

## **Capitolo 1**

# **PROBLEMATICHE ATTUALI SULLA DUTTILITA' DI STRUTTURE IN C.A.**

### **1. Introduzione**

L'analisi della resistenza limite delle strutture in calcestruzzo armato sotto assegnati processi di carico costituisce uno dei temi di ricerca di base e di grande attualità dell'ingegneria strutturale. In tale contesto un ruolo determinante è giocato dalla duttilità delle sezioni in c.a. che, sottoposte a stati di sollecitazione generalmente complessi, possono consentire o meno il raggiungimento dello stato di meccanismo di collasso, auspicabile per la struttura che riesce, in tal modo, ad esplicare la sua resistenza limite senza il verificarsi di condizioni di rottura anticipata per fragilità locale.

Del resto è ben noto che il comportamento delle membrature in c.a., costituite dalla compartecipazione di materiali a caratteristiche estremamente differenziate, quali il calcestruzzo e l'acciaio, possa risultare fortemente variabile, e quindi propendere verso un comportamento fragile o duttile, a seconda dell'entità di diversi parametri caratteristici quali la resistenza dell'acciaio e del calcestruzzo, le percentuali di acciaio presenti nella sezione, l'entità dello sforzo normale.

I nuovi acciai, ormai diffusi in tutta Europa, che hanno praticamente sostituito il tipo FeB44 tradizionale, realizzati con procedimento Tempcore, di cui si parlerà diffusamente nel Cap. 2, possiedono, rispetto agli acciai di precedente impiego, caratteristiche meccaniche che posso-

no risultare sensibilmente diverse. Questi sono, infatti, caratterizzati da un ridotto rapporto tra tensione di rottura e di snervamento, un minore allungamento a rottura, e tensioni di snervamento superiori rispetto a quelle nominali. L'introduzione di tali acciai può, quindi, migliorare le caratteristiche locali di resistenza ma, al contrario, ridurre la duttilità degli elementi strutturali e le capacità ultime dell'intera struttura.

Una volta raggiunta la condizione di fessurazione della sezione e di snervamento dell'acciaio, si verifica che ulteriori incrementi di carico comportano aumenti di deformazione nell'acciaio snervato tanto più elevati quanto minore è il rapporto di incrudimento dell'acciaio, e cioè il rapporto tra la tensione di rottura e la tensione di snervamento. In prossimità delle sezioni fessurate si generano, pertanto, delle concentrazioni o localizzazioni di deformazioni nell'acciaio, e quindi viene rapidamente raggiunta la condizione di massimo allungamento e rottura della barra. La mancata diffusione delle deformazioni plastiche nell'armatura comporta una ridotta duttilità dell'intero elemento e la tendenza ad un comportamento fragile globale della struttura.

Il fenomeno risulta più evidente e complesso in presenza di carichi ciclici in quanto l'alternanza di sollecitazioni di trazione e compressione nell'acciaio, in corrispondenza delle sezioni fessurate, produce effetti di instabilità delle barre, e degrado dell'aderenza tra calcestruzzo ed acciaio per espulsione del copriferro. Le caratteristiche meccaniche dell'acciaio possono, pertanto, influenzare in modo rilevante la capacità di duttilità e di resistenza di una struttura, in particolare soggetta ad azioni sismiche.

L'interesse rivolto alla problematica illustrata, da parte di vari autori, è testimoniato dalla recente bibliografia disponibile sull'argomento e dalle indagini sperimentali tuttora in fase di sviluppo, miranti a definire i requisiti di duttilità minima da richiedere alle barre di armatura.

In tale contesto si inserisce questo lavoro che partendo da una semplice modellazione di elementi soggetti a sollecitazioni monotone di trazione, flessione e pressoflessione, si pone l'obiettivo di chiarire l'influenza delle caratteristiche degli acciai sul comportamento post-elastico di semplici strutture.

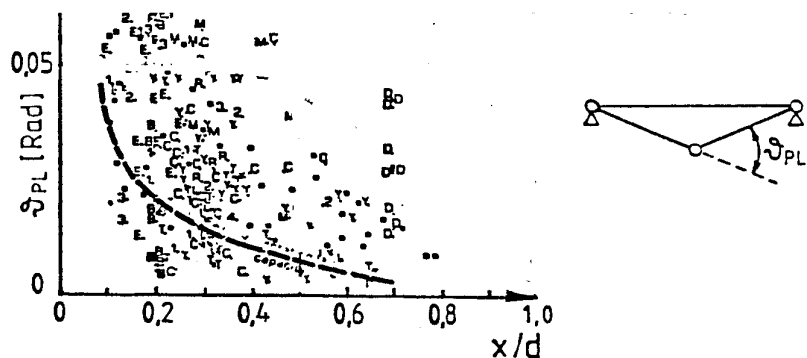


Fig.1.1 – MC 78 – Profondità relativa dell'asse neutro – rotazione plastica

Secondo gli autori il forte incremento della capacità di rotazione al ridursi della profondità dell'asse neutro, che si legge in Fig.1.1, indicava che nelle prove sperimentali erano stati utilizzati acciai molto duttili, e probabilmente barre lisce, o comunque con caratteristiche di aderenza molto limitata. La conclusione era che, per tali motivi, le capacità rotazionali proposte nel Model Code '78 difficilmente potevano essere raggiunte utilizzando barre d'armatura commerciali.

