



STEFANO CASCIO

CALCOLO E VERIFICA DI SEZIONI RETTANGOLARI AGLI SLU E SLE

CON APPLICATIVI EXCEL
PER LO SVILUPPO E LA STAMPA DEI CALCOLI



SOFTWARE INCLUSO
CON SISTEMA G-CLOUD



GRAFILL

Stefano Cascio

CALCOLO E VERIFICA DI SEZIONI RETTANGOLARI AGLI SLU E SLE

Ed. I (11-2025)

ISBN 13 978-88-277-0515-5

EAN 9 788827 705155

Collana **SOFTWARE**



**Licenza d'uso da leggere attentamente
prima di attivare la WebApp o il Software incluso**

Usa un QR Code Reader
oppure collegati al link <https://grafill.it/licenza>

Per assistenza tecnica sui prodotti Grafill aprire un ticket su <https://www.supporto.grafill.it>

L'assistenza è gratuita per 365 giorni dall'acquisto ed è limitata all'installazione e all'avvio del prodotto, a condizione che la configurazione hardware dell'utente rispetti i requisiti richiesti.

© **GRAFILL S.r.l.** Via Principe di Palagonia, 87/91 - 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 - Fax 091/6823313 - Internet <http://www.grafill.it> - E-Mail grafill@grafill.it

**CONTATTI
IMMEDIATI**



Pronto GRAFILL
Tel. 091 6823069



Chiamami
chiamami.grafill.it



Whatsapp
grafill.it/whatsapp



Messenger
grafill.it/messenger



Telegram
grafill.it/telegram

Finito di stampare presso **Tipografia Publistampa S.n.c. - Palermo**

Edizione destinata in via prioritaria ad essere ceduta nell'ambito di rapporti associativi.

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.



**PRONTO
GRAFILL**



**CLICCA per maggiori informazioni
... e per te uno SCONTO SPECIALE**

SOMMARIO

PREMESSA	p.	7
1. CONVENZIONE DEI SEGNI	"	9
2. VERIFICHE ALLO STATO LIMITE ULTIMO SLU	"	10
2.1. Resistenza e legami costitutivi del calcestruzzo	"	11
2.2. Resistenza e legami costitutivi dell'acciaio	"	14
2.2.1. Forza di compressione nel calcestruzzo	"	16
2.2.2. Calcolo tensione nelle armature	"	21
2.3. Rottura sezioni in c.a.	"	22
2.3.1. Campo 1	"	23
2.3.2. Campo 2	"	23
2.3.3. Campo 3	"	23
2.3.4. Campo 4	"	23
2.3.5. Campo 5	"	24
2.4. Prescrizioni normative	"	24
2.4.1. Rottura in campo 1	"	25
2.4.2. Rottura in campo 2	"	25
2.4.3. Rottura in campo 3	"	27
2.4.4. Rottura in campo 4	"	29
2.4.5. Considerazioni conclusive	"	29
2.5. Esempi da 1 a 8	"	31
3. DOMINI DI INTERAZIONE O DI RESISTENZA	"	43
3.1. Grafico del dominio di resistenza	"	43
4. RICHIAMI NORMATIVI	"	45
IN ARMATURE E COPRIFERRI	"	45
4.1. Armatura delle travi	"	45
4.2. Armatura dei pilastri	"	46
4.3. Copriferro e interferro	"	47

5. PROGETTO E VERIFICA DI SEZIONI RETTANGOLARI

SOLLECITATE A FLESSIONE A SLU	p.	48
5.1. La rottura bilanciata	"	48
5.1.1. Semplice armatura	"	49
5.2. Esempio 9	"	50
5.2.1. Doppia armatura	"	52
5.3. Esempio 10	"	53
5.4. Esempio 11	"	54
5.4.1. Determinazione delle armature	"	56
5.5. Esempio 12	"	58
5.6. Percentuale meccanica d'armatura e progetto sezioni	"	61
5.6.1. Foglio di calcolo "Progetto altezza sezione"	"	63

6. VERIFICA A FLESSIONE DI SEZIONI RETTANGOLARI A SLU

6.1. Ricerca dell'asse neutro	"	70
6.2. Momento resistente ultimo	"	71
6.3. Esempio 13	"	73
6.4. Esempio 14	"	77
6.5. Esempio 15	"	80

7. VERIFICA A PRESSOFLESSIONE SEMPLICE ALLO SLU

7.1. Esempio 16	"	83
7.2. Tracciamento del dominio	"	85
7.2.1. Costruzione campo di rottura 1	"	94
7.2.2. Costruzione campo di rottura 2	"	95
7.2.3. Costruzione campo di rottura 3	"	97
7.2.4. Costruzione campo di rottura 4	"	100
7.2.5. Costruzione campo di rottura 4a	"	101
7.2.6. Costruzione campo di rottura 5	"	103
7.3. Esempio 17	"	105
	"	107

