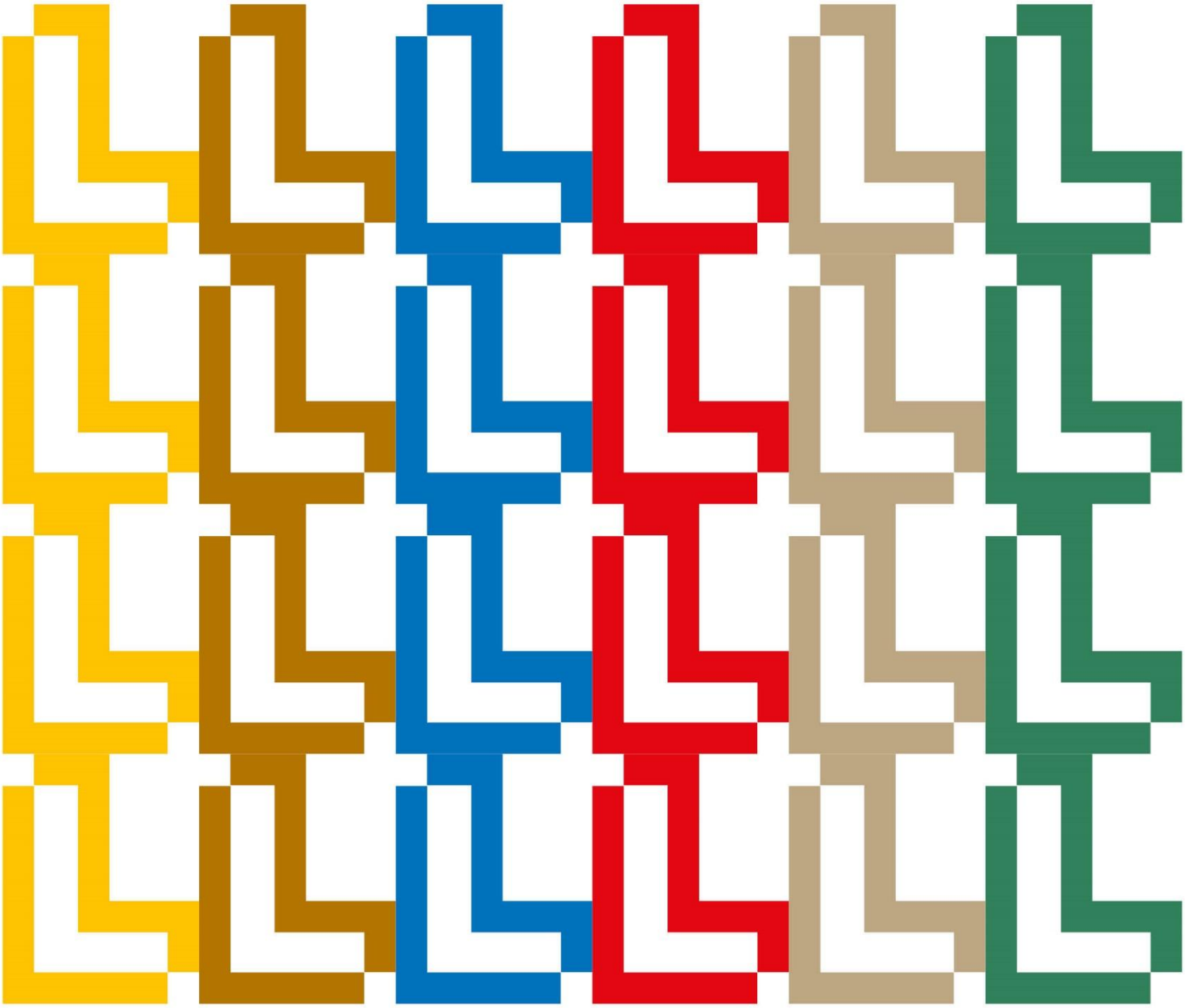


Guida & Validazione

Guida all'uso, validazione e riferimenti normativi
per il consolidamento dei solai misti
in laterocemento - calcestruzzo

Laterlite
Le tue soluzioni per costruire

Leca · Centro Storico · Gras Calce · Rure Gold

INDICE

1. GUIDA ALL'USO 3

1.1. INTRODUZIONE 3
1.2. UTILIZZO DEL SOFTWARE 4
1.2.1. SCHERMATA PRINCIPALE 4
1.2.2. PARAMETRI UTENTE 5
1.2.3. MATERIALI 6
1.2.4. GEOMETRIA 9
1.2.5. ARMATURE 11
1.2.6. CARICHI 13
1.2.7. VERIFICA 15
1.2.8. IRRIGIDIMENTO 18
1.2.9. VERIFICA IRRIGIDIMENTI 21

2. RIFERIMENTI DI CALCOLO 22

2.1. NORMATIVA DI RIFERIMENTO 22
2.2. CALCOLO DELLA RESISTENZA A FLESSIONE SLU 22
2.3. CALCOLO DELLA RESISTENZA A TAGLIO 23
2.4. VERIFICA A SCORRIMENTO SULLA SUPERFICIE DI CONTATTO CON LA NUOVA CAPPA (CONNETTORE CHIMICO) 25
2.5. VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA DI CALCOLO DEI CONNETTORI MECCANICI 27
2.5.1. LIMITI APPLICATIVI 27
2.5.2. ROTTURA DELL'ACCIAIO DELL'ANCORANTE $V_{Rd,s}$ 28
2.5.3. ROTTURA PER PRY-OUT DEL CALCESTRUZZO $V_{Rd,cp}$ 28
2.5.4. ROTTURA DEL BORDO DI CALCESTRUZZO $V_{Rd,c}$ 31
2.6. CALCOLO DELLO SCORRIMENTO E DELL'ADERENZA ALL'INTERFACCIA (CONNETTORI MECCANICI) 34
2.7. CALCOLO DEL PASSO E DELLA DISTRIBUZIONE DEI CONNETTORI 37
2.7.1. SPAZIATURA VARIABILE 38
2.7.2. SPAZIATURA COSTANTE PER CAMPATA 39

3. VALIDAZIONE DEL CALCOLO 40

3.1. CASO 1 – SOLAIO CON NUOVA SOLETTA E CONNETTORE CENTROSTORICO CHIMICO 40
3.2. CASO 2 – SOLAIO CON NUOVA SOLETTA E PANNELLO DI ALLEGGERIMENTO E CONNETTORE CENTROSTORICO CHIMICO 50
3.3. CASO 3 – IRRIGIDIMENTO IN SPESSORE DI SOLAIO 58
3.4. CASO 4 – IRRIGIDIMENTO FUORI SPESSORE DI SOLAIO 63
3.5. CASO 5 – SOLAIO CON NUOVA SOLETTA E CONNETTORE CALCESTRUZZO PLUS D12 69