La maggiore critica era, però, rivolta all'andamento stesso della curva, che in alcuni casi risultava essere non conservativo. Nel lavoro svolto dal CEB, infatti, per il tipo di acciai utilizzati, non si era mai verificata crisi per rottura delle barre di armatura, e quindi tale circostanza, da non sottovalutare soprattutto per acciai più fragili, non era considerata nella definizione della formulazione della capacità rotazionale.

A sostegno di tale teoria gli autori espressero il comportamento di travi semplicemente appoggiate sotto forma di diagrammi frutto di analisi del comportamento della cerniera plastica per mezzo di un modello matematico e confronti con indagini sperimentali, in cui erano riportati sull'asse delle ascisse la percentuale di armatura e su quello delle ordinate la rotazione plastica. Il risultato ottenuto fu del tipo riportato in Fig.1.2.

## 2. Influenza delle caratteristiche dei materiali sulla duttilità di strutture in c.a.

La moderna filosofia di progettazione suggerita dalle più recenti norme è basata sulla capacità delle strutture di deformarsi in campo plastico prima di raggiungere la rottura, quindi ai requisiti di resistenza e rigidità, negli ultimi anni si è aggiunta la necessità di valutare e sfruttare la duttilità degli elementi.

Naturalmente affinché tipi di analisi diversi da quelli lineari abbiano senso, è fondamentale che le sezioni, e quindi nella sua globalità la struttura, possano effettivamente subire escursioni in campo plastico prima di attingere la condizione di crisi, e quindi le cerniere plastiche formatesi devono poter fornire rotazioni tali da garantire l'equilibrio con i carichi esterni, fino al raggiungimento della condizione ultima.

All'inizio degli anni '60 una commissione CEB, avviò un programma di ricerca coordinato per stabilire delle regole sulla duttilità in travi in cemento armato. La capacità di rotazione plastica di una cerniera plastica fu assunta come indice di duttilità. Il lavoro, sviluppatosi sulla base di prove sperimentali eseguite in differenti laboratori di vari Paesi, con successiva analisi statistica dei risultati ottenuti, di cui furono considerati valori caratteristici con frattili del 5%, condusse alla proposta di un legame di tipo iperbolico tra la rotazione plastica  $\theta_{pl}$  e la profondità di asse neutro a rottura  $x$ , adimensionalizzata rispetto all'altezza utile della sezione,  $d$ , del tipo:

$$\mathcal{G}_{pl} = 0.004(d/x)$$

Ritenendo che la Commissione CEB avesse in qualche modo risolto il problema della duttilità, almeno per scopi pratici, non furono all'epoca svolte successive indagini e la suddetta relazione fu recepita dal Model Code CEB del 1978, (MC'78), e riportata in Fig.1.1.

La questione si è riaperta più recentemente, prendendo origine da ricerche condotte da Eligehausen e Langer<sup>22</sup>, in seguito all'introduzione sul mercato Europeo di acciai con caratteristiche differenti da quelli utilizzati nelle prove precedenti.

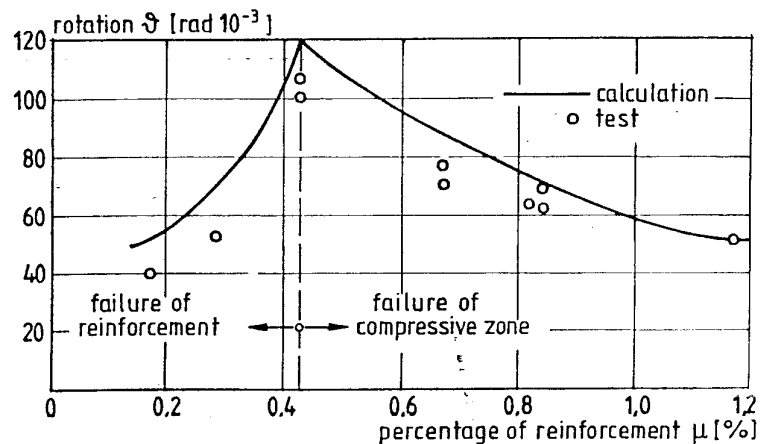


Fig.1.2 – Percentuale di armatura – rotazione plastica (Eligehausen et al.<sup>22</sup>)

La curva è dotata di una tipica cuspide che segna la massima capacità rotazionale in corrispondenza di una percentuale di armatura critica ( $\mu_{cr}$ ) che rappresenta l'elemento di separazione tra il collasso della trave per crisi dell'acciaio ( $\mu < \mu_{cr}$ : le caratteristiche di duttilità delle barre sono pienamente utilizzate) e per rottura del calcestruzzo ( $\mu > \mu_{cr}$ ).

