

## Ancoraggi e sovrapposizioni

### 1. Generalità sull'aderenza tra acciaio e calcestruzzo

La solidarietà fra acciaio e calcestruzzo nelle strutture in calcestruzzo armato viene garantita con l'opportuno ancoraggio delle barre alle loro estremità, nonché dall'aderenza che si instaura lungo tutto il suo sviluppo e che assicura in ogni sezione la trasmissione degli sforzi di scorrimento fra i due materiali. A tal fine risultano particolarmente utili le nervature previste nell'acciaio B450A o B450C previsto dalla nostra normativa.

L'aderenza è sostanzialmente governata da due meccanismi: l'interazione meccanica e l'adesione chimica. Per valori di tensione media di aderenza molto bassi ( $\tau_b \leq 0.2 \div 0.8 f_{ct}$ ) l'unico meccanismo reagente è l'adesione chimica che permette al conglomerato di seguire le deformazioni dell'armatura senza apprezzabile scorrimento relativo.

Per valori maggiori della tensione media ( $\tau_b \leq 0.8 \div 1.5 f_{ct}$ ) si perde il contributo dell'adesione chimica e, conseguentemente, si verifica lo scollamento tra il conglomerato e le barre d'acciaio. A causa di questo scollamento le nervature dell'armatura iniziano ad esercitare sul calcestruzzo circostante un'elevata pressione inclinata rispetto all'asse della barra che provoca il distacco del calcestruzzo a valle delle nervature (Fig. 1). E' questo aspetto che provoca la comparsa delle microfessure trasversali dovute agli elevati valori degli sforzi longitudinali di trazione nel calcestruzzo all'apice delle nervature.

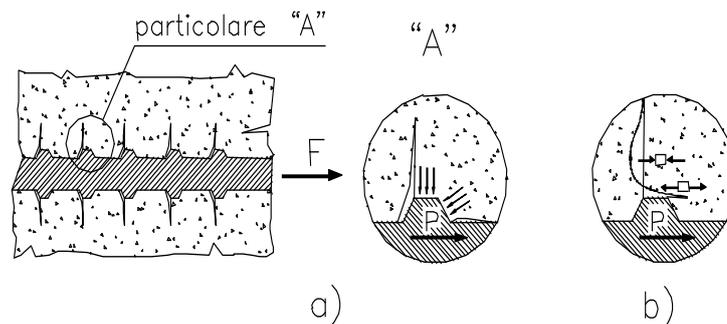


Figura 1. (a) Fessure trasversali e (b) tensioni longitudinali di trazione all'apice della nervatura (Giuriani, 1981).

Aumentando ancora il valore della tensione tangenziale media sino a  $(1 \div 3)f_{ct}$ , il meccanismo agente è esclusivamente di tipo meccanico, costituito dall'interazione tra il calcestruzzo e le nervature delle barre. La compressione che viene ad agire sul conglomerato a valle delle nervature provoca la formazione di un cuneo di calcestruzzo disgregato ("crushing"), in modo tale che il fronte attraverso cui passano le pressioni risulti più inclinato di quello costituito dalla superficie della nervatura stessa (Fig. 2a). Questo aspetto molto importante determina un aumento dell'incuneamento e la nascita di tensioni "circonfenziali" di trazione (Fig. 2b), responsabili della formazione delle fessure longitudinali da spacco, chiamate anche fessure di "splitting", in piani passanti per l'asse delle barre (Fig. 3).

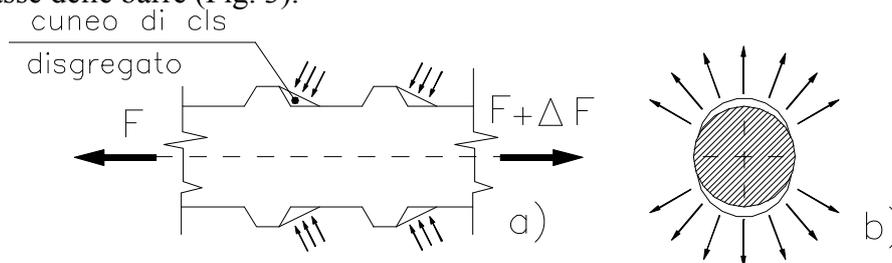


Figura 3.2: Cunei di conglomerato a monte della nervatura (a), spinte radiali da essi esercitate (b) (Plizzari e Franchi, 1996).

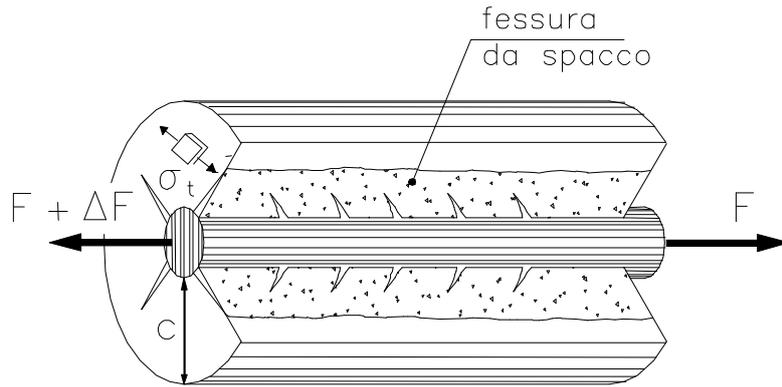


Figura 3. Fessure trasversali e longitudinali da spacco (Gambarova e Karacoç, 1981).