8. VERIFICHE ALLO STATO LIMITE DI ESERCIZIO SLE

8.1. Esempio 18	"	125
8.2. Stato limite di deformazione: metodo semplificato	"	127
8.3. Esempio 19	"	127
8.4. Stato limite di fessurazione	"	129
8.4.1. Classi di esposizione	"	130
8.5. Verifica delle tensioni	"	132
8.5.1. Verifica delle tensioni per sezioni rettangolari pressoinflesse	"	144
8.5.2. Ricerca raggi del nocciolo	"	145
8.5.3. Sezione pressoinflessa con piccola eccentricità	"	147

8.5.4.	Sezione pressoinflessa con grande eccentricità	p.	148
8.5.5.	Esempio 20 – Report sezione tutta reagente	"	151
8.5.6.	Esempio 21 – Report sezione parzializzata	"	160
8.5.7.	Sezione soggetta a sforzo normale di trazione	"	169
APPENDICE			" 171
GLI APPLICATIVI EXCEL ALLEGATI			" 177
–	Requisiti per l'installazione e l'utilizzo degli applicativi Excel	"	178
–	Attivazione degli applicativi Excel	"	178

PREMESSA

Il presente volume è una guida pratica per la verifica e la progettazione di sezioni rettangolari con il metodo degli stati limiti ultimi (SLU) e degli stati limiti di esercizio (SLE). Per ognuna delle verifiche da effettuare il testo premette l'indispensabile parte teorica e normativa, puntualmente richiamate.

Oltre ad indicare come effettuare analiticamente le verifiche, il testo illustra anche come implementare su un foglio di lavoro di MS Excel, talune procedure di calcolo.

Si specifica che si è utilizzato: Microsoft® Excel® per Microsoft 365 MSO (Versione 2505 Build 16.0.18827.20102) a 32 bit. Per versioni diverse gli applicativi Excel potrebbero non funzionare perfettamente, in special modo per la stampa.

Particolare spazio è stato riservato alla costruzione esatta del dominio di resistenza o di interazione. Oltre al foglio Excel che contiene le routine necessarie alla elaborazione in automatico del dominio di resistenza e la relativa stampa del tabulato e la grafica, se ne propone, altresì, l'auto implementazione, corredando il tutto delle formule necessarie, in quali celle vanno inserite dette formule e il formato numerico da assegnare a esse. La costruzione di tale dominio è suddivisa per ognuno dei campi di rottura: dall'uno al cinque.

Completano il volume gli **applicativi di calcolo Excel** per il calcolo di progetto e la verifica di sezioni rettangolari, le cui specifiche sono dettagliate nel riepilogo seguente:

- 1) **Costruzione_Dominio** – Effettua la costruzione del dominio di resistenza o di interazione, per effettuare la verifica agli stati limiti ultimi (SLU) per sezioni rettangolari soggette a presso-flessione retta, con momenti positivi.
- 2) **Disegna_Punti_Caratteristici_dominio** – Effettua la costruzione del dominio di resistenza o di interazione, per effettuare la verifica agli stati limiti ultimi (SLU) per sezioni rettangolari soggette a presso-flessione retta, con momenti positivi, e per i punti corrispondenti alle rette limite dei campi di rottura.
- 3) **Progetto_altezza_sezioni_SLU** – Calcola l'altezza da assegnare alla sezione rettangolare soggetta a flessione semplice, per verifiche agli stati limiti ultimi (SLU). Sono calcolate anche le armature necessarie.
- 4) **Progetto_base_sezioni_SLU** – Calcola la base da assegnare alla sezione rettangolare soggetta a flessione semplice, per verifiche agli stati limiti ultimi (SLU). Sono calcolate anche le armature necessarie.
- 5) **Verifica_sezioni_Pres_fle_SLE** – Esegue le verifiche agli stati limiti di esercizio (SLE) di sezioni rettangolari sollecitate a presso flessione retta.

- 6) **Verifica_sezioni_flessione_SLU** – Esegue le verifiche agli stati limiti ultimi (SLU) di sezioni rettangolari sollecitate a flessione semplice.
- 7) **Verifica_SLE_flessione** – Esegue le verifiche agli stati limiti di esercizio (SLE) di sezioni rettangolari sollecitate a flessione semplice.

