trave e l'altezza totale della sezione trasversale H , è pari a 6, mentre lo schema statico è quello di Figura 3.a (forza concentrata).

I diagrammi visualizzano l'andamento, al variare del rapporto di connessione, della rotazione plastica (diagramma a), dello scorrimento di estremità s_2 all'interfaccia soletta-profilo (diagramma b) e della deformazione massima dell'acciaio per armatura ϵ_{sc} (diagramma c).

Si può osservare che:

- l'effetto della connessione deformabile governa la capacità rotazionale della trave composta per valori del rapporto di connessione inferiori all'unità; in tal caso, infatti, le deformazioni delle barre di armatura sono assai ridotte, mentre lo scorrimento trave-soletta è crescente;
- la condizione di massima duttilità della trave composta si attinge nell'intorno del rapporto di connessione unitario; in tale situazione, infatti, è massimo il contributo dello scorrimento trave-soletta, contemporaneamente l'armatura presenta una deformazione assai prossima a quella ultima;

ϵ_u	4% ÷ 14%
f_t / f_y	1.05 ÷ 1.45
$(f_t / f_y - 1)$	0.05 ÷ 0.45
N/N_f	0.30 ÷ 2.50

Tabella 3:
Il campo parametrico.

Figura 6: Deformazione delle barre e curvatura per l'acciaio Classe S (a, b) e Classe B (c, d) al collasso.

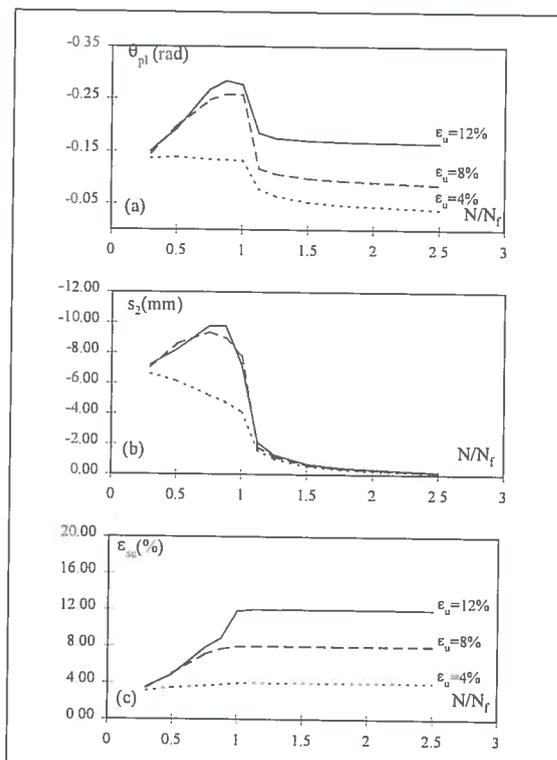
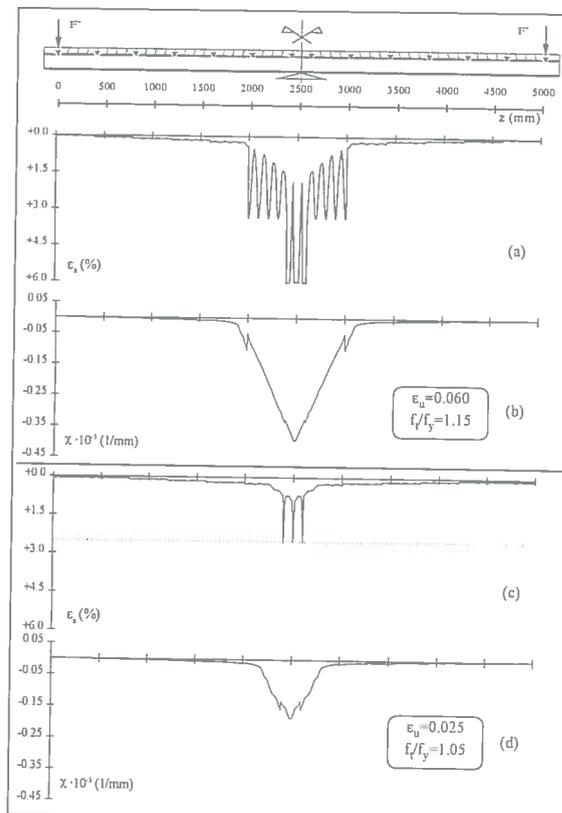


Figura 7: Lo sviluppo della capacità rotazionale. Parametri trave: snellezza $L/H=6$, percentuale geometrica di armatura $\rho=0.45\%$, forza concentrata; rapporto di incrudimento armatura $f_t/f_y=1.25$.