Aumentando lo sforzo di aderenza, sia le fessure trasversali che le fessure longitudinali si estendono. Si vengono a formare quindi dei puntoni di calcestruzzo inclinati di circa  $45^\circ$  tra le diverse fessure trasversali che si propagano, appunto, con un angolo ( $\alpha$ ) di circa  $45^\circ$  (Fig. 4). In questa situazione, in mancanza di un adeguato sistema di contenimento, si potrebbe giungere ad un collasso della struttura di tipo fragile (collasso per “splitting”), determinato dall’estensione delle fessure nel copriferro e nell’interferro causato dalle componenti radiali degli sforzi esercitati dai puntoni di calcestruzzo (Fig. 5a).

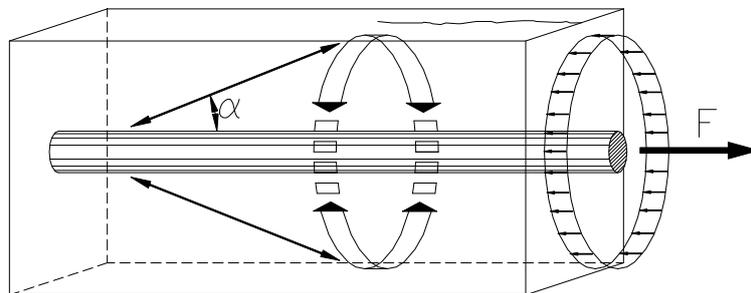


Figura 4. Angolo di formazione delle fessure da spacco (Tepfers, 1973).

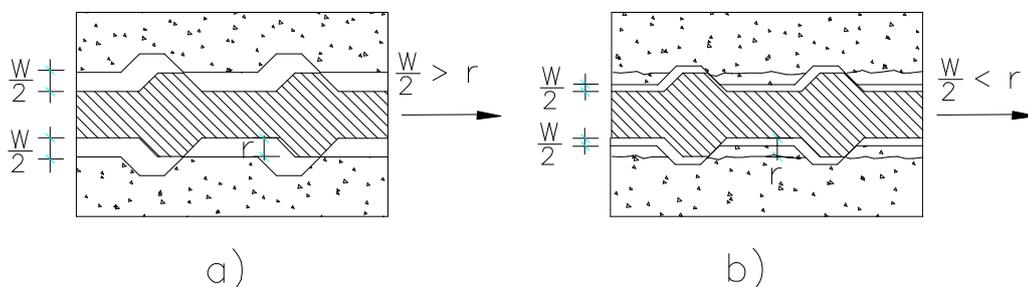


Figura 5. Schema del collasso locale dell’aderenza: collasso per incontrollata apertura della fessura da spacco (a); collasso per tranciamento dei denti di calcestruzzo (pull out) (b) (Plizzari e Franchi, 1996).

In presenza, quindi, di un adeguato contenimento, esercitato per esempio da un’armatura trasversale (Fig. 6), lo sforzo locale dell’aderenza può aumentare sino alla rottura per tranciamento dei denti di calcestruzzo tra le nervature della barra; in questo caso si verifica il collasso locale dell’aderenza per danneggiamento del calcestruzzo circostante la barra (Fig. 5b). Il collasso locale

determina una redistribuzione degli sforzi di aderenza lungo l'ancoraggio che deve così trovare una nuova configurazione di equilibrio; quando questo non è più possibile si verifica il collasso dell'intero ancoraggio.

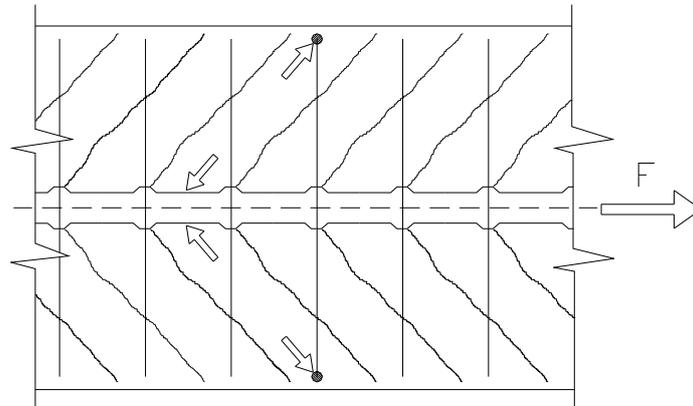


Figura 6. Particolare del traliccio resistente attivato dall'armatura trasversale di contenimento (Plizzari e Franchi, 1996).

All'aumentare ulteriore dello scorrimento tra barra e calcestruzzo, la resistenza dell'aderenza inizia a diminuire assestandosi ad un valore costante. Sgretolati i denti di conglomerato compresi tra le nervature, e quindi eliminato l'effetto di incuneamento, l'aderenza diviene un fenomeno di puro attrito (Fig. 7).