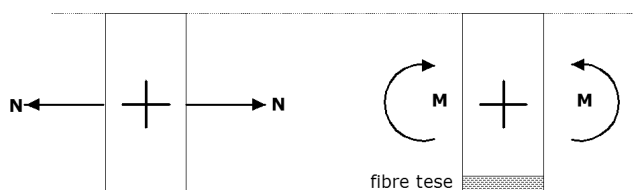
Tutte le verifiche includono anche il controllo delle aree delle armature, tese e compresse, secondo i punti delle NTC 2018: **4.1.6.1.1** "*armatura delle travi*", **4.1.6.1.2** "*armatura dei pilastri*" e **7.4.6.2.1** "*armature longitudinali*".

Per ogni foglio è prevista la produzione di un report di calcolo contenente una breve relazione e il tabulato di calcolo che comprende i dati geometrici e di armatura della sezione oggetto di verifica, i dati del calcestruzzo, dell'acciaio e dei rispettivi legami costitutivi, e a seguire i calcoli e le verifiche svolte. È possibile consultare un esempio di stampa all'interno del testo.

CONVENZIONE DEI SEGNI

Alle forze esterne applicate su una sezione è assegnato convenzionalmente un segno: positivo o negativo. Si ricordano brevemente quelle che interessano questo lavoro.

Convenzionalmente l'azione normale N si considera positiva se di trazione, negativa se di compressione. Per i momenti assumiamo la convenzione che siano positivi quelli che tendono le fibre inferiori della sezione e negativi quelli che tendono le fibre superiori.



Si ipotizzi, ad esempio, che siano tese le fibre inferiori della trave. Se nei calcoli è stata adottata la convenzione che considera positivi i momenti che tendono le fibre superiori, i risultati forniranno momenti negativi. Se, viceversa, si adotta la convenzione contraria (cioè, quella che considera positivi i momenti che tendono le fibre inferiori), i risultati forniranno momenti positivi, **ma la situazione fisica è sempre la stessa**.

Legenda dei simboli che si useranno nel testo

	b	Base della sezione
	h	Altezza della sezione
	c	Copriferro, distanza tra il bordo della sezione e l'asse delle armature
	d	Altezza utile della sezione: distanza dell'armatura tesa dal bordo compresso della sezione
	A_{s1}	Area armatura tesa
	A_{s2}	Area armatura compressa
	x_n	Profondità dell'asse neutro misurata a partire dal bordo superiore della sezione (bordo compresso per momento positivo)
	I	Momento d'inerzia della sezione
	S	Momento statico della sezione

VERIFICHE ALLO STATO LIMITE ULTIMO SLU

La verifica agli SLU è un metodo di calcolo strutturale che si basa su un approccio semiprobabilistico, introducendo coefficienti di sicurezza distinti per i carichi e per le resistenze. Questo metodo tiene conto delle incertezze presenti nei dati e mira a garantire la sicurezza strutturale sotto le condizioni di carico più sfavorevoli.

Nel vecchio metodo delle tensioni ammissibili la verifica strutturale era di tipo deterministico, cioè si utilizzava una legge costitutiva per il materiale, tensioni-deformazioni, lineare, e la verifica di una sezione era effettuata sulle tensioni e non sulle deformazioni. Dato il valore caratteristico del materiale R_{ck} per il calcestruzzo e f_{yk} per l'acciaio si calcolavano le tensioni massime ammissibili dei materiali, σ_{ammr} per il calcestruzzo e per l'acciaio. Queste si confrontavano con le sollecitazioni agenti sulla struttura, σ_{maxr} e se fosse risultato: $\sigma_{max} < \sigma_{amm}$ la sezione si riteneva ampiamente verificata. In pratica si applicava un coefficiente di sicurezza esclusivamente al valore della resistenza dei materiali e la verifica era limitata alla sola fibra della sezione maggiormente sollecitata.

Il metodo agli stati limiti si differenzia dal metodo delle tensioni ammissibili perché non assume più la linearità del legame costitutivo tensioni-deformazione dei materiali utilizzati e perché introduce due distinti coefficienti di sicurezza, uno per i carichi e uno per le resistenze, in modo da tener conto delle incertezze presenti su tali dati.

Le verifiche di cui si occupa il presente lavoro riguardano:

1) Verifiche agli Stati Limiti ultimi SLU:

- a) Flessione semplice retta: M_{Ed} ;
- b) Presso-flessione retta: N_{Ed} , M_{Ed} ;
- c) Verifica allo stato limite di duttilità (metodo implicito, § 4.1.6.1.1 NTC 2018).