Le indagini parametriche eseguite con il modello analitico utilizzato dagli autori, fornirono altre interessanti informazioni sull'influenza di vari parametri sulla duttilità di modelli di travi.

Fu mostrato che la rotazione plastica diminuiva sensibilmente al diminuire del rapporto tra tensione ultima e di snervamento dell'acciaio, e cresceva all'aumentare dell'allungamento ultimo. Significativa appariva anche l'influenza di una modellazione che tenesse conto del fenomeno di irrigidimento del calcestruzzo tra le fessure (tension stiffening), in quanto il considerare un elemento completamente fessurato conduceva ad incrementi di rotazione plastica maggiori del 40% rispetto al caso di elemento integro, ossia con entrambi i materiali reagenti (Fig.1.3).

Le correzioni apportate dagli autori sono state recepite dal Model Code 1990 (MC 90), e poi nell'EC2 (Fig.1.5.)

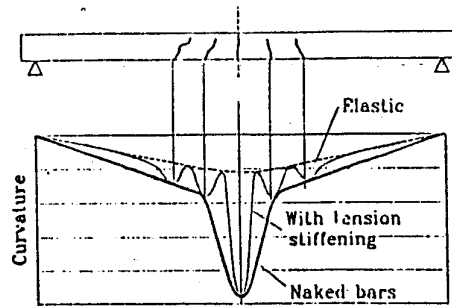


Fig.1.3 – Influenza del tension-stiffening sulla curvatura

La rotazione plastica, definita esplicitamente come differenza tra la rotazione in corrispondenza del carico ultimo e quella relativo al carico che determina lo snervamento nell'armatura in prossimità della zona di massimo momento (Fig.1.4), è ancora espressa in funzione della profondità dell'asse neutro adimensionalizzato, in quanto tale parametro sembra comprendere gli effetti delle caratteristiche geometriche, delle azioni e di alcune caratteristiche dei materiali.

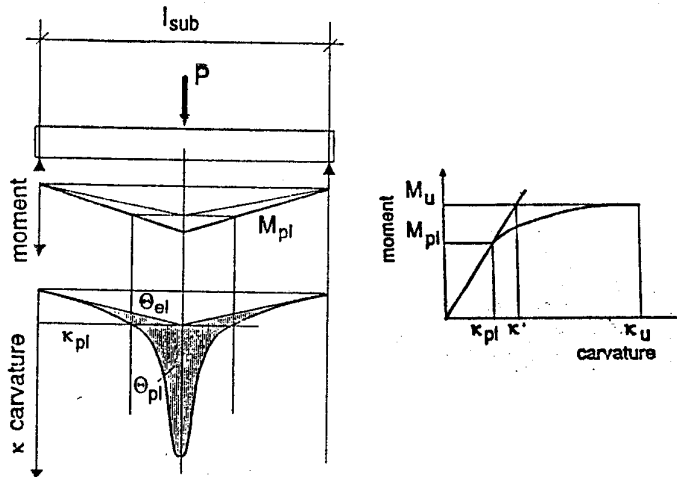


Fig.1.4 – Definizione della rotazione plastica secondo il MC 90

Variabili fondamentali quali il rapporto di incrudimento ( $\sigma^u_s / \sigma_s$ ) e l'allungamento ultimo uniforme ( $\epsilon^u_s$ ), fino ad allora non considerati per

l'uniformità degli acciai prodotti, sono in qualche modo introdotti differenziando le curve legate ad acciai a differenti duttilità (Fig.1.5). Il Model Code 90 riconosce tre classi di acciaio in funzione del rapporto di incrudimento e dell'allungamento ultimo riportate nella Tab.1.1, mentre nell'Ec2 ne sono indicati due tipi, le cui caratteristiche sono illustrate nella stessa tabella.