- per valori del rapporto di connessione superiori all'unità, l'effetto della deformabilità della connessione di viene trascurabile ed è la sola plasticizzazione dell'armatura metallica a contribuire alla capacità rotazionale. Infatti, in tale campo gli scorrimenti trave-soletta si presentano assai ridotti e pressoché indipendenti dalla duttilità dell'acciaio per armatura, mentre è massimo e costante l'apporto fornito dall'armatura.

Per quanto riguarda, invece, l'influenza della qualità dell'acciaio sulla capacità portante, i diagrammi della Figura 8 riportano sulle ordinate il momento ultimo in funzione del rapporto di connessione, ed al variare dei parametri che caratterizzano l'armatura, sempre con riferimento ad un carico esterno costituito da forze concentrate.

In particolare le curve sono rispettivamente costruite per un prefissato valore del rapporto di incrudimento

(1.05) al variare dell'allungamento ultimo dell'acciaio (a) e per un prefissato valore dell'allungamento ultimo (8%) ed al variare del rapporto di incrudimento (b). I valori della percentuale geometrica di armatura e la snellezza sono costanti e uguali a 0.45% e 6 rispettivamente.

È chiaro che le proprietà meccaniche dell'acciaio per armatura influenzano le prestazioni in termini di resistenza della trave composta. Tale influenza è più marcata nella regione di completo ripristino di resistenza; in particolare si può notare che il parametro principale ai fini della capacità portante è l'allungamento a rottura dell'acciaio, mentre meno rilevante è l'effetto del rapporto di incrudimento.

Nella Figura 9 sono riportati i diagrammi della rotazione plastica, in analogia con i diagrammi del momento ultimo riportati nella Figura 8, prima discussa: è immediato rilevare, confermando il risultato della Figura 4.a, che la duttilità dell'acciaio di armatura condiziona fortemente la capacità rotazionale.

I valori delle rotazioni plastiche calcolate sono molto elevati, in relazione all'entità della snellezza strutturale prescelta e del tipo di legame costitutivo utilizzato per il profilo metallico, per il quale non si prendono in considerazione i fenomeni di instabilità locale.

In ogni caso, si può porre in evidenza un importante risultato dell'analisi condotta, essendo stato mostrato che il parametro più importante, nella valutazione della capacità rotazionale delle travi a completo ripristino di resistenza, è l'allungamento ultimo a rottura. Infatti, per valori del rapporto di connessione superiori all'unità si può osservare un notevole incremento della capacità rotazionale nel passaggio da un acciaio con $\epsilon_u = 4\%$ ad uno con $\epsilon_u = 12\%$, mentre nel passaggio del rapporto di incrudimento da 1.05 a 1.45 la variazione è più contenuta, sebbene, come già osservato, il campo di variazione del rapporto di incrudimento è assai più ampio di quello dell'allungamento ultimo.

Nel campo di parziale ripristino di resistenza, laddove l'armatura è caratterizzata da una ridotta deformazione ed è prevalente l'effetto dello scorrimento trave-soletta, si può invece osservare una sostanziale indipendenza della capacità rotazionale dall'acciaio per armatura.

In ogni caso, di secondaria importanza è l'effetto del rapporto di incrudimento, al contrario di quanto accade nelle travi in cemento armato [8]. Infatti, nel caso in esame la diffusione della plasticizzazione lungo la trave è sostanzialmente governata dalla disposizione dei connettori più che dall'incrudimento dell'armatura.

Nel parziale ripristino di resistenza è di contro assai influente la capacità di scorrimento dei connettori, come è chiaramente mostrato in Figura 10. Infatti, le due curve riportate nei due diagrammi che

Figura 8:
Capacità portante e duttilità dell'armatura metallica.
(a): $L/H=6$, $\rho=0.45\%$, carico concentrato; $f/f_y=1.05$.
(b): $L/H=6$, $\rho=0.45\%$, carico concentrato; $\epsilon_u=0.08$.