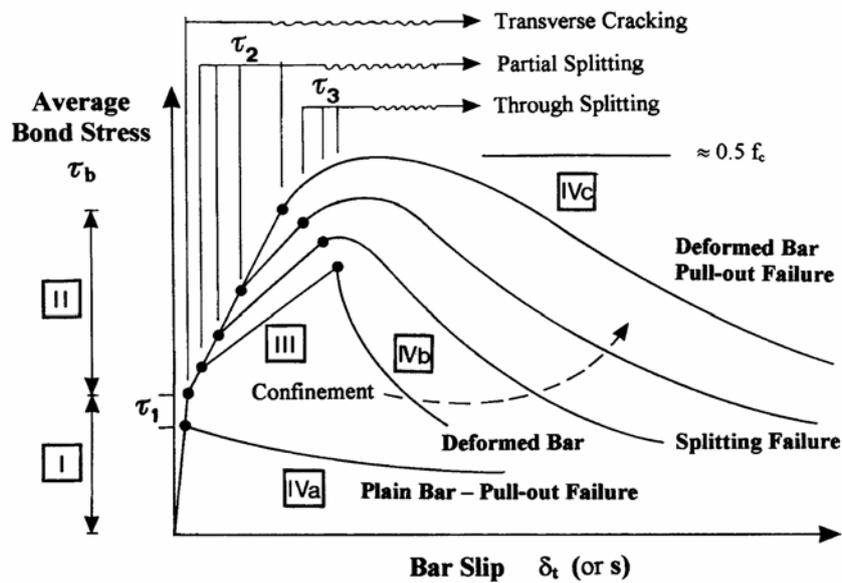


Figura 7. Diagramma dello sforzo locale di aderenza ( $\tau_b$ ) in funzione dello scorrimento relativo tra acciaio e calcestruzzo circostante la barra ( $\delta_t$ ).

Le valutazioni sin qui esposte evidenziano il fatto che l'aderenza tra acciaio e calcestruzzo è fortemente influenzato dall'azione di contenimento presente lungo la barra oltre che dalla spinta radiale delle nervature. Tale azione di contenimento può essere esercitata: 1) dal calcestruzzo non fessurato del copriferro ma anche, in minima parte, dalla modesta resistenza residua offerta dal calcestruzzo fessurato; 2) dall'armatura trasversale o 3) da una eventuale pressione esterna esercitata da una forza trasversale come una reazione vincolare (Fig. 8).

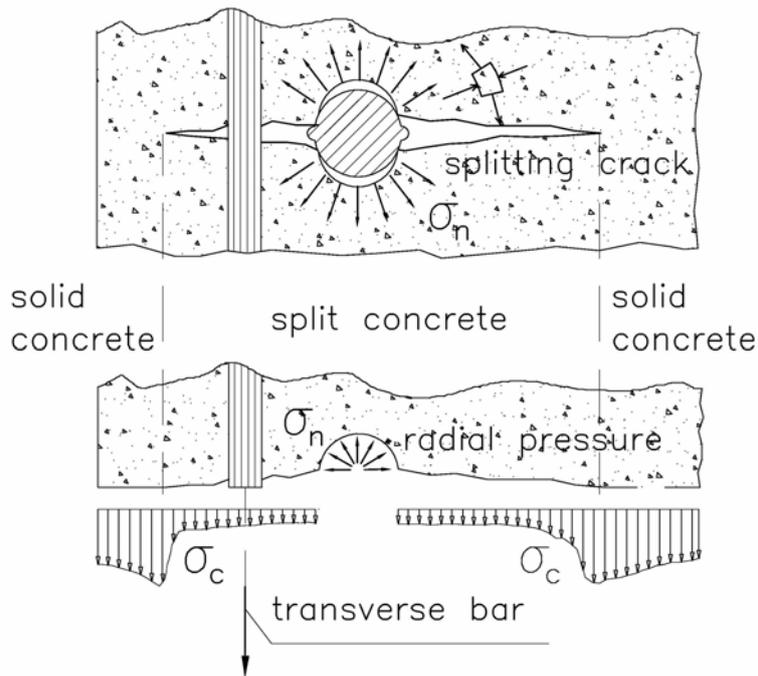
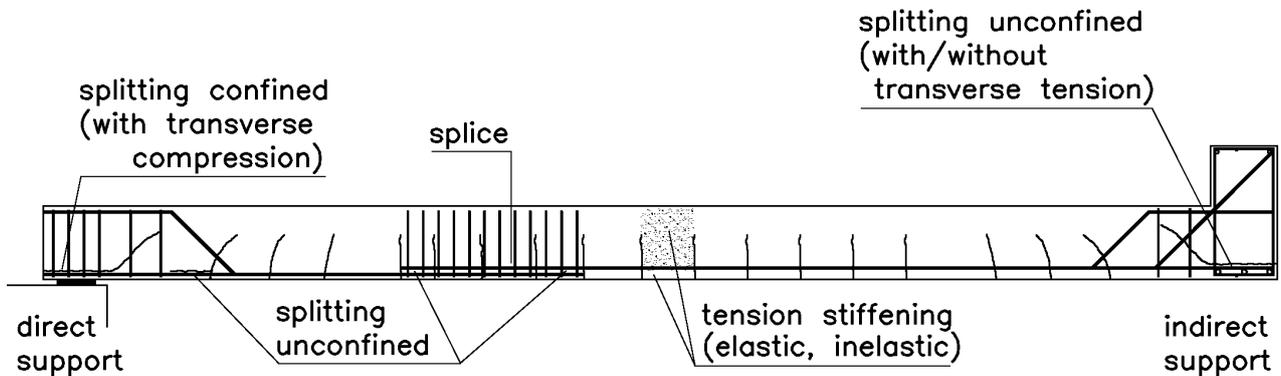


Figura 8. Possibili azioni di confinamento presenti attorno ad una barra.