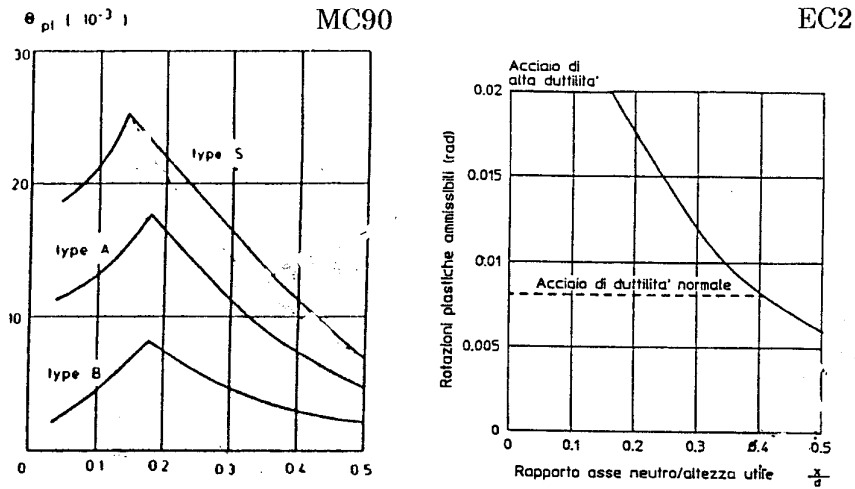
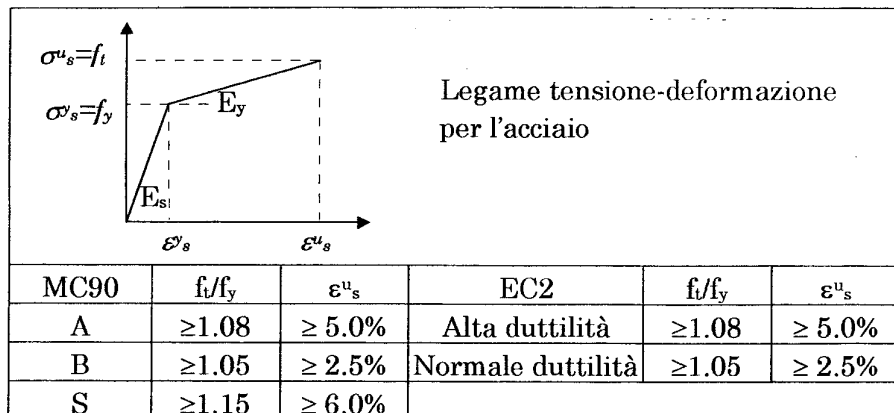


Fig.1.5 – MC 90 EC2– Profondità relativa dell'asse neutro – rotazione plastica

Gli andamenti delle rotazioni plastiche al variare della profondità dell'asse neutro trovano una loro spiegazione se si analizza, seppur in modo semplificato il comportamento di una cerniera plastica.

Si considera una trave semplicemente appoggiata, caricata da una forza in mezzera, e si ipotizza che questa sia completamente fessurata, caratterizzata da linearità di deformazioni tra acciaio e calcestruzzo e soggetta ad un momento massimo superiore a quello che genera lo snervamento nell'acciaio.

Tab.1.1 – Caratteristiche degli acciai previsti nell'MC90 e nell'EC2



Le tensioni nell'acciaio seguono l'andamento del diagramma del momento, mentre diversamente si comportano le deformazioni, che a partire dall'ascissa in cui si raggiunge la tensione di snervamento crescono molto velocemente, essendo funzioni del modulo di incrudimento dell'acciaio piuttosto che di quello elastico. La rotazione plastica è definita in questo caso come differenza tra la rotazione totale e l'aliquota elastica, e quindi risulta proporzionale all'area sottesa al diagramma di deformazioni tratteggiata in Fig.1.6, limitata al tratto interessato dal fenomeno di snervamento ed incrudimento,

Tale indice può essere espresso, in modo approssimato, come integrale esteso al tratto di cerniera plastica delle curvature plastiche valutate sull'acciaio, definite dalla differenza tra curvatura corrente e quella elastica:

$$g_{pl} = \int_{l_1}^{l_2} \frac{\epsilon_s - \sigma_s / E_s}{d - x} dz \quad (1.1)$$

essendo  $l_1$  ed  $l_2$  gli estremi della zona interessata da deformazioni maggiori di quella di snervamento (Fig.1.6)  $d$  l'altezza utile della sezione ed  $x$  la profondità dell'asse neutro.

Il valore ultimo di tale parametro è funzione delle due diverse modalità di crisi legate alla rottura del calcestruzzo e dell'acciaio.



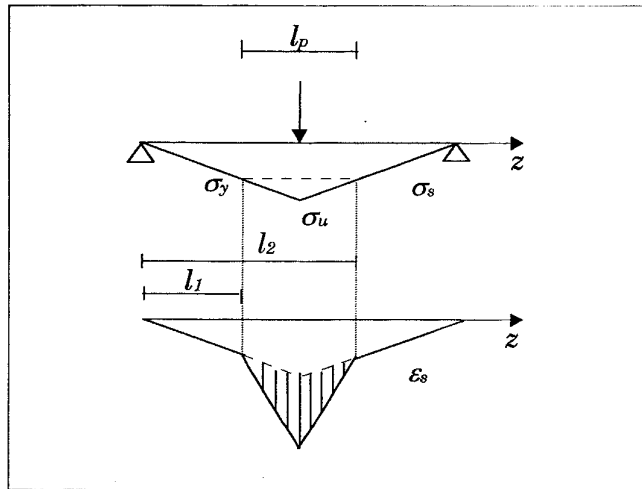


Fig.1.6 – Cerniera plastica

Nel caso di sezioni debolmente armate in cui si raggiunge la deformazione ultima nell'armatura prima di quella limite del calcestruzzo, la risoluzione dell'integrale è possibile esplicitando il legame costitutivo dell'acciaio. Nell'ipotesi di schematizzare tale materiale con una bilatera (Tab.1.1), la deformazione, per valori maggiori di quella di snervamento, può essere espressa nella forma:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_s^y + \frac{\sigma_s - \sigma_s^y}{E_y}$$

e l'andamento della tensione nell'acciaio lungo la cerniera plastica, nello schema soggetto ad una variazione lineare di momento è del tipo:

$$\sigma_s = \frac{2}{l_p} (\sigma_s^u - \sigma_s^y) z + \sigma_s^y$$

Sostituendo tali relazioni nell'integrale e risolvendo si ottiene:

$$\mathcal{G}_{pl} = \frac{l_p}{2(d-x)} (\varepsilon_s^u - \varepsilon_s^y) \left( 1 - \frac{E_y}{E_s} \right)$$