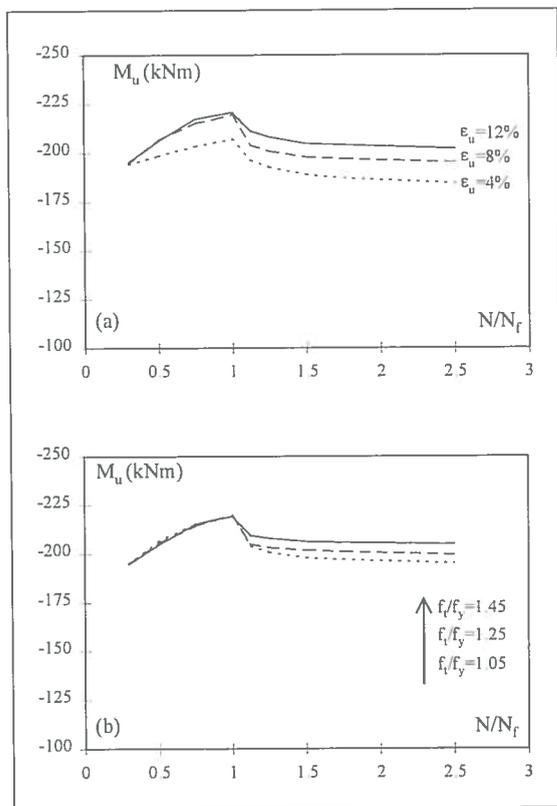
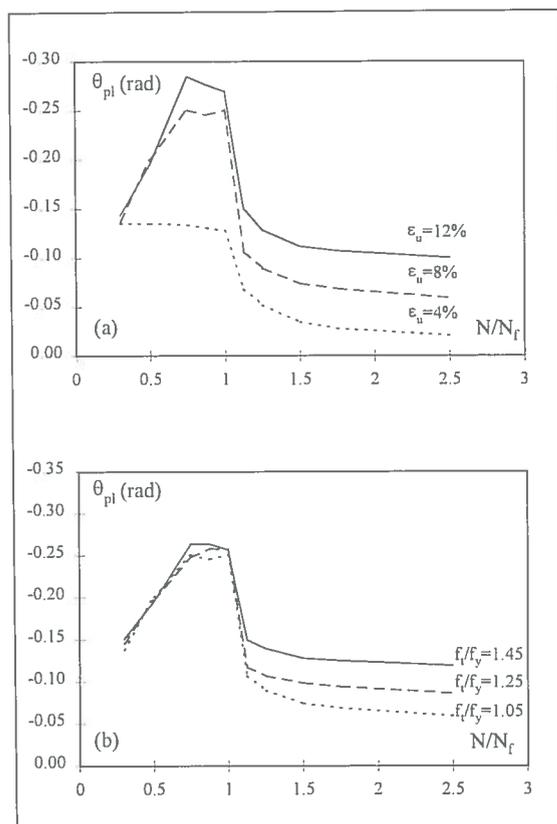


Figura 9:
Capacità rotazionale e duttilità dell'armatura metallica.
(a): $L/H=6$, $\rho=0.45\%$, carico concentrato; $f/f_y=1.05$.
(b): $L/H=6$, $\rho=0.45\%$, carico concentrato; $\epsilon_u=0.08$.



mostrano la capacità rotazionale (a) e lo scorrimento di estremità (b) si riferiscono a connettori con capacità di scorrimento illimitata, curva sottile, e limitata, curva spessa.

In particolare, la prima coincide con quella riportata in Figura 7 e relativa ad un acciaio con $\epsilon_u = 4\%$ e $f/f_y = 1.25$; la seconda è ottenuta limitando il valore dello scorrimento massimo a 6 mm, che costituisce il limite caratteristico della capacità di scorrimento suggerita dall'Eurocodice 4 affinché connettori, diversi da quelli a piolo, possano ritenersi duttili.

Si può, quindi, osservare che le curve coincidono nel campo del completo ripristino di resistenza, laddove è poco influente la deformabilità della connessione, mentre una sensibile riduzione della capacità rotazionale si manifesta nel campo del parziale ripristino di resistenza, a causa del raggiungimento della capacità di scorrimento dei connettori.

Con riferimento all'andamento delle curve delle rotazioni plastiche al crescere del rapporto di connessione si osserva peraltro un andamento di tipo asintotico nella regione di completo ripristino, tanto che si può affermare che per $N/N_f > 1.5$ il valore della rotazione plastica non è più influenzato dal rapporto di connessione.

L'influenza del tipo di carico può essere discussa facendo riferimento alla Figura 11, nella quale alle curve riportate in Figura 7 sono state sovrapposti i risultati relativi al medesimo schema statico di Figura 3.a, ma sollecitato con un carico distribuito. Mentre assai contenuta è l'influenza del tipo di carico sulla capacità portante [11], l'esame dei diagrammi di Figura 11 consente di rilevare che è perfetta l'analogia tra i fenomeni dai quali dipende la capacità rotazionale nei due casi esaminati.

Per questo motivo, quanto evidenziato con riferimento al caso della forza concentrata può essere esteso a quello del carico distribuito.