2) Verifiche stati limiti di esercizio (SLE):

- a) verifiche di deformazione (metodo semplificato, § C4.1.2.2 della circolare);
- b) verifiche di fessurazione (metodo semplificato, § C4.1.2.2.4.5 della circolare);
- c) verifica delle tensioni.

In generale per le verifiche di resistenza si confrontano i valori di resistenza con i valori delle azioni sollecitanti. Affinché una sezione si possa ritenere verificata occorre che l'azione resistente della sezione sia maggiore dell'azione sollecitante.

Utilizzando le espressioni simboliche deve aversi:

$$M_{Rd} \geq M_{Ed}$$

$$N_{Rd} \geq N_{Ed}$$

$$(N_{Rd}, M_{Rd}) \geq (N_{Ed}, M_{Ed})$$

DOMINI DI INTERAZIONE O DI RESISTENZA

A ogni possibile deformazione della sezione, come visto trattando dei campi di rottura, corrispondono delle tensioni proprie delle armature e del calcestruzzo, da cui si possono calcolare le relative forze.

La sommatoria lungo l'asse longitudinale della trave di queste tre forze (calcestruzzo, armatura inferiore, armatura superiore) rappresenta lo sforzo normale N_{Rd} che la sezione può sopportare, mentre la sommatoria dei momenti di queste forze, calcolate nell'asse baricentrico della sezione costituisce il massimo momento resistente della sezione M_{Rd} .

Esplorando tutte le diverse possibili posizioni dell'asse neutro, e valutando in corrispondenza di ognuna di queste la coppia resistente (N_{Rd}, M_{Rd}) , si ottiene una curva limite che delimita quello che si chiama dominio di interazione. Quindi il dominio di interazione o di resistenza delle sezioni in cemento armato si riferisce alla capacità di una sezione di resistere a diverse combinazioni di sforzi normali e momenti flettenti.

Nella pratica il dominio di resistenza consiste in un grafico in cui si mostra l'andamento di M_{Rd} in funzione di N_{Ed} .

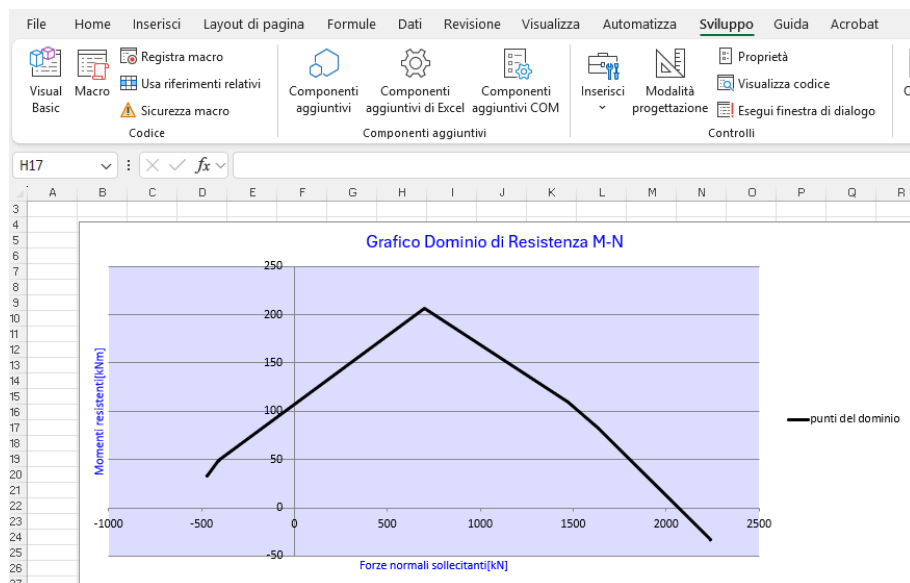
I punti costituenti la linea di frontiera del dominio dipendono, come visto, dalle deformazioni limite dei materiali e di conseguenza anche dalle caratteristiche geometriche della sezione di calcestruzzo, dal quantitativo di armature presenti e dalle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo e dell'acciaio e dei loro legami costitutivi. Variando la quantità di armatura si ottengono una serie di domini che individuano completamente il comportamento ultimo della sezione.

3.1. Grafico del dominio di resistenza

Consideriamo i risultati degli esercizi svolti nel capitolo precedente: i valori di N e M così ottenuti altro non sono che punti del dominio di resistenza che possiamo disegnare facilmente tramite l'applicazione Excel.

Per ottenere il grafico del dominio di resistenza basterà eseguire la seguente procedura:

- 1) creare un nuovo foglio di calcolo con l'applicativo Excel;
- 2) riportare nelle colonne A1:A8 e B1:B8 i valori sopra ottenuti;
- 3) selezionare le colonne A1:A8 e B1:B8;
- 4) attivare il menu *Inserisci* e selezionare un grafico a nuvola di punti per ottenere l'immagine seguente.