Nel caso più generale di legame costitutivo generico per l'acciaio la rotazione plastica può essere espressa da una relazione del tipo:

$$\mathcal{G}_{pl} = \beta (\varepsilon_s^u - \varepsilon_s^y) l_p / (d - x)$$

essendo  $\beta$  una costante di integrazione funzione della forma del diagramma tensione-deformazione dell'acciaio, ed  $l_p$  la lunghezza della cerniera plastica. Per similitudine (Fig.1.6) tale ultimo parametro può esprimersi nella forma:

$$l_p / l = (1 - \sigma_s^y / \sigma_s^u)$$

che sostituito nella equazione (1.1) fornisce:

$$\mathcal{G}_{pl} = \frac{\beta (\varepsilon_s^u - \varepsilon_s^y) (1 - \sigma_s^y / \sigma_s^u) l}{d(1 - x/d)} \quad (1.2)$$

Tale espressione mostra che la rotazione plastica cresce all'aumentare di  $x/d$  presentando andamento simile al primo ramo del diagramma proposto dalle norme e, a parità di asse neutro a rottura, la curva risulterà traslata verso l'alto al crescere dei parametri  $(\sigma_s^u / \sigma_s^y)$  e  $(\varepsilon_s^u - \varepsilon_s^y)$ , di cui risulta funzione.

Il secondo ramo, legato alla crisi del calcestruzzo, si ottiene integrando la stessa equazione nell'ipotesi di raggiungimento della deformazione ultima nel calcestruzzo. L'espressione risultante, per una deformazione massima pari a 0.35 % proposta dalle norme vigenti, assume l'aspetto:

$$\mathcal{G}_{pl} = \frac{0.0035 \beta (1 - \sigma_s^y / \sigma_{s,max}) l}{d(x/d)} \quad (1.3)$$

essendo  $\sigma_{s,max}$  la tensione nell'acciaio in corrispondenza della deformazione massima nel calcestruzzo.

La funzione ottenuta ha un andamento iperbolico rispetto alla profondità dell'asse neutro, i valori della rotazione plastica diminuiscono al crescere della profondità di asse neutro adimensionalizzato  $x/d$  e la curva risultante bene approssima il secondo ramo del diagramma di normativa. Le caratteristiche ultime degli acciai sono, quindi, fondamentali per determinare la posizione della curva nel piano.

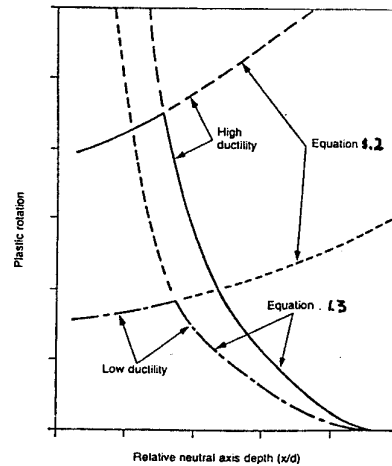


Fig.1.7 – Capacità rotazionale dalle (1.2), (1.3) (Beeby<sup>58</sup>)

È da evidenziare che la snellezza relativa, ossia il rapporto tra la luce della trave e la sua altezza utile, non compare direttamente nelle prescrizioni di normativa relative al calcolo della rotazione plastica, anche se spesso per tale parametro sono forniti dei valori limite.

Le formule riportate, naturalmente, hanno il solo scopo di motivare, in maniera semplificata, l'andamento della capacità rotazionale di un elemento trave, ma in effetti si è fatto riferimento solo ad una analisi locale e nel ricavarle non si è tenuto conto di fenomeni importanti quali il tension stiffening, la localizzazione delle deformazioni, e gli effetti legati alla presenza di scorrimento tra i materiali.

La valutazione della rotazione plastica in modo più rigoroso richiederebbe l'integrazione di una curvatura media, di non semplice definizione, lungo il tratto dell'elemento sollecitato da momenti superiori a quello di snervamento. Da un punto di vista normativo, alcuni attuali codici trasferiscono il problema della definizione di una curvatura media, nella valutazione di una inerzia media  $I_m$  potendo esprimere, nell'ipotesi di planeità delle sezioni, l'una in funzione dell'altra:

$$\rho_m = M / E_c I_m$$

essendo  $E_c$  il modulo di elasticità tangente nell'origine del calcestruzzo.