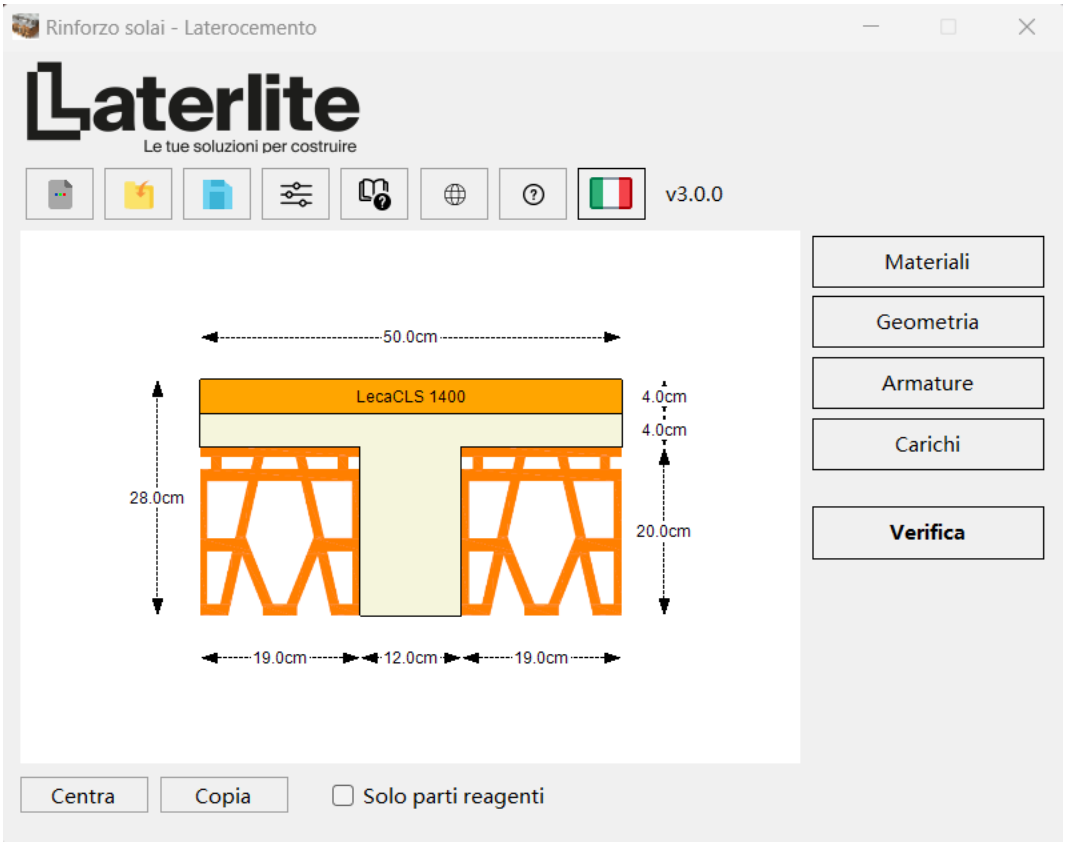
1. GUIDA ALL'USO

1.1. Introduzione

Il programma **Dimensionamento di solai misti in LATEROCEMENTO – CALCESTRUZZO con Connettori CentroStorico e calcestruzzi strutturali leggeri Leca** permette il calcolo di solai latero-cementizi rinforzati con i calcestruzzi strutturali leggeri di Laterlite S.p.A. (denominati ***LecaCLS 1400***, ***LecaCLS 1600***, ***LecaCls1800*** e ***Calcestruzzo CentroStorico***) e connettori di Laterlite S.p.A. (denominati ***Connettore CentroStorico Chimico***, ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***, ***Mini Connettore Calcestruzzo***).

Il programma esegue le seguenti verifiche:

- Verifiche a flessione positiva e negativa allo Stato Limite Ultimo (SLU) del solaio esistente e del solaio rinforzato;
- Verifica a taglio a Stato Limite Ultimo (SLU) per elementi sprovvisti di specifica armatura a taglio del solaio esistente e del solaio rinforzato;
- Verifica allo scorrimento sulla superficie di contatto con la nuova cappa, qualora si preveda di utilizzare ***Connettore CentroStorico Chimico*** quale sistema di connessione tra il solaio esistente e la nuova cappa;
- Calcolo della resistenza di progetto di ***Mini Connettore Calcestruzzo*** o ***Connettore Calcestruzzo Plus D12*** e calcolo della spaziatura (variabile o costante per campata) dei connettori, qualora si preveda di utilizzare ***Mini Connettore Calcestruzzo*** o ***Connettore Calcestruzzo Plus D12*** quale sistema di connessione tra il solaio esistente e la nuova cappa.

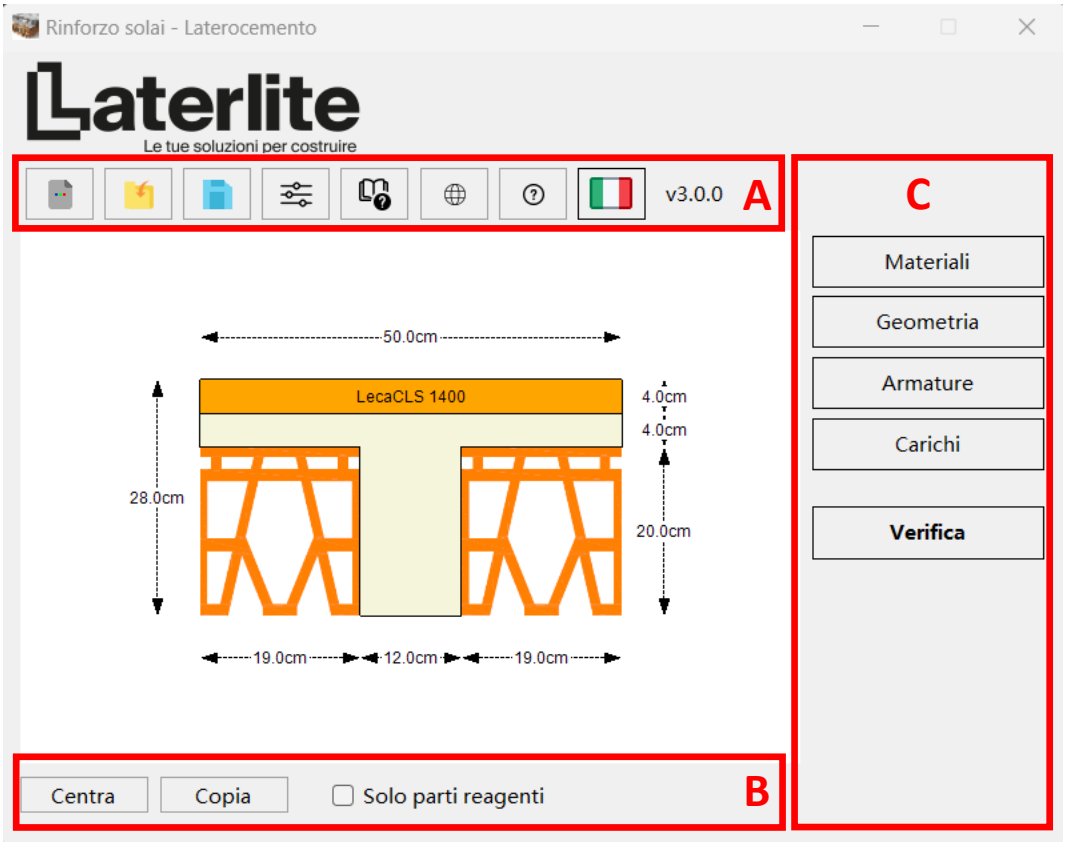


Nel caso di mancata verifica del solaio consolidato mediante la sola soletta in calcestruzzo strutturale leggero e ***Connettore CentroStorico Chimico***, il programma consente di dimensionare e verificare un intervento di irrigidimento del solaio esistente (in spessore o fuori spessore) mediante i calcestruzzi strutturali leggeri di Laterlite S.p.A.; mentre nel caso di mancata verifica del solaio consolidato mediante la sola soletta in calcestruzzo strutturale leggero e i connettori meccanici, il programma suggerisce di dimensionare gli irrigidimenti, prevedendo ***Connettore CentroStorico Chimico***.

1.2. Utilizzo del software

Sono descritti nel seguito l'interfaccia e i comandi del programma.

1.2.1. Schermata principale



La schermata principale del programma si articola in 3 pulsantiere (superiore A, inferiore B e di destra C) e dal disegno della sezione di travetto, quotata in *cm*.

Per i pulsanti del gruppo A (in ordine da sinistra verso destra):

- **Nuovo** permette la creazione di un nuovo file;
- **Apri** consente l'apertura di un file esistente con estensione *.ll1;*
- **Salva** consente il salvataggio del file corrente con estensione *.ll1;*
- **Parametri utente** consente la modifica di alcune opzioni predefinite di calcolo;
- **Guida** apre il presente documento di guida e validazione;

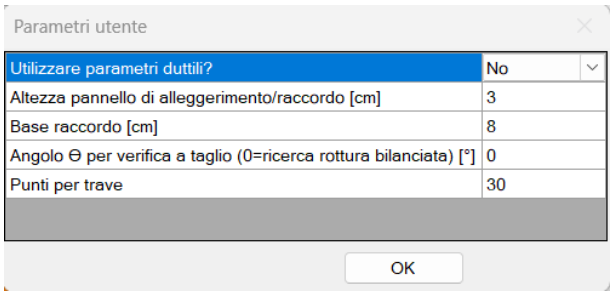
- **Web** apre il sito www.leca.it;
- **Info** apre la schermata con le informazioni sul programma e sulle licenze;
- **Lingua** permette di selezionare la lingua del programma tra italiano, inglese, francese e spagnolo. È necessario riavviare l'applicazione per cambiare lingua.

Per i pulsanti del gruppo B (in ordine da sinistra verso destra):

- **Centra** permette di centrare il disegno della sezione del solaio all'interno della schermata dedicata;
- **Copia** consente di copiare negli Appunti il disegno corrente come immagine;
- **Solo parti reagenti** mostra solo le parti reagenti della sezione se attivo.

I pulsanti del gruppo C consentono l'inserimento delle informazioni necessarie al calcolo, secondo l'ordine suggerito di lavoro con il programma. Si rimanda ai paragrafi successivi per la descrizione dettagliata.

1.2.2. Parametri utente



La maschera permette di impostare le seguenti opzioni di calcolo:

- **Utilizzare parametri duttili?** permette di selezionare se utilizzare i parametri duttili o fragili per il calcestruzzo e l'acciaio esistenti. Per impostazione predefinita, sono utilizzati i parametri fragili. Per ulteriore specifica, vedere il paragrafo *Materiali*;
- **Altezza pannello di alleggerimento/raccordo** permette di impostare lo spessore dell'eventuale pannello di alleggerimento in *cm*;
- **Base raccordo** permette di impostare la larghezza di separazione tra due pannelli di alleggerimento adiacenti ovvero, in altri termini, la larghezza del raccordo in calcestruzzo strutturale leggero da realizzare nel caso sia presente l'alleggerimento in *cm*;
- **Angolo θ per verifica a taglio** permette di specificare un angolo, in gradi, compreso fra 21.8° e 45° per la verifica a taglio degli irrigidimenti. Se l'angolo è a 0 (default), il programma ricerca automaticamente la rottura bilanciata;
- **Punti per trave** permette di scegliere in quanti punti discretizzare ogni campata di solaio analizzata (è possibile inserire un numero compreso tra 10 e 100).