## 2. Aspetti progettuali influenzati dall'aderenza

L'aderenza tra l'acciaio ed il calcestruzzo è alla base del funzionamento delle strutture in c.a. e diventa particolarmente significativa in situazioni particolari, come gli ancoraggi in travi con fessurazione estesa fino agli appoggi, in travi con sezione a T, in travi parete o in travi molto lunghe nelle quali è necessario realizzare giunzioni delle armature per sovrapposizione.



Stirrups sketched only in special regions.

Figura 9. Diagramma dello sforzo locale di aderenza ( $\tau_b$ ) in funzione dello scorrimento relativo tra acciaio e calcestruzzo circostante la barra ( $\delta_r$ ).

La Figura 9 mostra agli aspetti strutturali presenti in una trave in c.a. che potrebbero essere influenzati dall'aderenza, relativamente sia allo stato limite ultimo (SLU) sia allo stato limite di esercizio (SLE); tra questi si può notare:

- 1) l'ancoraggio su un appoggio diretto dove è presente un'azione di confinamento dovuta alla pressione trasversale esercitata dalla reazione vincolare in aggiunta all'azione di confinamento esercitata dalle staffe (SLU);

- 2) l'ancoraggio su un appoggio indiretto (trave trasversale) dove è presente solo l'azione di confinamento esercitata dall'armatura trasversale (SLU);
- 3) la giunzione per sovrapposizione (SLU);
- 4) la fessurazione (SLE);
- 5) l'effetto irrigidente del calcestruzzo compreso tra le fessure che influenza la deformabilità della trave (SLE).

Le diverse normative tengono conto delle proprietà di aderenza nelle verifiche per gli aspetti strutturali elencati in precedenza.

Benché l'aderenza sia coinvolta anche in verifiche di sicurezza agli Stati Limite Ultimi, non sempre viene presa adeguatamente in considerazione. La Figura 10 mostra infatti alcuni tratti terminali di barre in un edificio crollato durante il recente terremoto de L'Aquila: si può notare la limitatissima lunghezza di ancoraggio della barre nel nodo che rappresenta un requisito essenziale per il corretto funzionamento del nodo e, in generale, del telaio sismoresistente.



Figura 10. Particolari dei nodi strutturali in un edificio crollato durante il terremoto del L'Aquila..

### 3. L'aderenza nella nuova Normativa Tecnica per le Costruzioni (D.M. 14-1-2008)

#### 3.1 Tensione tangenziale di aderenza acciaio-calcestruzzo (§4.1.2.1.1.4)

Poiché l'aderenza di una barra ad aderenza migliorata è un fenomeno legato al comportamento a trazione del calcestruzzo circostante la barra, la normativa definisce una resistenza tangenziale di aderenza di calcolo  $f_{bd}$  come:

$$f_{bd} = f_{bk} / \gamma_C \quad (4.1.7)$$

dove:

$\gamma_C$  è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo, pari a 1,5;

$f_{bk}$  è la resistenza tangenziale caratteristica di aderenza data da:

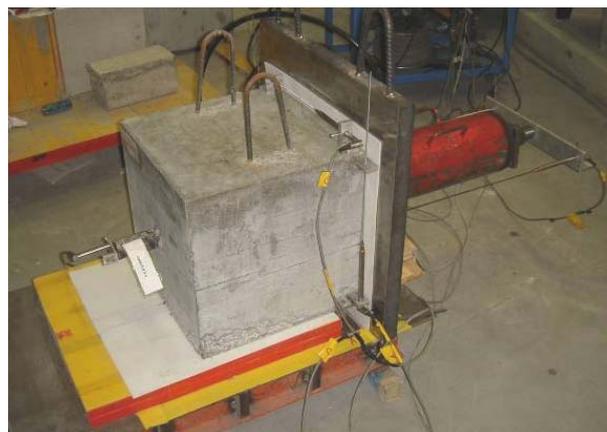
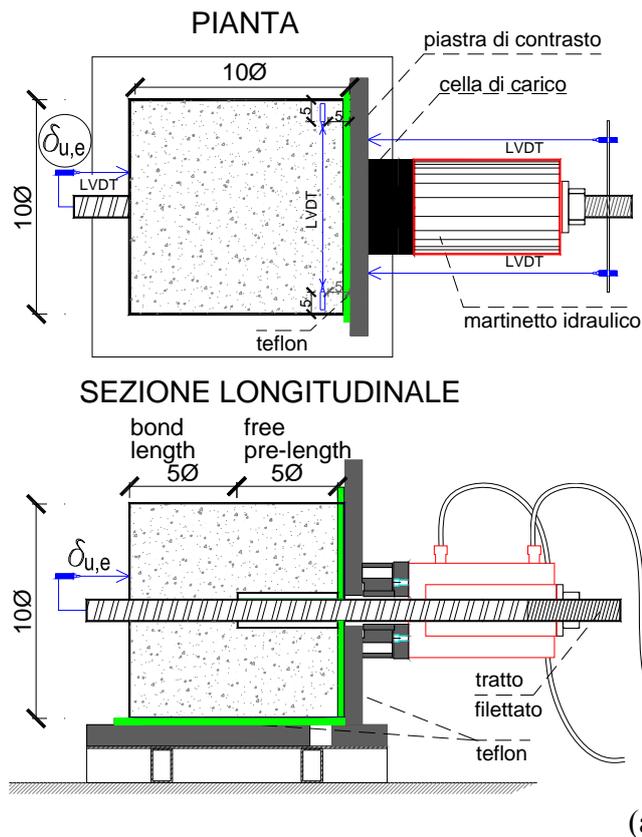
$$f_{bk} = 2,25 \times \eta \times f_{ctk} \quad (4.1.8)$$