Si nota che gli sforzi normali sono stati cambiati di segno. Questo per ottenere sull'asse delle ascisse del grafico i valori negativi sulla parte sinistra, come solitamente abituati.

Il grafico rappresenta solamente la parte di dominio per momenti positivi. Per ottenere anche il diagramma per i momenti flettenti negativi, basterà, dal punto di vista analitico, considerare la sezione con le armature invertite e rifare i calcoli.

RICHIAMI NORMATIVI IN ARMATURE E COPRIFERRI

Con riferimento ai dettagli costruttivi degli elementi strutturali in calcestruzzo vengono fornite le indicazioni applicative necessarie per l'ottenimento delle prescritte prestazioni. Dette indicazioni si applicano se non sono in contrasto con più restrittive regole relative a costruzioni in zona sismica.

4.1. Armatura delle travi

Le NTC 2018, al § 4.1.6.1.1, riportano che l'area dell'armatura longitudinale delle travi in zona tesa non deve essere inferiore a:

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d$$

e in ogni caso non inferiore a $A_{s,min} = 0,0013 \cdot b \cdot d$, dove:

- b rappresenta la larghezza della zona tesa, per le sezioni rettangolari pari alla base;
- d è l'altezza utile della sezione (altezza totale della sezione diminuita del copriferro);
- f_{ctm} è il valore medio della resistenza a trazione assiale definita nel § 11.2.10.2 delle NTC 2018;
- f_{yk} è il valore caratteristico della resistenza a trazione dell'armatura ordinaria.

Negli appoggi di estremità, all'intradosso deve essere disposta un'armatura efficacemente ancorata, calcolata coerentemente con il modello a traliccio adottato per il taglio e quindi applicando la regola della traslazione della risultante delle trazioni dovute al momento flettente, in funzione dell'angolo di inclinazione assunto per le bielle compresse di calcestruzzo. Al di fuori delle zone di sovrapposizione, l'area di armatura tesa o compressa non deve superare individualmente:

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c$$

essendo A_c l'area della sezione trasversale di calcestruzzo.

Le travi devono prevedere armatura trasversale costituita da staffe con sezione complessiva non inferiore ad $A_{st} = 1,5 \cdot b \text{ mm}^2/\text{m}$ essendo b lo spessore minimo dell'anima in millimetri, con un minimo di tre staffe al metro e comunque passo non superiore a 0,8 volte l'altezza utile della sezione. In ogni caso almeno il 50% dell'armatura necessaria per

PROGETTO E VERIFICA DI SEZIONI RETTANGOLARI SOLLECITATE A FLESSIONE A SLU

Le NTC 2018, al § 4.1.2.3.4.1 (*Ipotesi di base*) dicono che per la valutazione della resistenza flessionale in presenza e in assenza di sforzo assiale delle sezioni di elementi monodimensionali, si adottano le seguenti ipotesi:

- 1) conservazione delle sezioni piane;
- 2) perfetta aderenza tra acciaio e calcestruzzo;
- 3) resistenza a trazione del calcestruzzo nulla.

La prima ipotesi comporta che le sezioni dell'elemento strutturale rimangano piane fino a rottura e il diagramma delle deformazioni nella sezione si conserva rettilineo. La seconda comporta che le armature subiscono la stessa deformazione dello strato di calcestruzzo adiacente. Per la verifica e il progetto allo Stato Limite Ultimo si assume inoltre che la crisi viene raggiunta per schiacciamento del conglomerato che perviene alla deformazione ultima ε_{cu} e che l'armatura tesa è snervata.

Queste ultime considerazioni sono giustificate dalla rimozione del limite di deformazione dell'acciaio (legame elasto-plastico a deformazione illimitata), che pertanto non può andare in crisi. Che l'armatura tesa sia snervata viene dalle limitazioni sui quantitativi di armatura imposte dalla normativa, §§ 4.1.6.1.1 e 7.4.6.2.1 delle NTC 2018. Tali limitazioni comporta praticamente che la distanza o profondità dell'asse neutro, a partire dal bordo compresso, non sia eccessiva, dando così un'adeguata duttilità alla sezione, cioè la capacità alla sezione di deformarsi oltre il limite elastico prima di pervenire alla rottura.