E' stato mostrato in (Greco et. al.<sup>24</sup>, Cosenza<sup>29</sup>) che la rigidezza media può essere espressa in funzione del tipo di modello utilizzato per tener conto dell'effetto irrigidente del calcestruzzo tra le fessure e delle inerzie delle sezioni nello stadio fessurato ( $I_2$ ) e non fessurato ( $I_1$ ) per mezzo della relazione:

$$\frac{1}{E_c I_m} = \frac{1}{E_c I_2} \left[ 1 - F_{ts} \left( \frac{M_{cr}}{M}, \frac{I_2}{I_1}, \beta \right) \right]$$

dove  $F_{ts}$ , (tension stiffening function) dipende del rapporto tra momento di prima fessurazione ( $M_{cr}$ ) e il momento corrente e da un parametro  $\beta$  che caratterizza ciascun modello, come riportato nella successiva Tab.1.2. Esprimendo la rotazione plastica in funzione di  $F_{ts}$ , ed adimensionalizzando l'espressione risultante Greco et al.<sup>34</sup> hanno valutato l'influenza di vari parametri sulla duttilità strutturale. I fattori determinanti sembrano essere legati alle caratteristiche dei materiali, alla geometria della sezione e alla globalità della struttura.

Tab.1.2 – Valutazione della funzione  $F_{ts}$

Modello di tension stiffening	Funzione $F_{ts}$
CEB <sup>(a)</sup>	$F_{ts} = \beta \left( \frac{M_{cr}}{M} \right)^2 \left( 1 - \frac{I_2}{I_1} \right)$
ACI	$F_{ts} = \frac{(M_{cr}/M)^4 (I_2/I_1 - 1)}{1 + (M_{cr}/M)^4 (I_2/I_1 - 1)}$
Constant t.s. <sup>(b)</sup>	$F_{ts} = \beta \left( \frac{M_{cr}}{M} \right) \left( 1 - \frac{I_2}{I_1} \right)$
Bilinear <sup>(c)</sup> (linear t.s)	$F_{ts} = 1 - \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\beta} \left( \frac{M_{cr}}{M} \right) \left( 1 - \beta \frac{I_2}{I_1} \right)$

<sup>(a)</sup>  $\beta$  = coefficienti funzione dell'aderenza  $\beta$

<sup>(b)</sup>  $\beta$  = percentuale del massimo effetto di tension stiffening

<sup>(c)</sup>  $\beta$  = rapporto tra l'inclinazione del ramo fessurato rispetto a quello non fessurato.

Le proprietà degli acciai, più che quelle del calcestruzzo, influenzano notevolmente il comportamento post-elastico e indagini sperimentali, illustrate nel successivo capitolo, confermano tale considerazione.

Anche le caratteristiche geometriche della sezione giocano un ruolo importante nell'ambito della duttilità strutturale, come del resto confermato da recenti sperimentazioni.

I risultati di prove eseguite da Bosco et al.<sup>38</sup> e da Bigaj et al.<sup>37</sup> su travi semplicemente appoggiate, di differenti sezioni, caricate in mezzeria da una forza concentrata hanno confermato che incrementi di altezza portano ad una minore duttilità della sezione. (Fig.1.8, Fig.1.9)

Una possibile spiegazione del fenomeno è data in (Bigaj et al.<sup>37</sup>), nel caso in cui la crisi si verifica per raggiungimento della deformazione ultima nel calcestruzzo e quindi la variazione di duttilità può essere legata a tale parametro che, seguendo la teoria di Hillerborg<sup>25, 31</sup> è inversamente proporzionale all'altezza della sezione.

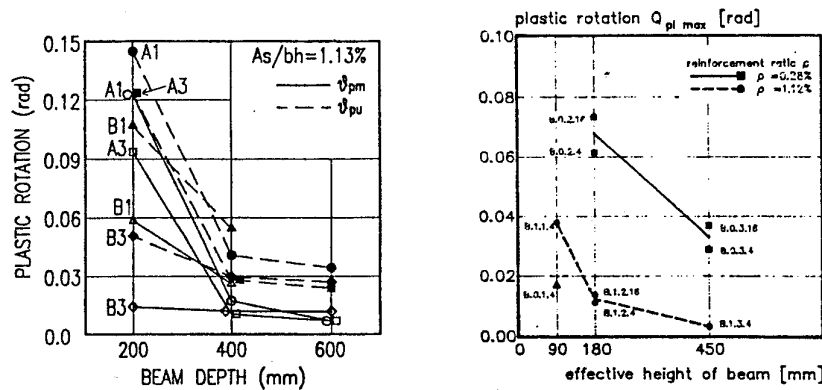


Fig.1.8 – Effetto scala (Bosco et al.<sup>38</sup>)      Fig.1.9 – Effetto scala (Bigaj et al.<sup>37</sup>)

Facendo riferimento ai diagrammi costitutivi del calcestruzzo compresso riportati in Fig.1.10 lungo il primo ramo crescente lo spostamento può essere espresso in termini di deformazione indipendentemente dalla lunghezza del tratto in cui è effettuata la misura.