in cui

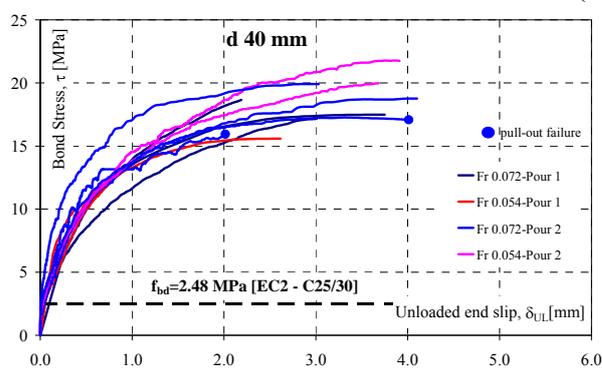
$\eta = 1,0$  per barre di diametro  $\phi \leq 32$  mm;

$\eta = (132 - \phi)/100$  per barre di diametro superiore.

Si può notare che la normativa italiana, come del resto l'EC2, ha un atteggiamento prudente nei confronti dell'aderenza con barre aventi diametro superiore a 32 mm, probabilmente a causa della maggior probabilità di formazione di fessure da spacco (splitting) per effetto della spinta maggiore esercitata dalle grosse nervature. In realtà, prove sperimentali di pull-out svolte recentemente presso l'Università di Brescia (Figg. 11a,b), hanno dimostrato che le barre con diametro di 40 e 50 mm hanno un ottimo comportamento in relazione all'aderenza, con resistenze ben superiori ai valori previsti dalla normativa (Fig. 11c).



(b)



(c)

Figura 11. Schema (a) e fotografia (b) del provino utilizzato per le prove di pull-out su barre di grande diametro; diagrammi sforzo di aderenza-slittamento ottenuti da barre con diametro di 40 mm (Metalli e Plizzari, 2009).

### 3.2 Ancoraggi (§4.1.2.1.8)

Il DM 2008 ha un approccio molto prestazionale alla verifica degli ancoraggi delle barre. Infatti la normativa chiede che “*l’ancoraggio delle barre, sia tese che compresse, sia oggetto di specifica verifica*” senza precisare le formule di verifica, come invece avveniva sul DM 9-1-1996. Quello dell’aderenza è quindi una delle situazioni nelle quali si deve fare riferimento ad altre normative di comprovata validità, previste nel Capitolo 12 della NTC; tra queste, la normativa maggiormente rappresentativa è rappresentata dall’Eurocodice n. 2 (EC<sup>2</sup>, 2005).

Giustamente, la normativa chiede che “*la verifica di ancoraggio deve tenere conto, qualora necessario, dell’effetto d’insieme delle barre e della presenza di eventuali armature trasversali e di confinamento*”.

E’ inoltre ben noto che “*l’ancoraggio delle barre può essere utilmente migliorato mediante uncini terminali. Se presenti, gli uncini dovranno avere raggio interno adeguato, tale da evitare danni all’armatura e, ai fini dell’aderenza, essi possono essere computati nella effettiva misura del loro sviluppo in asse alla barra*”. La normativa prescrive inoltre una lunghezza di ancoraggio minima: “*in assenza degli uncini la lunghezza di ancoraggio deve essere in ogni caso non minore di 20 diametri, con un minimo di 150 mm*”. E’ importante sottolineare che la mancanza di precise formule di verifica non esonera dal calcolo della lunghezza di ancoraggio o, peggio ancora, che tale lunghezza sia da assumere pari alla lunghezza minima (20 diametri con un minimo di 150 mm). La lunghezza di ancoraggio deve essere calcolata, per esempio con l’EC2 e, se risultasse inferiore al minimo previsto, deve essere comunque assunta pari alla lunghezza minima prescritta.

La NTC precisa infine che “*particolari cautele devono essere adottate quando si possono prevedere fenomeni di fatica e di sollecitazioni ripetute*”.

### 3.3 Giunzioni (§4.1.6.1.4)

Nel paragrafo delle giunzioni, la NTC premette che “*le armature longitudinali devono essere interrotte ovvero sovrapposte preferibilmente nelle zone compresse o di minore sollecitazione*”.