1.2.3. Materiali

La maschera **Materiali** consente l'inserimento delle caratteristiche meccaniche di calcestruzzo e acciaio esistenti, oltre alla definizione dei Livelli di Conoscenza e corrispondenti Fattori di Confidenza, e la scelta del sistema di connessione e del calcestruzzo leggero strutturale da impiegarsi per la realizzazione della nuova soletta collaborante.

Il riquadro Calcestruzzo permette l'inserimento delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo esistente, scegliendo tra le seguenti opzioni:

- **Da relazione** consente la scelta della classe resistente tra quelle proposte nel menù a tendina;
- **Da prove** consente di inserire il valore di resistenza media f_{cm} ottenuta da prove eseguite;
- **Da utente** consente l'inserimento diretto da parte dell'utente della resistenza di progetto f_{cd}.

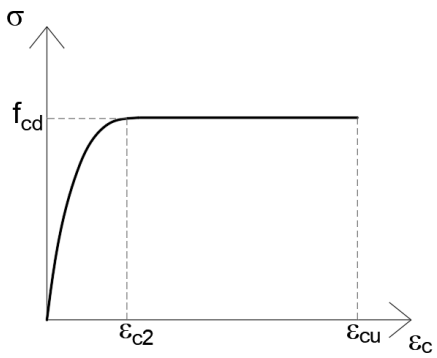
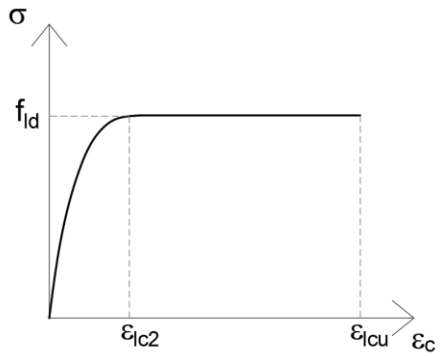
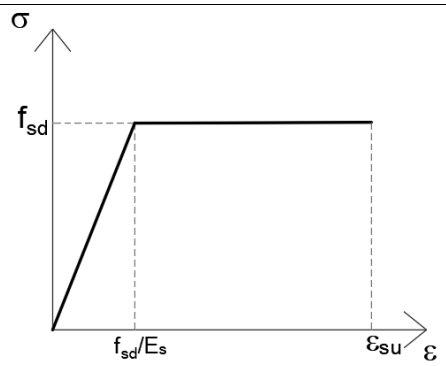
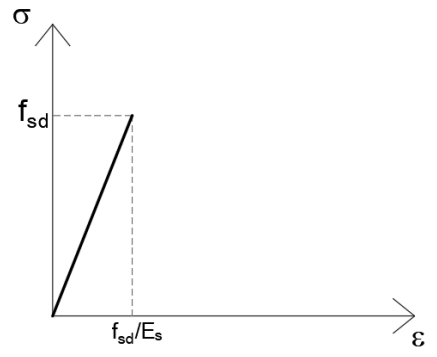
Il riquadro Acciaio da armatura permette l'inserimento delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio esistente, scegliendo tra le seguenti opzioni:

- **Da relazione** consente la scelta della classe resistente tra quelle proposte nel menù a tendina;
- **Da prove** consente di inserire il valore di resistenza media f_{ym} ottenuta da prove eseguite;
- **Da utente** consente l'inserimento diretto da parte dell'utente della resistenza di progetto f_{yd}.

Per ciascun materiale esistente, il riquadro Livello di Conoscenza permette la scelta, tramite menù a tendina, del Livello di Conoscenza raggiunto e definisce il corrispondente Fattore di Confidenza. Risulta possibile scegliere un Livello di Conoscenza "utente" e definire quindi il valore da assegnare al Fattore di Confidenza.

Infine, il riquadro Soluzioni di rinforzo permette la selezione del calcestruzzo strutturale leggero di Laterlite S.p.A. da impiegare per la realizzazione della nuova soletta collaborante tra ***LecaCLS 1400***, ***LecaCLS 1600***, ***LecaCLS1800*** e ***Calcestruzzo CentroStorico*** e la scelta del sistema di connessione solaio esistente – nuova soletta tra ***Connettore CentroStorico Chimico***, ***Connettore Calcestruzzo Plus D12*** e ***Mini Connettore Calcestruzzo.***

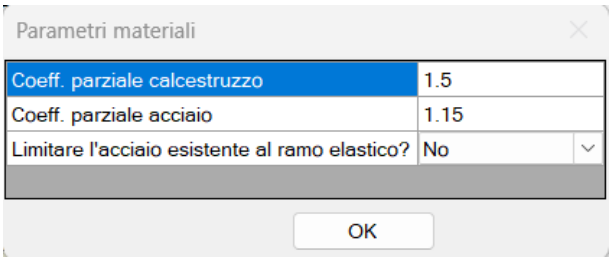
I legami costituitivi implementati all'interno del software sono i seguenti:

	Legame costitutivo del materiale calcestruzzo esistente
	Legame costitutivo del materiale calcestruzzo *Leca*
	Legame costitutivo del materiale acciaio B450C e dell'acciaio esistente se non è stato limitato al ramo elastico
	Legame costitutivo dell'acciaio esistente se è stato limitato al ramo elastico

Le resistenze di progetto dei materiali sono determinate come da tabella seguente:

	COMPORTAMENTO FRAGILE	***COMPORTAMENTO DUTTILE***
MATERIALE DA RELAZIONE	$f_{cd} = \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c FC}$	$f_{cd} = \frac{0.85 f_{ck}}{FC}$
MATERIALE DA PROVE	$f_{cd} = \frac{f_{cm}}{\gamma_c FC}$	$f_{cd} = \frac{f_{cm}}{FC}$
RESISTENZA DA UTENTE	\	\

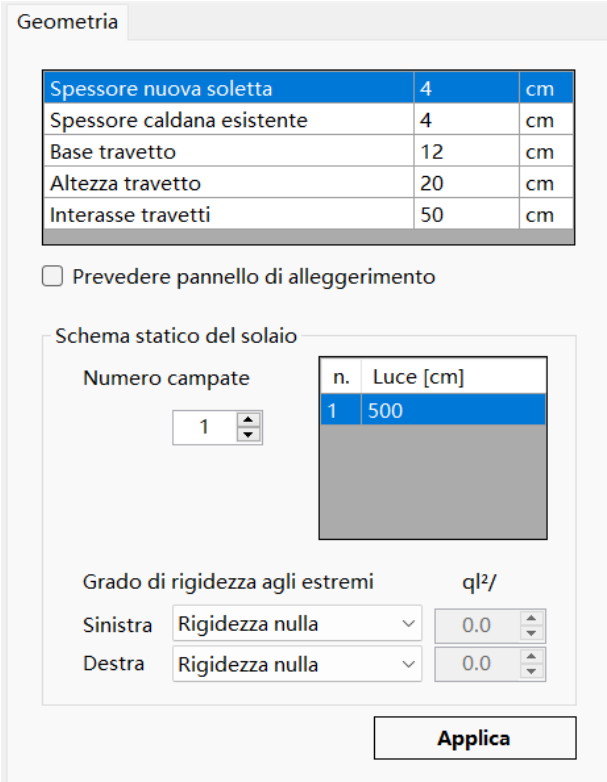
L'opzione **Cambia parametri di default** consente la modifica dei coefficienti parziali per i materiali esistenti e la possibilità di scelta di limitare l'acciaio esistente al ramo elastico.



Premere **Applica** per memorizzare le scelte operate. Il pulsante **Applica** si colora di rosso per segnalare la modifica effettuata sui parametri presenti nella maschera e ritorna di colore nero dopo essere stato premuto.

1.2.4. Geometria

La maschera **Geometria** consente l'impostazione delle dimensioni del solaio esistente e della nuova soletta.



Nello specifico, i parametri da inserire sono:

- lo spessore della nuova soletta collaborante in calcestruzzo strutturale leggero (lo spessore minimo della soletta è pari a 4 cm per ***Connettore CentroStorico Chimico*** e ***Mini Connettore Calcestruzzo*** ed è pari a 5 cm per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***);
- lo spessore della caldana esistente (se presente);
- la base del travetto esistente;
- l'altezza del travetto esistente;
- l'interasse dei travetti esistenti.

L'opzione **Prevedere pannello di alleggerimento**, se attivata, inserisce un pannello (polistirolo, EPS, ...) tra il solaio esistente e la nuova soletta, realizzando una nuova sezione a T. La definizione dello spessore del pannello di alleggerimento e la base del raccordo avviene mediante il menù **Parametri Utente** (si veda il paragrafo 1.2.2.), il quale si apre in automatico alla prima apposizione della spunta sull'opzione. L'opzione non è presente nel caso di impiego di ***Mini Connettore Calcestruzzo***.