5.1. La rottura bilanciata

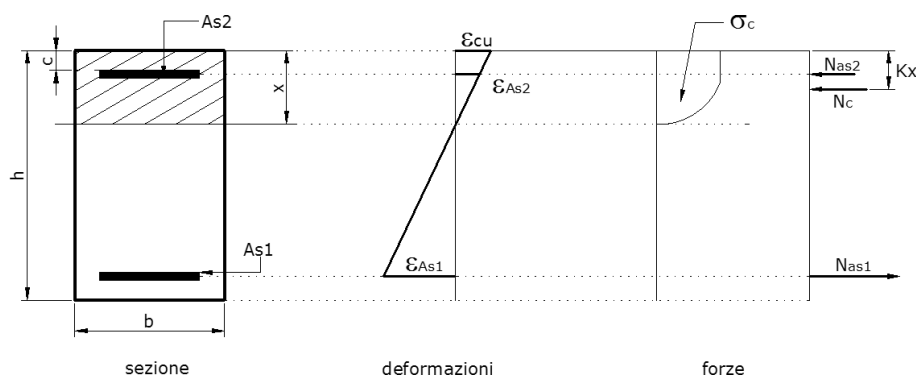
Il progetto delle sezioni rettangolari consiste, assegnate le caratteristiche e i legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio e calcolato il momento sollecitante M_{Ed} , nella determinazione di una delle due dimensioni, base o altezza, o dell'armatura tesa e compressa. Trattandosi di progettazione con materiale avente comportamento non lineare si dovrà assegnare il diagramma delle deformazioni. La scelta di tale diagramma è strettamente legata alla duttilità della sezione. Come si è visto trattando dei campi di rottura, il comportamento della sezione è duttile quando la resistenza ultima della sezione M_{Rd} si attinge con elevate deformazioni dell'acciaio, oltre il limite elastico. Inoltre, le deformazioni della sezione sono legate alla profondità dell'asse neutro dal bordo compresso della sezione e il valore ottimale di tale posizione risulta essere: $x = 0,2593 \cdot d$, retta limite tra i campi 2 e 3.

VERIFICA A FLESSIONE DI SEZIONI RETTANGOLARI A SLU

Nel caso di flessione semplice, l'asse neutro ha direzione ortogonale all'asse di sollecitazione e, in assenza di resistenza a trazione del calcestruzzo (come da ipotesi base) l'unica incognita e l'ampiezza della sezione parzializzata reagente, cioè della sezione costituita dal calcestruzzo compresso e dalle armature, ovvero la posizione del classico asse neutro. In questo caso la verifica di resistenza allo SLU si esegue controllando che il momento dovuto ai carichi di progetto M_{Ed} sia minore del momento resistente offerto dalla sezione M_{Rd} e cioè:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

Consideriamo la sezione rettangolare a doppia armatura riportata in figura:

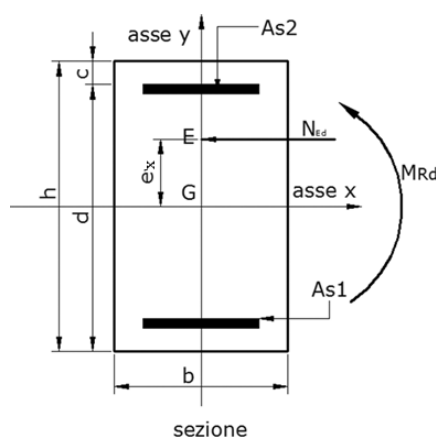


Nella flessione retta con un momento che agisce nel piano verticale, l'asse neutro è orizzontale e la sua posizione è individuata dalla sua distanza dal lembo compresso della sezione, indicato con x nel disegno. La posizione dell'asse neutro determina univocamente il diagramma limite delle deformazioni ϵ che corrisponde al raggiungimento del valore ϵ_{cu} nel calcestruzzo.

Nel disegno sono segnate le tre forze che agiscono nella sezione: le forze di compressione dovute al ferro compresso (N_{As2}), la forza di compressione del calcestruzzo (N_c) e la forza di trazione che agisce sull'acciaio teso (N_{As1}). Per l'equilibrio della sezione, la somma algebrica delle tre forze deve essere pari a zero.

VERIFICA A PRESSOFLESSIONE SEMPLICE ALLO SLU

La pressoflessione semplice è una sollecitazione generata da uno sforzo normale N associato ad un momento flettente M agente lungo uno degli assi principali della sezione. Queste due azioni corrispondono alla sola applicazione della forza N applicata in un punto E , chiamato centro di sollecitazione, non coincidente con il baricentro della sezione G , ma spostato rispetto a esso di una certa distanza. Nel caso della flessione semplice il punto E ricade su uno degli assi principali x o y :



$$e_x = \frac{M_{Rd}}{N_{Ed}}$$

La verifica di resistenza allo SLU consiste nel valutare lo sforzo normale e il momento flettente ultimo che la sezione è capace di esprimere nel rispetto delle condizioni di equilibrio e di congruenza della sezione.