È, però, interessante notare che la differenza in termini quantitativi della capacità rotazionale che si riscontra nel campo del parziale ripristino di resistenza, al variare del tipo di carico, tende ad attenuarsi al crescere del rapporto di connessione. Tale osservazione conferma che la deformabilità della connessione fornisce un contributo prevalente per valori del rapporto di connessione inferiori all'unità. Infatti, è solo in tale campo che la differente distribuzione del taglio, legata al tipo di carico, influenza fortemente gli scorrimenti e di conseguenza la capacità rotazionale, come si vede in Figura 10.b.

Va infine osservato che ulteriori analisi confermano che le considerazioni effettuate restano valide anche al variare della snellezza e della percentuale geometrica di armatura [11].

6. CONCLUSIONI

Un'estesa analisi parametrica è stata effettuata utilizzando un raffinato modello di comportamento delle travi composte acciaio-calcestruzzo soggette a momento negativo, precedentemente introdotto, che tiene conto in maniera esplicita della deformabilità della connessione e della fessurazione nella soletta.

Dai risultati discussi emerge con chiarezza che la duttilità degli acciai di armatura riveste un ruolo fondamentale nello sviluppo della capacità rotazionale, in particolare modo nel campo delle travi a completo ripristino di resistenza. Inoltre può affermarsi che l'effetto dell'allungamento ultimo dell'acciaio è predominante rispetto a quello del rapporto di incrudimento; infatti, nelle travi composte, diversamente dal caso del cemento armato, è la posizione dei connettori a governare l'estensione della zona plasticizzata. Quando la trave è progettata a

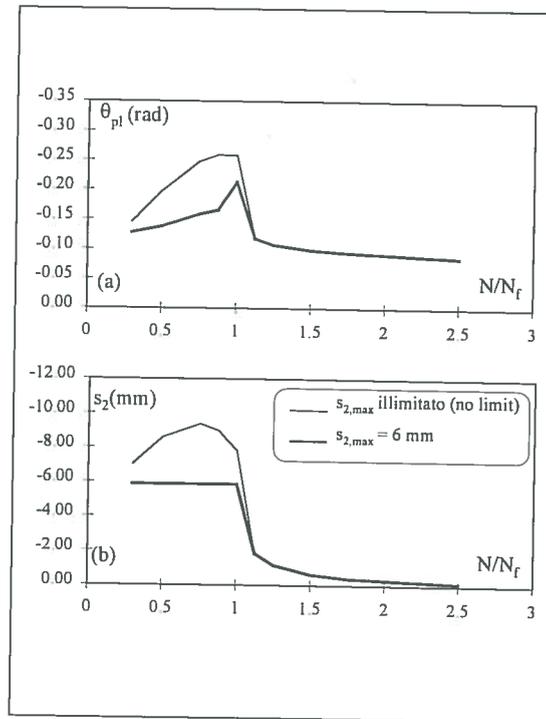


Figura 10: Dipendenza della rotazione plastica dalla capacità di scorrimento dei connettori. $L/H=6$, $\rho=0.45\%$, carico concentrato; $f/f_y=1.25$, $\epsilon_u=0.08$.

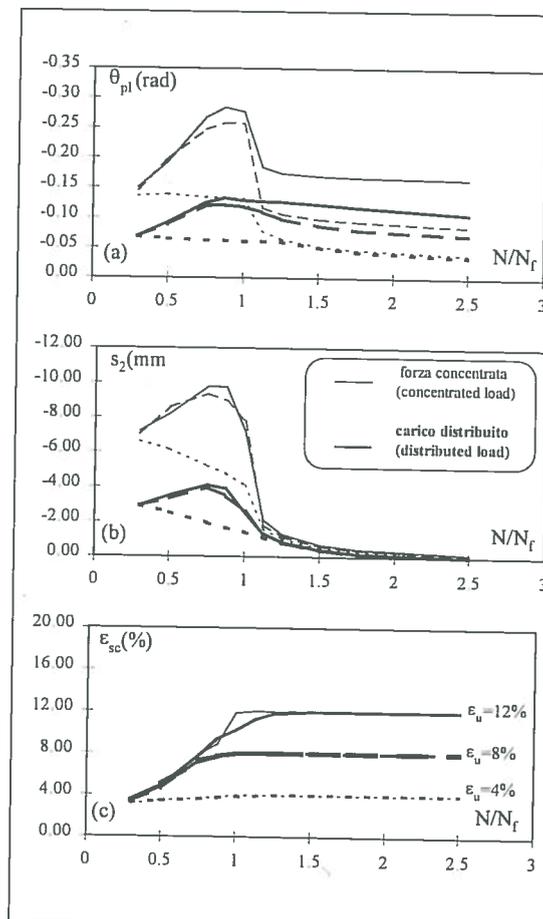


Figura 11: Dipendenza della capacità rotazionale dal tipo di carico. $L/H=6$, $\rho=0.45\%$; $f/f_y=1.25$.