Poi, precisa che “*la continuità fra le barre può effettuarsi mediante sovrapposizione, calcolata in modo da assicurare l’ancoraggio di ciascuna barra. In ogni caso la lunghezza di sovrapposizione nel tratto rettilineo deve essere non minore di 20 volte il diametro della barra. La distanza mutua (interfero) nella sovrapposizione non deve superare 4 volte il diametro*”. Anche in questo caso, come per gli ancoraggi, la normativa chiede di calcolare la corretta lunghezza di sovrapposizione ed impone un valore minimo a tale lunghezza; per il calcolo della lunghezza minima si potrà fare riferimento sempre all’EC2.

In alternativa alla sovrapposizione, la NTC ammette poi altri due tipi di giunzione:

- saldature, eseguite in conformità alle norme in vigore sulle saldature. Devono essere accertate la saldabilità degli acciai che vengono impiegati, nonché la compatibilità fra metallo e metallo di apporto nelle posizioni o condizioni operative previste nel progetto esecutivo;
- giunzioni meccaniche per barre di armatura. Tali tipi di giunzioni devono essere preventivamente validati mediante prove sperimentali.

### 3.3 Deformabilità e fessurazione (§4.1.2.2.2 e §4.1.2.2.4)

La NTC non fornisce formule precise per la verifica a deformazione e a fessurazione, rimandando anche in questo caso a normative di comprovata validità, come l’EC2.

## 4. L’aderenza nell’Eurocodice 2 (UNI EN 1992-1-1)

### 4.1 Tensione tangenziale di aderenza acciaio-calcestruzzo (EC2-§8.4.2)

L’EC2 prevede per la tensione di aderenza la stessa formulazione prevista dalla NTC, aggiungendo un coefficiente che riduce del 30% la resistenza nelle zone di aderenza mediocre (Fig. 12).

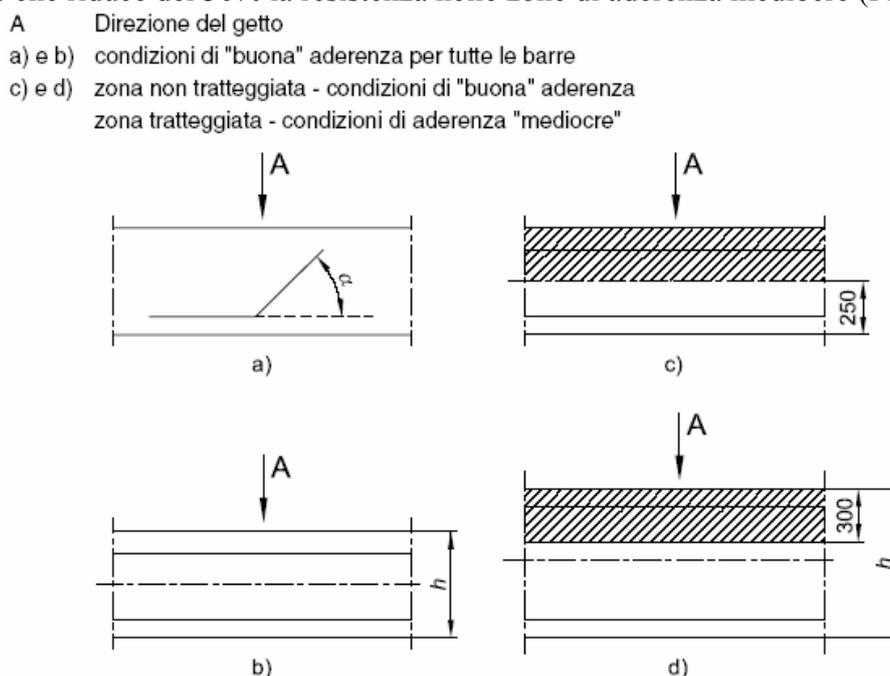


Figura 12. Descrizioni delle condizioni di aderenza.

## 4.2 Ancoraggi (EC2-§8.4.3)

L'EC2 definisce una lunghezza di ancoraggio di base ( $l_{b,rd}$ ), necessaria per ancorare la forza  $A_s \sigma_{sd}$ , data da:

$$l_{b,rd} = (\phi / 4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) \quad (EC2-8.3)$$

essendo  $\sigma_{sd}$  la tensione di progetto in corrispondenza del punto da cui si misura l'ancoraggio.

L'EC2 raccomanda che la lunghezza di ancoraggio di base,  $l_b$ , e la lunghezza di progetto,  $l_{bd}$ , di barre piegate siano misurate lungo l'asse della barra.