Il riquadro Schema statico del solaio contiene le impostazioni sul numero e sulla luce *L* delle campate di solaio e il grado di rigidezza da adottare agli estremi sinistro e destro.

Risulta possibile modellare solai aventi al più quattro campate; il numero di campate viene definito sfruttando l'apposito menù mentre l'inserimento della luce di ogni campata in *cm* avviene da tastiera nell'apposita tabella.

Le opzioni per la rigidezza agli estremi sono:

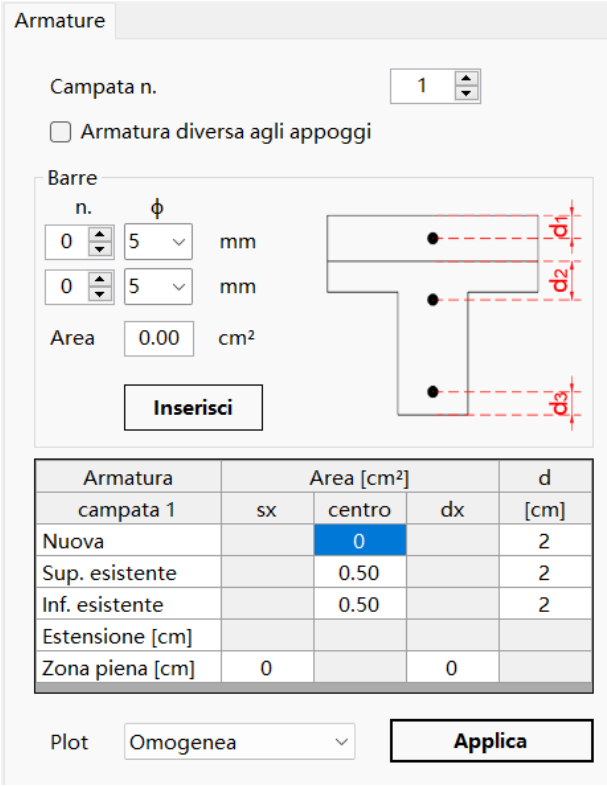
- Rigidezza nulla (momento applicato all'estremo pari a 0);
- Rigidezza molto bassa (momento applicato all'estremo considerato pari a $-qL^2/48$, con q carico a metro lineare in combinazione allo Stato Limite Ultimo e L luce della campata a cui si applica il vincolo);
- Rigidezza bassa (momento applicato all'estremo considerato pari a $-qL^2/36$, con q carico a metro lineare in combinazione allo Stato Limite Ultimo e L luce della campata a cui si applica il vincolo);
- Rigidezza a semi-incastro (momento applicato all'estremo considerato pari a $-qL^2/24$, con q carico a metro lineare in combinazione allo Stato Limite Ultimo e L luce della campata a cui si applica il vincolo);
- Rigidezza a incastro (momento applicato all'estremo considerato pari a $-qL^2/12$, con q carico a metro lineare in combinazione allo Stato Limite Ultimo e L luce della campata a cui si applica il vincolo)*;
- Estremo libero
- Rigidezza utente (consente di definire da utente il denominatore X del momento da applicare all'estremo considerato pari a $-qL^2/X$, con q carico a metro lineare in combinazione allo Stato Limite Ultimo e L luce della campata a cui si applica il vincolo);

*Solo nel caso di solaio a singola campata, con selezione di un "estremo libero" ad un estremo, all'altro estremo risulta necessario selezionare "rigidezza ad incastro" e viene applicato un momento di $-qL^2/2$, al fine di assicurare l'isostaticità della struttura.

Premere **Applica** per memorizzare le scelte operate. Il pulsante **Applica** si colora di rosso per segnalare la modifica effettuata sui parametri presenti nella maschera e ritorna di colore nero dopo essere stato premuto.

1.2.5. Armature

La maschera **Armature** consente l'inserimento delle armature, esistenti e nuove (se previste), per ogni campata.



Risulta necessario selezionate dapprima il numero della campata per la quale si devono inserire le armature mediante il menù **Campata n.**. La scelta consente di far apparire la tabella di input relativa alla campata in esame.

L'opzione **Armatura diversa agli appoggi** permette di definire armature differenti tra la zona in campata (***centro***) e la zona agli appoggi (***sx*** e ***dx***) e di specificare l'**Estensione** dagli estremi, in *cm*, delle zone con armatura differente:

Armatura	Area [cm²]			d
campata 1	sx	centro	dx	[cm]
Nuova	0	0	0	2
Sup. esistente	0	0	0	2
Inf. esistente	0	0	0	2
Estensione [cm]	0		0	
Zona piena [cm]	0		0	

Per ciascuna casella compilabile, è possibile inserire l'area in cm^2 di armatura:

- **Nuova** per l'armatura eventualmente prevista in soletta;
- **Sup. esistente** per l'armatura superiore del travetto esistente (se presente);

- **Inf. esistente** per l'armatura inferiore del travetto esistente.

Per inserire le armature è possibile utilizzare i comandi del riquadro Barre, scegliendo numero e diametro dei ferri e premendo **Inserisci**. Il valore presente nella casella **Area** verrà inserito nella cella selezionata. Il comando è valido solo per le celle attive e che possono contenere aree di armature.

La riga **Zona piena** permette di specificare l'estensione dell'eventuale fascia piena (es. trave di appoggio del solaio) in calcestruzzo presente alle estremità della campata considerata. Quest'opzione influenza la resistenza a taglio del tratto in cui è presente la zona piena poiché influisce sul valore di b_w utilizzato nella formula di resistenza a taglio per elementi sprovvisti di specifica armatura a taglio e la resistenza a flessione poiché modifica la sezione resistente di calcestruzzo. Viene trascurato l'incremento di peso determinato dalla zona piena.

L'ultima colonna **d** indica il copriferro, definito come in figura nella maschera, per ogni livello di armatura.

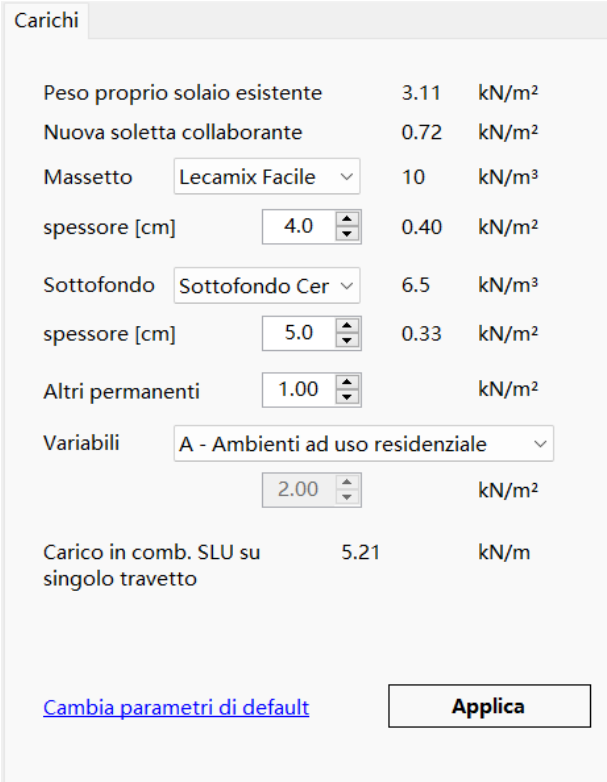
Infine, il menu **Plot** permette di vedere le armature nel disegno della sezione, selezionando la porzione appropriata.

Premere **Applica** per memorizzare le scelte operate, al termine dell'inserimento delle informazioni per la singola campata considerata prima di passare alla campata successiva. Il pulsante **Applica** si colora di rosso per segnalare la modifica effettuata sui parametri presenti nella maschera e ritorna di colore nero dopo essere stato premuto.

L'iter descritto deve essere ripetuto per tutte le campate del solaio in esame.

1.2.6. Carichi

Nella maschera **Carichi** sono definiti tutti i carichi agenti sul solaio:



Nello specifico, sono presenti le seguenti informazioni:

- **Peso proprio solaio esistente**, valutato in automatico dal software;
- **Nuova soletta collaborante**, il cui peso viene valutato in automatico dal software.

Risulta possibile agire sui carichi permanenti non strutturali e variabili, come segue:

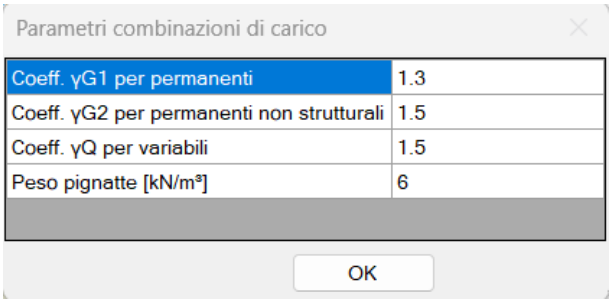
- **Massetto**, che permette la selezione di uno dei massetti di Laterlite S.p.A. e l'inserimento dello spessore previsto; se non previsto selezionare "Non presente";
- **Sottofondo**, che permette la selezione di uno dei sottofondi di Laterlite S.p.A. e l'inserimento dello spessore previsto; se non previsto selezionare "Non presente";
- **Altri permanenti**, che consente l'inserimento da utente del carico complessivo dato da eventuali altri carichi permanenti (es. tramezze, pavimento);
- **Variabili**, che consente la selezione attraverso il menù a tendina dei carichi variabili previsti da NTC2018 o, selezionando "Da utente", consente l'inserimento manuale di un valore arbitrario.