Se si raggiunge il ramo in cui le tensioni sono decrescenti (“post peak zone”), invece ciò non è possibile in quanto la deformazione si localizza in alcune zone, mentre in altre si ha uno scarico del materiale; di conseguenza la deformazione dipende dalle dimensioni del tratto lungo il quale è effettuata la misura.

Detta  $x$  l'altezza della zona di calcestruzzo compresso, la deformazione media post peak potrà essere espressa come somma della  $\varepsilon$  letta sul ramo di scarico del primo tratto, in corrispondenza della tensione cui ci si riferisce, e di una deformazione media data dal rapporto tra lo spostamento  $w$  e la lunghezza del tratto compresso corretto attraverso un coefficiente  $\beta$ . Il legame costitutivo del calcestruzzo, ed in particolare la deformazione ultima, viene così a dipendere dalla profondità della zona compressa (Fig.1.10).

L'analisi della formulazione non dimensionale in (Greco et al.<sup>34</sup>), infine, conduce ad affermare che la rotazione plastica risulta proporzionale al rapporto tra la luce e l'altezza utile della sezione (rapporto di snellezza), anche se da un punto di vista sperimentale gli effetti di tale parametro rimangono ancora non del tutto chiariti.

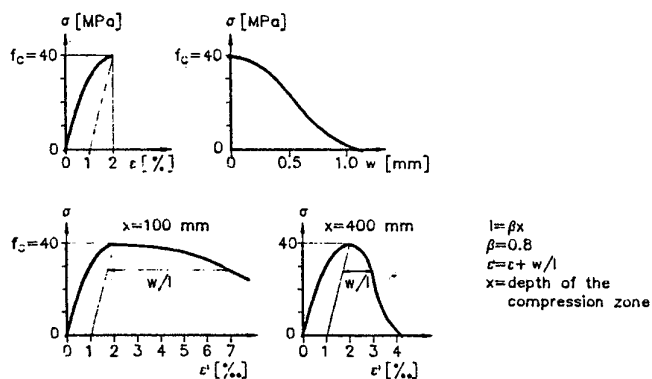


Fig. 1.10 – Determinazione di curve tensione deformazione per il calcestruzzo compresso (Bigaj et al.<sup>37</sup>, Hillerborg<sup>25</sup>)

La valutazione, dunque, di indici di duttilità che tengano conto di tutti gli aspetti analizzati in maniera semplificata, non è immediata, e richiede spesso l'uso di tecniche numeriche per la sua risoluzione.

E' stato già discusso di come alcune norme tengano conto della formazione delle lesioni e del comportamento post-elastico, con l'introduzione di una curvatura media definita attraverso una funzione di tension stiffening ( $F_{ts}$ ) che, spesso, è determinata su basi sperimentali. L'approccio teorico, invece, ha portato alla formulazione di modelli più o meno complessi, disponibili in letteratura.

La modellazione più utilizzata nel predire le capacità di rotazione plastica si basa sull'ipotesi di linearità tra le deformazioni nell'acciaio e nel calcestruzzo. Ciascuna sezione dell'elemento in esame è divisa in strisce orizzontali caratterizzati da un appropriato legame tra tensioni e deformazioni, quindi attraverso condizioni di equilibrio, per deformazioni crescenti è determinata la curvatura ed il relativo momento.

Noto il diagramma momento curvatura è possibile valutare la rotazione plastica integrando le curvature locali lungo un tratto caratterizzato da tensioni nell'acciaio maggiori di quella di snervamento. Il modello può essere più o meno sofisticato nel tener conto del tension stiffening, delle caratteristiche di aderenza o della presenza di fessurazioni per taglio (Cohn et al.<sup>30</sup>, Eligehausen et al.<sup>22</sup>)

Nel caso in cui sia presente una sola lesione nella zona interessata dallo snervamento e se la percentuale di armatura è molto bassa, ossia nel caso in cui l'asse neutro sia poco profondo, alcuni autori (Calvi et al.<sup>39</sup>) suggeriscono di utilizzare un modello semplificato per la valutazione della rotazione plastica disponibile.

La trave può essere considerata come costituita da due elementi rigidi collegati da una cerniera nella zona compressa della sezione critica e da un elemento di acciaio deformabile al livello dell'armatura tesa. La lunghezza dell'elemento di acciaio dovrebbe essere definita sulla base della distanza dalla fessura alla quale si ritiene che si abbia nuovamente perfetta aderenza.

Una diversa modellazione per la valutazione delle deformazioni anelastiche è stato seguito da Greco et al.<sup>33</sup>, e da Fantilli et al.<sup>54</sup>. Nel primo caso, considerando la planeità delle sezioni, ma rimuovendo

l'ipotesi di perfetta aderenza tra i materiali, l'analisi delle condizioni di equilibrio e di congruenza nella generica sezione compresa tra due successive lesioni, conduce ad un sistema di equazioni differenziali non lineari. La risoluzione di tale sistema è condotta per via numerica con discretizzazione alle differenze finite.