parziale ripristino di resistenza, invece, il maggior contributo alla capacità rotazionale è fornito dalla deformabilità della connessione, quindi il ruolo della capacità di scorrimento dei connettori è predominante rispetto a quello dell'acciaio per armatura, affetto da bassi livelli di deformazione. Tali considerazioni sono valide sia al variare del tipo di carico (concentrato o distribuito) che della snellezza e della percentuale di armatura. Ulteriori analisi, soprattutto di natura sperimentale, sono necessarie per confermare tali considerazioni e fornire indicazioni semplificate per i codici normativi, che attualmente sono sull'argomento poco dettagliati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kemp A.R., Dekker N.W., Available Rotation Capacity in Steel and Composite Beams, *The Structural Engineer*, Vol. 69, n°5, 88-97, 1991.
- [2] Cosenza E., Mazzolani S., Pecce M.: Ultimate limit state checking of continuous composite beams designed to Eurocode Recommendations - *Costruzioni Metalliche*, n.5, 1992.
- [3] Couchman G., Lebet J.P., Design Rules for Continuous Composite Beams using Class 1 and Class 2 Steel Sections - Applicability of EC4, *EPFL-ICOM Publication 290*, Lausanne, 1993.
- [4] Eurocode 4, Common Unified Rules for Composite Steel and Concrete Structures, ENV 1994-1-1, 1992.
- [5] Xiao Y., Anderson D., Review of Research in the United Kingdom on Composite Semi-Rigid Joints, *Proceedings of the Second State of Art Report, COST C1*, Prague, 1994.
- [6] Aribert J.M., Lachal A., Experimental Investigation of Composite Connection and Global Interpretation. *COST C1, Proceedings of the First State of Art Workshop*, A. Colson Ed., 1992
- [7] Bode H., Kronenberger H.J., Tests on Composite Connections Prepared at the University of Kaiserslautern. *COST C1 Doc. C1/WG2/94-03*, 1994
- [8] Cosenza E., Greco C., Manfredi G., The Concept of Equivalent Steel, *CEB Bulletin d'Information* n° 218, pp. 163-184, 1993.
- [9] CEB, Bulletin d'Information n° 242, Ductility of Reinforced Concrete Structures – Synthesis Report and Individual Contributions, 1998.
- [10] Fabbrocino G., Manfredi G., Pecce M., La Modellazione delle Travi Composte Acciaio-Calcestruzzo con Connessione Parziale Soggette a Momento Negativo, *XI C.T.E.*, Napoli, 1996.
- [11] Fabbrocino G., Modellazione e Comportamento Sperimentale di Travi Continue Composte Acciaio-Calcestruzzo, Tesi di Dottorato, Ingegneria delle Strutture, Università di Napoli Federico II, X Ciclo, 1998.
- [12] CEB, Bulletin d'Information n° 213/214, Model Code 90, 1993.
- [13] Johnson R.P., Molenstra N., Partial Shear Connection in Composite Beams in Building. *Proceedings Institute of Civil Engineers*, Part 2, vol. 91, 1991.
- [14] Eurocode 2, Common Unified Rules for Concrete Structures, ENV 1992-1-1, 1991.
- [15] Ollgaard J.G., Slutter R.G., Fisher J.W., Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal Weight Concrete, *AISC Engineering Journal*, 1971.
- [16] Ciampi V., Eligehausen R., Popov E.P., Bertero V.V., Analytical Model for Concrete Anchorage of Reinforcing Bars under Generalised Excitations, *UCB/EERC 82-23*, University of California, Berkeley, 1982.
- [17] Langer P., Verdrehfähigkeit Plastizierter Tragwerksbereiche in Stahlbetonbau, *Institute für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart*, 1987.
- [18] Cosenza E., Fabbrocino G., Manfredi G., The Influence of Rebar Ductility on the Rotational Capacity of Composite Beams, *Proceedings of SDSS '97*, Nagoya, 1997.
- [19] Dekker N.W., Kemp A.R., Trincherio P., *Factors Influencing the Strength of Continuous Composite Beams in Negative Bending* - *Journal of Constructional Steel Research*, n°34, pp. 161-185, 1995.
- [20] Zhu P., Gao X., Wu Z.: *Behaviour and Moment Redistribution in Continuous Steel-Concrete Composite Beam* – Proc. of the 3rd Int. Conf. on Steel-Concrete Composite Structures, ASCCS, pp.425-430, 1991.