La combinazione di carico SLU viene valutata come segue:

$$q = i_{tr} \cdot \left[\gamma_{G1} \cdot \left(P_{solaio} + P_{soletta} + P_{massetto} + P_{sottofondo}\right) + \gamma_{G2} \cdot P_{altri} + \gamma_{Q} \cdot Q_{var}\right]$$

con i_{tr} l'interasse dei travetti, P_{solaio} il peso del solaio esistente, $P_{soletta}$ il peso della nuova soletta in calcestruzzo strutturale leggero, $P_{massetto}$ il peso del massetto (se presente), $P_{sottofondo}$ il peso del sottofondo (se presente), P_{altri} il peso degli altri carichi permanenti e Q_{var} il peso dei carichi variabili.

L'opzione **Cambia parametri di default** consente la definizione dei coefficienti di combinazione per carichi permanenti, permanenti non strutturali e variabili, oltre che l'impostazione del peso delle pignatte.



Premere **Applica** per memorizzare le scelte operate. Il pulsante **Applica** si colora di rosso per segnalare la modifica effettuata sui parametri presenti nella maschera e ritorna di colore nero dopo essere stato premuto. Il carico sul singolo travetto in combinazione SLU viene aggiornato premendo il pulsante **Applica**.

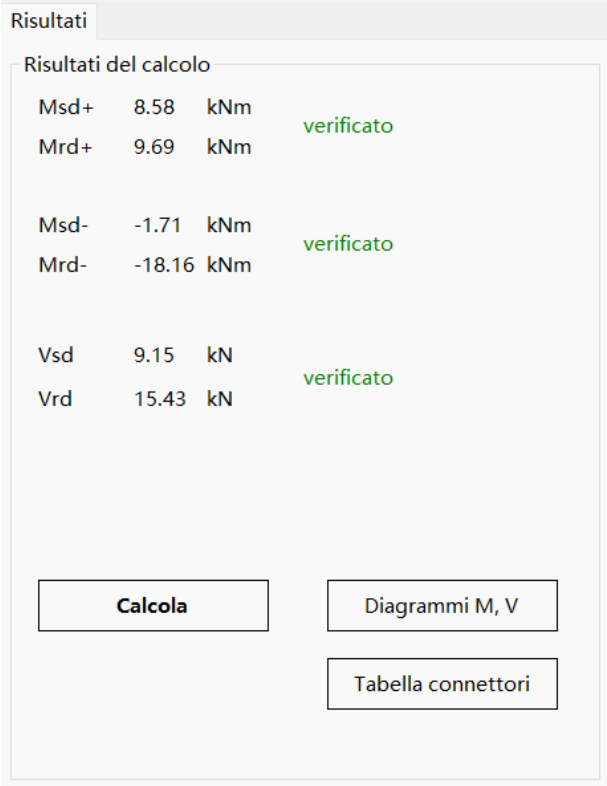
1.2.7. Verifica

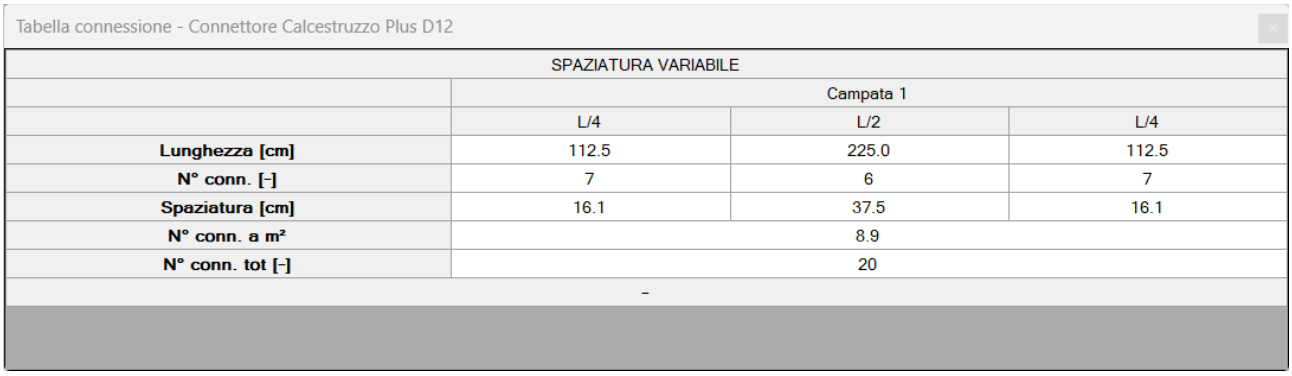
La maschera **Verifica** mostra, per il punto in cui la verifica risulta più gravosa:

- le sollecitazioni flettenti e taglianti derivanti dallo schema statico impostato;
- le corrispondenti resistenze flessionali (a momento positivo e a momento negativo);
- il taglio resistente;
- la tensione tangenziale all'interfaccia tra solaio esistente e nuova soletta, confrontandola con il valore di resistenza di progetto di ***Connettore CentroStorico Chimico***, pari a 0.72 MPa, qualora nella maschera Materiali sia stato selezionato tale connettore.

Al fine di ottenere i risultati, è necessario premere **Calcola**.

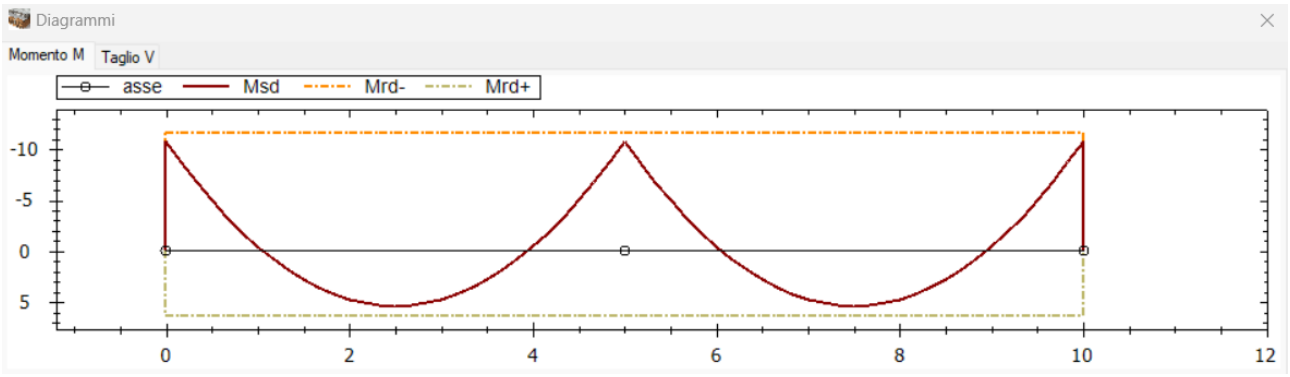
Il pulsante **Tabella connettori** consente di visualizzare la tabella contenente il numero e la spaziatura variabile di ***Mini Connettore Calcestruzzo*** o di ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***, qualora nella maschera Materiali sia stato selezionato uno di tali connettori.

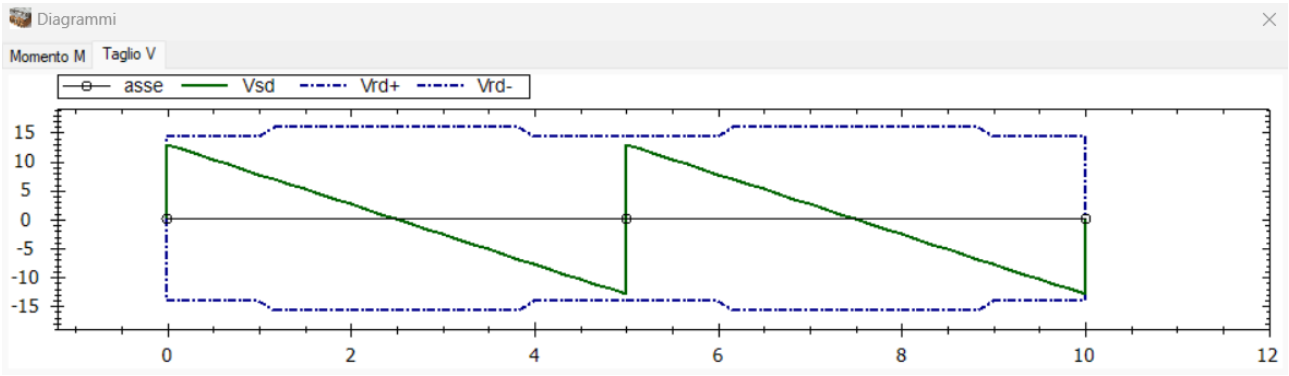




SPAZIATURA VARIABILE			
	Campata 1		
	L/4	L/2	L/4
Lunghezza [cm]	112.5	225.0	112.5
N° conn. [-]	7	6	7
Spaziatura [cm]	16.1	37.5	16.1
N° conn. a m²	8.9		
N° conn. tot [-]	20		

Il pulsante **Diagrammi M, V** consente di visualizzare i diagrammi sollecitanti e resistenti del solaio analizzato.