Il modello proposto in (Fantilli et al.<sup>54</sup>) è riferito all'analisi di conci delimitati da fessure, per i quali l'ipotesi di planeità delle sezioni è conservata per la sola sezione fessurata, ed è considerata la presenza di scorrimento tra i materiali.

Le condizioni di equilibrio e congruenza portano ancora alla formulazione di un sistema di equazioni differenziali non lineari, per la cui risoluzione sono necessarie tecniche dell'analisi numerica quali quelle di "shooting".



### 3. Obiettivi e contenuti della tesi

Lo studio del comportamento anelastico di elementi strutturali, come è stato brevemente illustrato finora, è affrontato generalmente attraverso la definizione di un legame tra sollecitazione agente e deformazione conseguente. Le strutture in cemento armato presentano l'inconveniente di non consentire la formulazione di un unico legame valido per ogni sezione, per la presenza del fenomeno fessurativo e dell'effetto di localizzazione delle deformazioni in prossimità delle lesioni stesse. È stato accennato, nel precedente paragrafo, all'approccio seguito da alcuni autori nella risoluzione del problema, che se effettuato in ipotesi rigorose conduce necessariamente ad una risoluzione di tipo numerico.

L'obiettivo che si vuole perseguire in questo studio è la formulazione di un semplice modello di tipo locale, ossia riferito ad un concio delimitato da due successive lesioni, che consenta di definire un legame tra sollecitazione e deformazione media, tenendo conto, seppur in maniera approssimata dei principali parametri che influenzano la resistenza e duttilità di elementi strutturali.

Il problema è svolto facendo particolare riferimento alle caratteristiche meccaniche degli acciai che risultano profondamente coinvolte nel definire il comportamento di membrature tese, inflesse e pressoinflesse.

La valutazione dell'influenza delle proprietà degli acciai sulla capacità plastica di strutture risulta quanto mai attuale in relazione all'introduzione sul mercato Europeo di nuovi tipi di acciaio realizzati con un processo termico superficiale denominato Tempcore, che presentano, rispetto ai tradizionali Feb44k, maggiori resistenze ma ridotta duttilità.

Avendo introdotto tale problematica nei precedenti paragrafi, nel Capitolo 2 sono riassunti i dati disponibili sulle caratteristiche di acciai Tempcore in vari Paesi Europei, e posti a confronto con le prescrizioni delle vigenti normative in materia. Sono quindi presi in rassegna i risultati di prove sperimentali realizzate su elementi in c.a. armate con tale materiale, soggette a carichi monotoni e ciclici.

Nel Capitolo 3 è sviluppato il modello relativamente al caso di sollecitazione di trazione ed il comportamento dell'elemento è seguito per deformazioni crescenti dalla fessurazione fino alla crisi per raggiungimento della deformazione limite nell'acciaio.

Le formulazioni proposte evidenziano la notevole influenza del rapporto tra la tensione ultima e di snervamento dell'acciaio e dell'allungamento ultimo sulla duttilità del concio, ed in particolare l'effetto di localizzazione delle deformazioni nell'armatura in prossimità delle lesioni in corrispondenza dello snervamento.

In tale circostanza se l'acciaio presentasse un diagramma di tipo elasto-plastico perfetto nella sezione fessurata si verificherebbe un repentino incremento di deformazione, fino ad attingere il valore ultimo. L'assenza di diffusione di plasticizzazione può, quindi, provocare una rottura fragile dell'elemento.

Tale problematica è evidenziata sia dal punto di vista analitico che applicativo. A conferma della validità dell'approccio seguito i risultati ottenuti con il modello proposto sono posti a confronto con i riferimenti normativi disponibili.

Nei Capitoli 4 e 5 la modellazione è riferita ad elementi inflessi e pressoinflessi.

Analizzata la bibliografia relativa alla valutazione della capacità rotazionale di elementi e motivato lo studio di un modello semplificato, le ipotesi alla base della trattazione sono poste criticamente a confronto con quelle relative alle esistenti modellazioni. Particolare attenzione è rivolta all'influenza della schematizzazione dei materiali sul comportamento strutturale.

Le formulazioni ottenute consentono di chiarire l'influenza dei parametri coinvolti nella definizione del comportamento post-elastico e di evidenziare il problema dell'infragilimento di elementi per mancata diffusione di deformazioni plastiche dovuta all'utilizzo di acciai a bassa duttilità.

Ampio spazio è dedicato ad indagini numeriche e parametriche; sono quindi confrontati i risultati ottenuti con dati numerici e applicazioni normative disponibili.

---

Nel Capitolo 6 il modello è esteso allo studio del comportamento di semplici strutture isostatiche ed iperstatiche, attraverso esempi di valutazione di indici di duttilità al variare delle caratteristiche degli acciai e del calcestruzzo. E' inoltre analizzata l'influenza dell'armatura in compressione e della presenza di sforzo normale.

I risultati ottenuti sono infine posti a confronto con i valori sperimentali e numerici a disposizione.