La lunghezza di ancoraggio di progetto ( $l_{bd}$ ) è data da:

$$l_{bd} = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times \alpha_4 \times \alpha_5 l_{b,rd} \geq l_{b,min} \quad (EC2-8.4)$$

essendo  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  e  $\alpha_5$  i coefficienti dati nel prospetto 8.2 (Fig. 13).

prospetto 8.2 Valori dei coefficienti  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  e  $\alpha_5$

Fattore d'influenza	Tipo di ancoraggio	Barra di armatura	
		In trazione	In compressione
Forma delle barre	Diritto	$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 1,0$
	Diverso da diritto [vedere figura 8.1 (b), (c) e (d)]	$\alpha_1 = 0,7$ se $c_d > 3\phi$ altrimenti $\alpha_1 = 1,0$ (vedere figura 8.3 per i valori di $c_d$ )	$\alpha_1 = 1,0$
Ricoprimento di calcestruzzo	Diritto	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - \phi) / \phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2 = 1,0$
	Diversa da diritto [vedere figura 8.1 (b), (c) e (d)]	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - 3\phi) / \phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$ (vedere figura 8.3 per i valori di $c_d$ )	$\alpha_2 = 1,0$
Confinamento realizzato mediante armatura trasversale non saldata a quella principale	Tutti i tipi	$\alpha_3 = 1 - K \lambda$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_3 = 1,0$
Confinamento realizzato mediante armatura trasversale saldata*)	Tutti i tipi, posizioni e dimensioni come specificato in figura 8.1 (e)	$\alpha_4 = 0,7$	$\alpha_4 = 0,7$
Confinamento realizzato mediante pressione trasversale	Tutti i tipi	$\alpha_5 = 1 - 0,04p$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	-

dove:  
 $\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,min}) / A_s$ ;  
 $\Sigma A_{st}$  area della sezione retta dell'armatura trasversale lungo la lunghezza di ancoraggio di progetto  $l_{bd}$ ;  
 $\Sigma A_{st,min}$  area della sezione retta dell'armatura trasversale minima; = 0,25  $A_s$  travi e 0 per piastre;  
 $A_s$  area di una singola barra ancorata di diametro massimo;  
 $K$  valori riportati in figura 8.4;  
 $p$  pressione trasversale [MPa] allo stato limite ultimo lungo  $l_{bd}$ .  
 \*) Vedere anche il punto 8.6: Per appoggi diretti  $l_{bd}$  può essere assunto minore di  $l_{b,min}$  a condizione che sia presente almeno un filo trasversale saldato all'interno della zona di appoggio. Si raccomanda che questo sia distante almeno 15 mm dalla faccia dell'appoggio.

Figura 13. Valori dei coefficienti  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  e  $\alpha_5$ .

I coefficienti a coinvolti hanno il seguente significato:

$\alpha_1$  tiene conto dell'effetto della forma delle barre posto che il copriferro sia adeguato;

$\alpha_2$  tiene conto dell'effetto del ricoprimento minimo di calcestruzzo (Fig. 14);

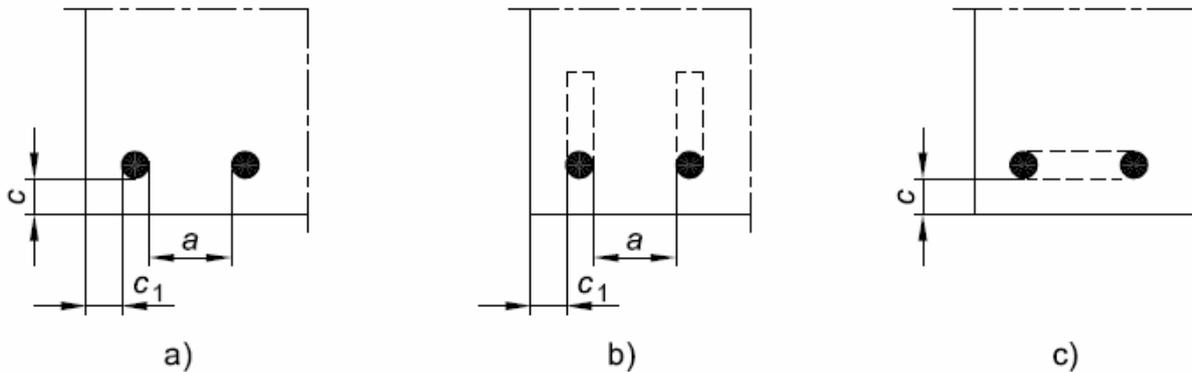
$\alpha_3$  tiene conto dell'effetto del confinamento dovuto ad armatura trasversale;

$\alpha_4$  tiene conto dell'influenza di una o più barre trasversali saldate lungo la lunghezza di ancoraggio di progetto;

$\alpha_5$  tiene conto dell'effetto della pressione trasversale al piano di spacco lungo la lunghezza di ancoraggio di progetto.

In ogni caso, il prodotto

$$\alpha_2 \times \alpha_3 \times \alpha_5 \geq 0,7 \quad (\text{EC2-8.5})$$



a) Barre diritte:  $c_d = \min(a/2, c_1, c)$ ; b) Barre piegate o uncini  $c_d = \min(a/2, c_1)$ ; c) Forcelle:  $c_d = c$

Figura 14. Valori dei coefficienti  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  e  $\alpha_5$ .

Anche l'EC2 prescrive una lunghezza minima ma, essendo quest'ultima già specificata dalla NTC, non può essere utilizzata.

La Figura 15 mostra la lunghezza di ancoraggio di base prevista dall'EC2 e dalla normativa americana ACI 318-08 (2008), in funzione della resistenza (cilindrica) a compressione del calcestruzzo; si può notare come la lunghezza minima imposta dalla NTC risulti inferiore alla lunghezza di ancoraggio di base per tutti i calcestruzzi con resistenza cilindrica caratteristica inferiore a 50 MPa. Nella stessa figura si può anche notare come la normativa americana prescriva una lunghezza di ancoraggio superiore a quella prevista dall'EC2.