Una volta eseguita la verifica, appare il pulsante **Relazione**, tramite il quale è possibile esportare il report di calcolo in formato DocX (Word®).

Nel caso in cui almeno una verifica non sia soddisfatta del solaio consolidato mediante la sola soletta in calcestruzzo strutturale leggero, qualora nella maschera Materiali sia stato selezionato ***Connettore CentroStorico Chimico***, appaiono i pulsanti **Irrigidimento** e **Verifica irrigidimento**, per permettere all'utente di dimensionare e verificare un intervento di irrigidimento del solaio esistente (in spessore o fuori spessore) mediante i calcestruzzi strutturali leggeri di Laterlite S.p.A..
Il pulsante **?** apre la guida che illustra le soluzioni di irrigidimento in spessore o fuori spessore di solaio e fornisce utili indicazioni per il dimensionamento di tali irrigidimenti.

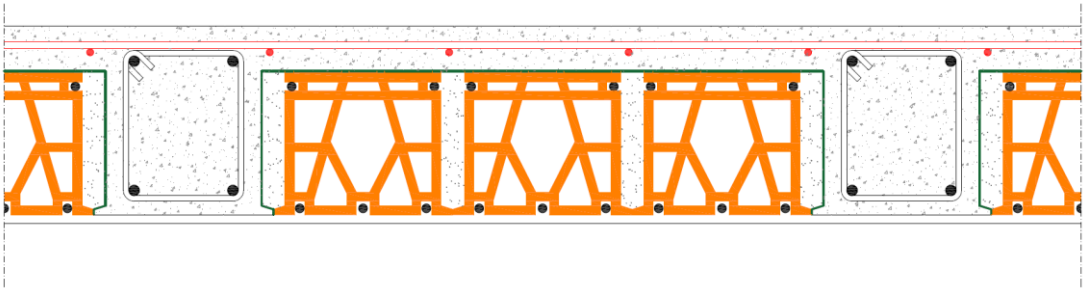
Invece, nel caso in cui almeno una verifica non sia soddisfatta del solaio consolidato mediante la sola soletta in calcestruzzo strutturale leggero, qualora nella maschera Materiali sia stato selezionato ***Mini Connettore Calcestruzzo*** o ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***, sotto ai pulsanti Calcola / Diagrammi M, V / Tabella Connettori appare un alert che suggerisce di prevedere interventi di irrigidimento, utilizzando ***Connettore CentroStorico Chimico***. Per poter procedere al dimensionamento è necessario modificare in **Materiali** il sistema di connessione, rieseguire il **Calcola** e successivamente utilizzante i pulsanti **Irrigidimento** e **Verifica Irrigidimento**.

1.2.8. Irrigidimento

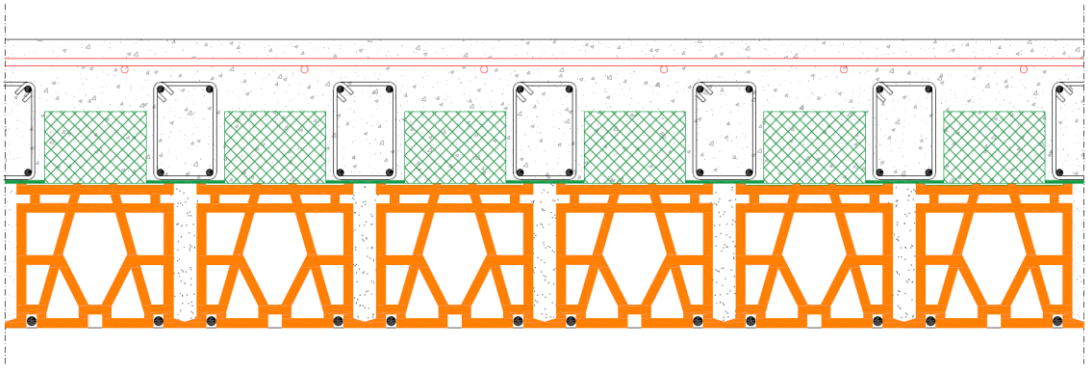
La maschera **Irrigidimento** consente l'inserimento delle dimensioni dell'irrigidimento dopo aver attivato la spunta su **Applica irrigidimento**.

Il menù a tendina a destra consente la scelta fra:

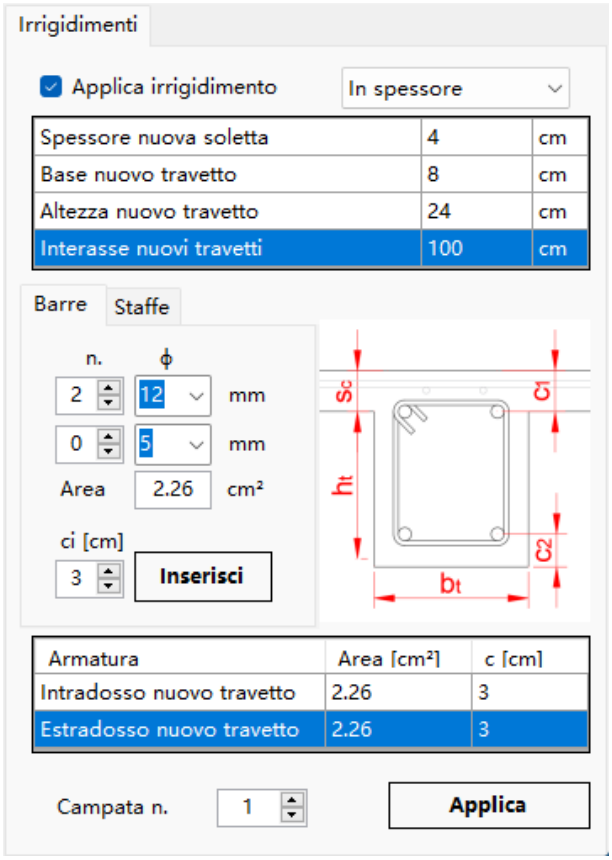
- **Irrigidimento in spessore**, che consiste nella realizzazione di nuovi travetti a T in calcestruzzo leggero strutturale e opportunamente armati da realizzarsi nello spessore del solaio esistente, al fine di limitare lo spessore complessivo dell'intervento, all'interno dei vuoti appositamente creati rimuovendo file di pignatte del solaio esistente ad interasse precisi



- **Irrigidimento fuori spessore**, che consiste nella realizzazione di nuovi travetti a T in calcestruzzo leggero strutturale e opportunamente armati al di sopra del solaio esistente, mediante la posa di opportuni pannelli di alleggerimento



In entrambi i casi è richiesto l'inserimento della geometria del nuovo travetto a T, la sezione che viene mostrata è quella del solo irrigidimento.



Nello specifico, per gli **irrigidimenti in spessore** di solaio:

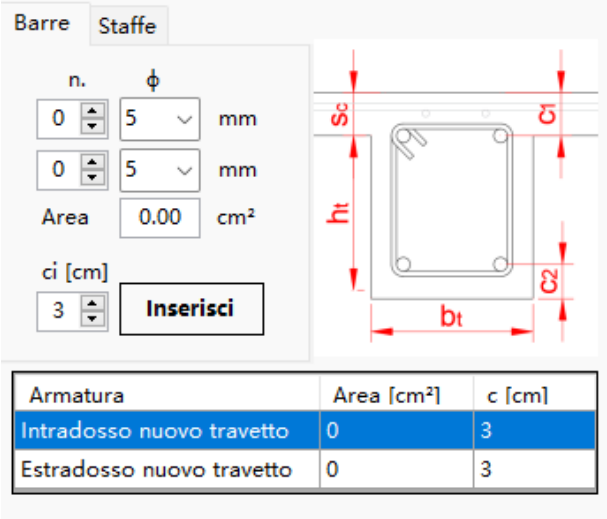
- la base del travetto non può essere superiore all'interasse dei travetti esistenti;
- l'altezza del travetto non può essere superiore allo spessore complessivo del solaio esistente;
- l'interasse deve essere un multiplo dell'interasse del solaio esistente.

Mentre, per gli **irrigidimenti fuori spessore** di solaio:

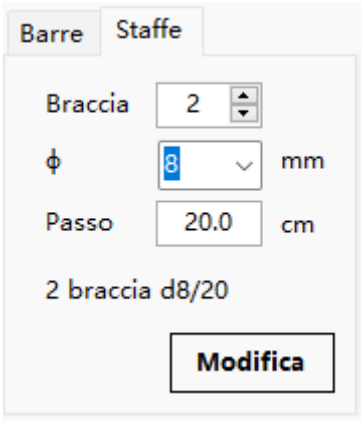
- l'altezza minima del travetto è impostata a 6 cm;
- l'altezza minima della soletta è impostata a 5 cm;
- l'interasse può essere pari a 1 o 2 volte l'interasse dei travetti esistenti.