Le ipotesi alla base del calcolo allo SLU sono:

- 1) le sezioni si conservano piane, e le relative deformazioni ϵ variano linearmente;
- 2) il calcestruzzo teso non è reggente, $f_{ctd} = 0$;
- 3) non vi è scorrimento relativo tra acciaio e cls, $\epsilon_s = \epsilon_c$;
- 4) la rottura del calcestruzzo è determinata dal raggiungimento della sua deformazione ultima a compressione: $\epsilon_{cu} = 0,0035$ in presenza di flessione e $\epsilon_c = 0,002$ per la sola compressione;

VERIFICHE ALLO STATO LIMITE DI ESERCIZIO SLE

Le deformazioni di una struttura, dovute agli effetti delle azioni applicate, degli stati di coazione e delle variazioni di umidità devono essere contenute entro limiti accettabili. Tanto vale sia in relazione ai danni che possono essere indotti ai materiali di rivestimento, ai pavimenti, alle tramezzature e, più in generale, alle finiture, sia in relazione ai requisiti estetici e sia alla funzionalità dell'opera.

La verifica allo stato limite ultimo (SLU) garantisce la sicurezza strutturale contro il collasso, ma non assicura l'assenza di danni o malfunzionamenti durante l'esercizio. Le Norme richiedono anche le verifiche degli Stati Limite di Esercizio (SLE), che definiscono le condizioni della struttura il cui superamento comporta perdita di funzionalità. Gli Stati Limite di Esercizio hanno quindi il fine di accertare la funzionalità e la durabilità di un'opera strutturale nell'arco della sua vita nominale. Quando il livello delle tensioni nel calcestruzzo è sufficientemente basso rispetto alla resistenza ultima, come nel caso degli stati limite di esercizio (SLE), la sezione può essere studiata assumendo un comportamento dei materiali di tipo elastico lineare.

Le verifiche agli Stati Limite di Esercizio (SLE) hanno i seguenti scopi (§ 4.1.2.2.1 delle NTC 2018):

- contenere le deformazioni degli elementi strutturali entro limiti ammissibili;
- ridurre la fessurazione degli elementi strutturali in calcestruzzo per proteggere l'armatura dalla corrosione;
- limitare le tensioni per evitare che un'elevata compressione nel calcestruzzo possa causare deformazioni viscosi e microfessurazioni, compromettendo la durabilità, oppure che elevate tensioni nell'acciaio vicine allo snervamento possano causare deformazioni anelastiche e lesioni irreversibili.

Si sono indicati solamente questi stati limiti perché sono quelli che maggiormente interessano le verifiche delle opere in conglomerato cementizio armato e perché sono quelle implementati nei fogli di calcolo che accompagnano questo volume. Le verifiche nei confronti degli Stati Limite di Esercizio vanno condotte utilizzando le combinazioni di carico previste dal § 2.7 delle NTC:

- combinazione caratteristica (rara), per lo SLE irreversibile, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili la cui espressione simbolica è:

$$G1 + G2 + P + Qk1 + \psi02 \cdot Qk2 + \psi03 \cdot Qk3 + \dots$$

APPENDICE

ASSENZA DI RISCHIO DI CORROSIONE O ATTACCO		
X0	Descrizione ambiente	Esempi
	Ambienti molto asciutti	Interno di edifici con umidità relativa molto bassa.

CORROSIONE INDOTTA DA CARBONATAZIONE		
XC1	Descrizione ambiente	Esempi
	Asciutto	Interni di edifici con umidità relativa bassa. Calcestruzzo armato ordinario con le superfici all'interno di strutture con eccezioni delle parti esposte a condensa o immerse in acqua
XC2	Bagnato, raramente asciutto	Calcestruzzo armato ordinario per costruzioni idrauliche, strutture interrato, fondazioni
XC3	Moderatamente umido	Calcestruzzo armato ordinario in esterni con superfici esterne riparate dalla pioggia, o interni con umidità relativamente alta
XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato	Strutture a vista in ambienti urbani

CORROSIONE DELLE ARMATURE INDOTTA DA CLORURI ESCLUSI QUELLI PROVENIENTI DALL'ACQUA DI MARE		
XD1	Descrizione ambiente	Esempi
	Umidità moderata	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in superfici o parti di ponti e viadotti
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Piscine natatorie
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Parti di ponti, pavimentazioni e parcheggi per auto