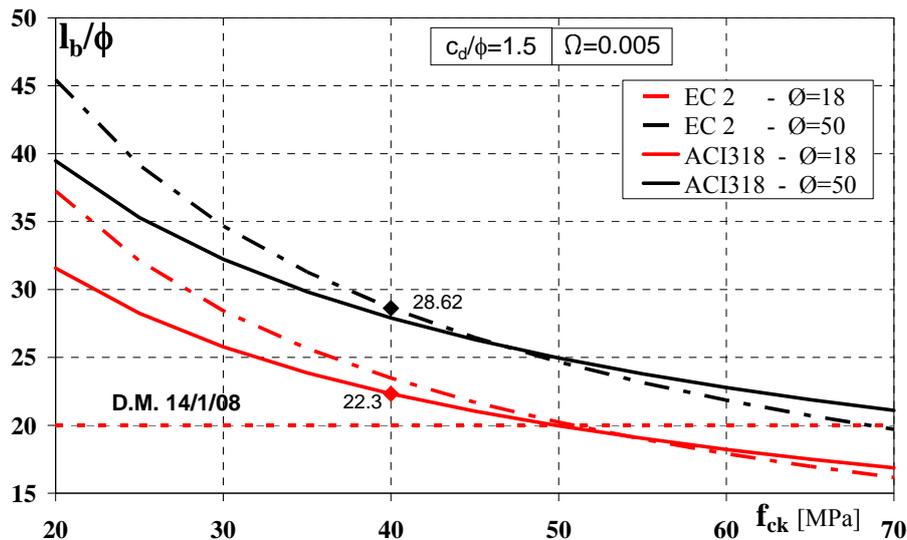


Figura 15. Lunghezza di ancoraggio prevista dall'EC2 in funzione delle diverse classi di resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo.

#### 4.3 Sovrapposizioni (EC2-§8.7.3)

La lunghezza minima di sovrapposizione prevista dell'EC2 è pari a:

$$l_0 = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times \alpha_5 \times \alpha_6 \times l_{b,rqd} \quad (\text{EC2} - 8.10)$$

dove  $l_{b,rqd}$  è calcolato con l'espressione (8.3).

I valori di  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  e  $\alpha_5$  possono essere ricavati dalla Figura 13; tuttavia, per il calcolo di  $\alpha_3$ , si raccomanda che  $\Sigma A_{st,min}$  sia assunta pari a  $1,0A_s(\sigma_{sd}/f_{yd})$ , con  $A_s$  = area della singola barra sovrapposta.

$\alpha_6 = (\rho_1/25)^{0,5}$  ma non maggiore di 1,5, né minore di 1,0, essendo  $\rho_1$  la percentuale di armatura sovrapposta entro la lunghezza  $0,65 l_0$  valutata a partire dal centro della lunghezza di sovrapposizione considerata. I valori di  $\alpha_6$  sono dati in Figura 16.

prospetto 8.3 Valori del coefficiente $\alpha_6$				
Percentuale di barre sovrapposte rispetto all'area totale trasversale	<25%	33%	50%	>50%
$\alpha_6$	1	1,15	1,4	1,5
Nota I valori intermedi possono essere determinati per interpolazione.				

Figura 16. Valori del coefficiente  $\alpha_6$ .

## 5. Bibliografia

- ACI Committee 318, 2008, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary," *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Mich., 479 pp.
- Cairns J. and Jones K. (1995). "The splitting forces generated by bond". *Magazine of Concrete Research*, Vol.47, No.171, pp.153-165.
- Comité Euro-International du Béton (1993). *CEB-FIP Model Code 1990- Design Code*. Thomas Telford, London, 437 pp., ISBN 0 7277 1696 4.
- Eurocode 2 (2005). Design of concrete structures - Part 1-1: General Rules, and Rules for Buildings, UNI-ENV 1992-1-1, European Committee for Standardization.
- Gambarova P.G., Rosati G.P. (1997). "Bond and splitting in bar pull-out: behavioral laws and concrete-cover role". *Magazine of Concrete Research*, Vol.49, No.179, pp.99-110.
- Giuriani E., Plizzari G.A., Schumm C. (1991). "Role of stirrups and residual tensile strength of cracker concrete on bond". *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.117, No.1, pp.1-18.
- Giuriani E. and Plizzari G.A. (1998). "Interrelation of splitting and flexural cracks in R.C. beams". *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.124, No.9, pp.1032-1040.
- Metelli G. and Plizzari G.A (2009). "Experimental Investigation of Lap Length". *Technical Report*, DICATA, University of Brescia (in press).
- Plizzari G.A., Deldossi M.A. and Massimo S. (1998). "Transverse reinforcement effects on anchored deformed bars". *Magazine of Concrete Research*, Vol.50, No.2, pp.161-177.
- Rhem, G. (1969). "Evaluation Criteria for High-bond Rebars" (in German). *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*.
- Tepfers R. (1973). "A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars". *Chalmers University of Technology*, Goteborg, Publ. 73/2, 328 pp.