Si rimanda alla guida dedicata al dimensionamento degli irrigidimenti per ulteriori informazioni.

Per inserire le armature è possibile utilizzare i comandi del riquadro Barre, scegliendo numero e diametro dei ferri e premendo **Inserisci**. Il valore presente nella casella **Area** e il copriferro **c** verranno inseriti nella riga selezionata.



Dal riquadro **Staffe** è possibile inserire la staffatura per l'irrigidimento, in termini di numero di braccia, diametro e passo. Premere **Modifica** per memorizzare i valori inseriti.



I valori delle armature devono essere inseriti per ogni campata, selezionandola tramite la casella **Campata n.** e premendo poi **Applica**.

1.2.9. Verifica irrigidimenti

La maschera **Verifica irrigidimenti** riporta le verifiche svolte per l'irrigidimento progettato, in modo analogo a quanto visto al paragrafo 1.2.7.

Viene mostrato anche il carico in combinazione SLU applicato al singolo travetto di irrigidimento, dato dal peso proprio del nuovo travetto, dal peso del solaio esistente, dei carichi permanenti portati e variabili imputati in precedenza.

Premere **Calcola irrigidimento** per procedere al calcolo.

Il pulsante **Diagrammi M, V** consente di visualizzare i diagrammi sollecitanti e resistenti del solaio irrigidito.

Nel caso di irrigidimento in spessore, compare l'opzione evidenziata relativa alla **Lunghezza di calcolo per scorrimento** da adottare. Di default, il valore è pari alla differenza tra l'interasse dell'irrigidimento e la base del nuovo travetto a T. In caso di modifica da parte dell'utente, è necessario premere nuovamente **Calcola irrigidimento** per procedere al calcolo. Mentre, nel caso di irrigidimento fuori spessore, il programma determina in automatico la larghezza di interconnessione.

2. RIFERIMENTI DI CALCOLO

2.1. Normativa di riferimento

- **D.M. 17/01/2018 "Norme Tecniche per le costruzioni"**, pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018 – Supplemento ordinario n.8

- **CIRCOLARE 21/01/2019, n.7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17/01/2018**, pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n.35 del 11 febbraio 2019 – Supplemento ordinario n.5

- **UNI EN 1992-1-1:2015 "Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici"**

- **UNI EN 1992-4:2018 "Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 4: Progettazione degli attacchi per utilizzo nel calcestruzzo"**

2.2. Calcolo della resistenza a flessione SLU

Il calcolo delle sezioni avviene attraverso una procedura numerica di ricerca dell'asse neutro plastico, che segue i seguenti passi:

- ogni sezione viene resa internamente al programma con una serie di punti, dalla quale si valutano aree, momenti statici e d'inerzia per via numerica;

- viene associato ad ogni figura della sezione il proprio materiale. Dallo stesso materiale vengono assunti i valori di *FC* (Fattore di Confidenza) e γ_m del materiale, oltre alle deformazioni e alle resistenze. Si rimanda alla guida d'uso per legami costitutivi assunti in fase di calcolo;

- vengono calcolate le proprietà geometriche di ogni parte di sezione e viene ricavato il baricentro;

- la sezione viene quindi analizzata traslando l'asse neutro plastico lungo l'altezza e verificando l'equilibrio fra trazione e compressione. Per il calcolo allo SLU viene imposta la deformazione ultima compatibile con materiale, geometria ed armatura e calcolato il piano rappresentante la deformazione congruente in tutti i punti della sezione;

- la ricerca avviene con il metodo di bisezione e, alla convergenza del metodo, vengono forniti i momenti resistenti, la deformazione massima del calcestruzzo e le deformazioni dell'acciaio.

Si rimanda alla sezione dedicata alla verifica a scorrimento per la specifica del calcolo della sezione in campo elastico e della valutazione delle proprietà geometriche.

2.3. Calcolo della resistenza a taglio

La resistenza a taglio viene calcolata con le relazioni di seguito illustrate, distinte per elementi sprovvisti di specifica armatura a taglio e per elementi con armature trasversali resistenti al taglio.

Per elementi sprovvisti di specifica armatura a taglio (in accordo ai paragrafi *§4.1.2.3.5.1* e *§C4.1.12.1.3.2.1* delle *Norme tecniche per le costruzioni*) secondo la relazione seguente:

$$V_{Rd} = \max\left\{\left[\frac{0.18}{\gamma_m} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}\right] \cdot b_w \cdot ds,\ \left(v_{\min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}\right) \cdot b_w \cdot ds\right\}$$

con:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{ds}} \leq 2$$

$$v_{\min} = 0.035 \cdot k^{1.5} \cdot {f_{ck}}^{0.5}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot ds} \leq 0.02$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

e ds altezza utile della sezione, A_{sl} area dell'armatura longitudinale tesa, b_w base minima della sezione reagente.

Nello specifico, in funzione della scelta delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo esistente tra "**Da relazione**", "**Da prove**" e "**Da utente**", il software sostituisce al termine f_{ck} indicato nelle formule precedenti le seguenti formulazioni:

- Da relazione: f_{ck}/FC;
- Da prove: f_{cm}/FC;
- Da utente: f_{cd}.

Con FC Fattore di Confidenza.

Nel caso in cui $f_{ck,LECA} < f_{ck}/FC$ o $f_{ck,LECA} < f_{cm}/FC$ o $f_{ck,LECA} < f_{cd}$ in funzione della scelta eseguita sul calcestruzzo esistente, viene assunta la resistenza del calcestruzzo $f_{ck,LECA}$ nel calcolo della resistenza a taglio (essendo la minima tra le resistenze dei due calcestruzzi coinvolti):

$$V_{rd} = \max\left\{\left[\frac{0.15}{\gamma_m} \cdot \eta_1 \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{lck,LECA}\right)^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}\right] \cdot b_w \cdot ds,\ \left(v_{\mathrm{l,min}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}\right) \cdot b_w \cdot ds\right\}$$

con:

$$\eta_1 = 0.4 + 0.6 \cdot \frac{\rho}{2200}$$

$$v_{\mathrm{l,min}} = 0.030 \cdot k^{1.5} \cdot {f_{lck}}^{0.5}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot ds} \leq 0.02$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

e ρ valore limite superiore della massa per unità di volume del calcestruzzo strutturale leggero, per la classe di massa per unità di volume di appartenenza e con gli altri simboli utilizzati in precedenza.

Per elementi con armature trasversali resistenti al taglio (gli irrigidimenti progettati con il programma), vengono utilizzate le formule seguenti in accordo ai paragrafi *§4.1.2.3.5.2* e *§C4.1.12.1.3.2.2* delle *Norme tecniche per le costruzioni*:

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot\alpha + cot\theta) \cdot \sin\alpha$$

$$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot 0.4 f_{lcd} \cdot \frac{(\cot\alpha + cot\theta)}{(1 + \cot^2\theta)}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

con A_{sw} area dell'armatura trasversale (staffe), *s* passo staffe, $\alpha = 90°$ e $21.8° \leq \theta \leq 45°$.

Di default, l'angolo θ viene ricercato automaticamente per la rottura a taglio bilanciata salvo impostazioni utente.

2.4. Verifica a scorrimento sulla superficie di contatto con la nuova cappa (Connettore Chimico)

Per il calcolo della perfetta adesione tra la nuova soletta in calcestruzzo strutturale leggero e il solaio esistente, si confronta la tensione tagliante presente all'interfaccia soletta-solaio esistente con il valore di progetto del *Connettore CentroStorico Chimico*, necessaria per la corretta collaborazione tra le due parti.

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento positivo:

$$n^{+} = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,LECA}}{2}}$$

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento negativo:

$$n^{-} = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,esistente}}{2}}$$

$$\tau_{interfaccia} = \frac{V_{Sd,max} \cdot S_{int}}{J_n \cdot b} < 0.72\ MPa$$

dove 0.72 MPa rappresenta il valore di confronto considerato per il *Connettore CentroStorico Chimico*, ottenuto mediante prove sperimentali al Politecnico di Milano.

I termini della formula di Jourawsky indicano:

- **$V_{Sd,max}$**: valore massimo della forza di taglio agente in combinazione SLU;
- **S_{int}**: momento statico (sezione parzializzata) della porzione al di sopra della corda rispetto alla quale calcolare lo sforzo di taglio. Viene considerato il contributo del calcestruzzo compresso e/o dell'armatura sopra la corda;
- **J_n**: inerzia dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro;
- **b**: larghezza della corda da considerare, pari alla minima larghezza di contatto fra solaio esistente e nuova soletta. Nel caso di irrigidimento in spessore di solaio, la lunghezza è la differenza fra l'interasse e la base dell'irrigidimento.