CORROSIONE DELLE ARMATURE INDOTTA DA CLORURI PRESENTI NELL'ACQUA DI MARE		
XS1	Descrizione ambiente	Esempi
	Esposto alla salsedine marina ma non direttamente in contatto con l'acqua di mare	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con elementi strutturali sulle coste o in prossimità
XS2	Permanentemente sommerso	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso di strutture marine completamente immerse in acqua
XS3	Zone esposte agli spruzzi oppure alla marea	Elementi strutturali esposti alla battigia o alle zone soggette agli spruzzi ed onde del mare

GLI APPLICATIVI EXCEL ALLEGATI

Gli **applicativi Excel allegati** alla pubblicazione consentono il calcolo di progetto e la verifica di sezioni rettangolari, le cui specifiche sono dettagliate nel riepilogo seguente:

- 1) **Costruzione_Dominio** – Effettua la costruzione del dominio di resistenza o di interazione, per effettuare la verifica agli stati limiti ultimi (SLU) per sezioni rettangolari soggette a presso-flessione retta, con momenti positivi.
- 2) **Disegna_Punti_Caratteristici_dominio** – Effettua la costruzione del dominio di resistenza o di interazione, per effettuare la verifica agli stati limiti ultimi (SLU) per sezioni rettangolari soggette a presso-flessione retta, con momenti positivi, e per i punti corrispondenti alle rette limite dei campi di rottura.
- 3) **Progetto_altezza_sezioni_SLU** – Calcola l'altezza da assegnare alla sezione rettangolare soggetta a flessione semplice, per verifiche agli stati limiti ultimi (SLU). Sono calcolate anche le armature necessarie.
- 4) **Progetto_base_sezioni_SLU** – Calcola la base da assegnare alla sezione rettangolare soggetta a flessione semplice, per verifiche agli stati limiti ultimi (SLU). Sono calcolate anche le armature necessarie.
- 5) **Verifica_sezioni_Pres_fle_SLE** – Esegue le verifiche agli stati limiti di esercizio (SLE) di sezioni rettangolari sollecitate a presso flessione retta.
- 6) **Verifica_sezioni_flessione_SLU** – Esegue le verifiche agli stati limiti ultimi (SLU) di sezioni rettangolari sollecitate a flessione semplice.
- 7) **Verifica_SLE_flessione** – Esegue le verifiche agli stati limiti di esercizio (SLE) di sezioni rettangolari sollecitate a flessione semplice.

Tutte le verifiche includono anche il controllo delle aree delle armature, tese e compresse, secondo i punti delle NTC 2018: **4.1.6.1.1 "armatura delle travi"**, **4.1.6.1.2 "armatura dei pilastri"** e **7.4.6.2.1 "armature longitudinali"**.

Per ogni foglio è prevista la produzione di un report di calcolo contenente una breve relazione e il tabulato di calcolo che comprende i dati geometrici e di armatura della sezione oggetto di verifica, i dati del calcestruzzo, dell'acciaio e dei rispettivi legami costitutivi, e a seguire i calcoli e le verifiche svolte. Gli applicativi non sono *puliti*, ma contengono dei dati utilizzati per le prove di funzionalità. Tali dati potrebbero non essere congruenti tra di loro e quindi non vanno considerati.

Unitamente agli applicativi Excel è disponibile lo **Speciale Progettazione Strutturale**, una banca dati di normativa e giurisprudenza costantemente aggiornata a cura della redazione di www.lavoripubblici.it.

Requisiti per l'installazione e l'utilizzo degli applicativi Excel

- Dispositivi con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android;
- Accesso a internet e browser web con Javascript attivo;
- Software per gestire documenti PDF e Office.

Gli applicativi Excel sono stati testati con MS Excel per Microsoft 365 MSO (Versione 2505 Build 16.0.18827.20102) a 32 bit. Per versioni di MS Excel diverse da quella specificata, le routine proposte e la stampa dei report potrebbero non funzionare correttamente.

Attivazione degli applicativi Excel

- 1) Collegati al seguente indirizzo internet:

https://www.grafill.it/pass/0515_5.php

- 2) Inserisci i codici **[A]** e **[B]** riportati alla fine del libro e clicca **[Continua]**;
- 3) Accedi al tuo **account Grafill** oppure creane uno;
- 4) Clicca sul pulsante **[Gcloud]**;
- 5) Clicca sul pulsante **[WebApp]** in corrispondenza del prodotto acquistato;
- 6) Fai il *login* con le credenziali del tuo **account Grafill**;
- 7) Accedi alla WebApp cliccando la copertina del libro nello scaffale **Le mie App**.