Il programma restituisce i valori sollecitanti e resistenti in corrispondenza del massimo rapporto di utilizzazione.

La ricerca dell'asse neutro elastico viene condotta come segue:

- ogni sezione viene resa internamente al programma con una serie di punti, dalla quale si valutano aree, momenti statici e d'inerzia per via numerica;

- viene associato ad ogni figura della sezione il proprio materiale. Dallo stesso materiale vengono assunti i valori di *FC* (Fattore di Confidenza) e γ_m del materiale, oltre alle deformazioni e alle resistenze;

- vengono calcolate le proprietà geometriche di ogni parte di sezione e viene ricavato il baricentro;

- la sezione viene quindi analizzata valutando le deformazioni conseguenti all'applicazione del momento sollecitante. Vengono quindi individuate le parti reagenti calcolando le tensioni di ogni materiale presente (calcestruzzo, barre);

- viene restituita la posizione dell'asse neutro.

In particolare, viene descritto il calcolo dell'area e del momento statico di una sezione definita da *N* punti x_i, y_i.

$$A = \frac{1}{2}\sum_i (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$$

$$S_x = \frac{1}{6}\sum_i (x_{i+1} - x_i)({y_i}^2 + y_i y_{i+1} + {y_{i+1}}^2)$$

Analogamente si procede per il momento d'inerzia.

In particolare, per il momento statico della sezione parzializzata, si procede nel modo seguente:

- viene acquisita la parte di sezione reagente, ovvero l'area di calcestruzzo compressa e le armature;

- si trasla l'asse orizzontale della sezione in corrispondenza dell'asse neutro;

- si calcola il momento statico della sezione parzializzata considerando solo le parti al di sopra della corda di verifica, posizionata fra la nuova soletta in calcestruzzo strutturale leggero e il solaio esistente nel caso di solaio rinforzato. Nel caso di irrigidimento in spessore, la corda è all'interfaccia fra nuovo travetto e soletta soprastante, mentre nel caso di irrigidimento fuori spessore la corda si trova alla base del nuovo travetto.

Analogamente si procede per il momento d'inerzia.

Si rimanda infine al capitolo di validazione seguente per l'illustrazione delle formule analitiche nei vari casi.

2.5. Valutazione della resistenza di calcolo dei connettori meccanici

La resistenza del connettore viene valutata secondo quanto espresso da UNI EN 1992-4:2018:

$$P_{Rd} = min(V_{Rd,s};\ V_{Rd,cp};\ V_{Rd,c})$$

dove:

- $V_{Rd,s}$ è la resistenza di un ancorante per le caratteristiche meccaniche dell'acciaio che lo compone;
- $V_{Rd,cp}$ è la resistenza di un ancorante per rottura per pry-out del calcestruzzo;
- $V_{Rd,c}$ è la resistenza di un ancorante nei confronti della rottura del bordo del calcestruzzo.

Inoltre, la resistenza del sistema di connessione dipende fortemente dallo stato di sollecitazione del calcestruzzo in cui è inserito, pertanto, si calcolano due diversi valori di P_{Rd}:

- $P_{Rd,ck}$: resistenza di progetto da impiegare ai fini del calcolo nelle porzioni di solaio laddove il calcestruzzo esistente sia fessurato;
- $P_{Rd,uck}$: resistenza di progetto da impiegare ai fini del calcolo nelle porzioni di solaio laddove il calcestruzzo esistente sia non fessurato.

La valutazione e le specifiche dei paragrafi successivi sono riferite alla UNI EN 1992-4:2018 con gli adattamenti relativi al caso di travetti di solaio.

2.5.1. Limiti applicativi

I limiti applicativi di ***Mini Connettore Calcestruzzo*** sono di seguito riportati:

- Base del travetto: $b_t \geq 7\ cm$, riportato nella Specifica norma tecnica europea di prodotto (ETA20/0830). Qualora il limite non risulti rispettato, il calcolo non viene eseguito dal software e viene suggerito di passare a ***Connettore CentroStorico Chimico***;
- Spessore del solaio (pari alla somma dell'altezza del travetto h_t e della caldana esistente h_c, se presente): $h_t + h_c \geq 10\ cm$. Qualora il limite non risulti rispettato, il calcolo non viene eseguito dal software e viene suggerito di passare a ***Connettore CentroStorico Chimico***;
- Spessore nuova soletta suggerito: $4\ cm \leq s_n \leq 5\ cm$. Qualora si desideri realizzare una soletta di spessore inferiore al minimo, il software suggerisce l'impiego dei sistemi FRC di Laterlite mentre qualora si desideri realizzare una soletta di spessore superiore a 5 cm il software suggerisce di passare a ***Connettore CentroStorico Chimico*** o a ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***, ma non impedisce la prosecuzione del calcolo;
- Non è previsto l'impiego di pannelli di alleggerimento.

Le dimensioni minime del solaio ai fini della possibile installazione di ***Connettore Calcestruzzo Plus D12*** sono:

- Base del travetto: $b_t \geq 12\ cm$, riportato nella Specifica norma tecnica europea di prodotto (ETA20/0830). Qualora la base del travetto sia $10\ cm \leq b_t < 12\ cm$, il software ricorda che è inferiore al minimo riportato nell'ETA e suggerisce di passare a ***Connettore CentroStorico Chimico*** o

a ***Mini Connettore Calcestruzzo***, ma non impedisce la prosecuzione del calcolo mentre qualora la base del travetto sia $b_t < 10\ cm$, il calcolo non viene eseguito;

- Spessore del solaio (pari alla somma dell'altezza del travetto h_t e della caldana esistente h_c, se presente): $h_t + h_c \geq 12\ cm$. Qualora il limite non risulti rispettato, il calcolo non viene eseguito dal software e viene suggerito di passare a ***Connettore CentroStorico Chimico*** o a ***Mini Connettore Calcestruzzo***;
- Spessore nuova soletta: $s_n \geq 5\ cm$.

2.5.2. Rottura dell'acciaio dell'ancorante $V_{Rd,s}$

La resistenza caratteristica di un ancorante per rottura dell'acciaio che lo compone viene valutata in accordo al paragrafo §7.2.2.1 UNI EN 1992-4:2018:

$$V_{Rd,s} = \frac{V_{Rk,s}}{\gamma_{Ms}}$$

dove:

- $V_{Rk,s}$ è la resistenza di un ancorante per le caratteristiche meccaniche dell'acciaio che lo compone nei confronti di carichi di taglio ed è riportato nella Specifica norma tecnica europea di prodotto (ETA20/0830) pari a 7.5 kN per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e 25.6 kN per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***;
- γ_{Ms} è il fattore parziale di sicurezza riportato nella Specifica norma tecnica europea di prodotto (ETA20/0830) pari a 1.25.

2.5.3. Rottura per pry-out del calcestruzzo $V_{Rd,cp}$

Il riferimento per il calcolo di $V_{Rd,cp}$ è il paragrafo §7.2.2.4 UNI EN 1992-4:2018. Per ricavare la resistenza nei confronti della rottura per pry-out del calcestruzzo, occorre conoscere la resistenza caratteristica di un ancoraggio per sforzi di trazione nei confronti di una rottura conica del calcestruzzo. Tale modalità di rottura dipende fortemente dallo stato di compressione/trazione del calcestruzzo nel quale viene inserito il connettore e, per tale ragione, si calcolano due valori di $N_{Rk,c}$ (uno per la condizione di calcestruzzo fessurato e uno per la condizione di calcestruzzo non fessurato), in accordo al paragrafo §7.2.1.4 UNI EN 1992-4:2018:

$$N_{Rk,c} = N^0_{Rk,c} \cdot \frac{A_{c,N}}{A^0_{c,N}} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N}$$

$N^0_{Rk,c}$ è la resistenza caratteristica del singolo ancorante non influenzato da ancoranti adiacenti o bordi del calcestruzzo in cui è inserito, e si valuta come:

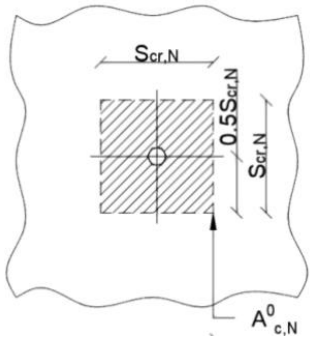
$$N^0_{Rk,c} = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5}$$

dove:

- k_1 è pari a 7.7 per calcestruzzo fessurato ($k_{1,cr}$) e pari a 11 per calcestruzzo non fessurato ($k_{1,ucr}$);

- f_{ck} è la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo (riferito a quello in cui si inserisce il connettore ovvero quello esistente). Nello specifico, in funzione della scelta delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo esistente nella maschera Materiali, il software utilizza il valore di f_{ck} se viene selezionato "**Da relazione**", il valore di f_{cm} se viene selezionato "**Da prove**" e il valore di f_{cd} se viene selezionato "**Da utente**";
- h_{ef} è la lunghezza effettiva di ancoraggio ed è un valore riportato nella Specifica tecnica di prodotto europea (ETA20/0830), pari a 42 mm per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e 52 mm per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***.

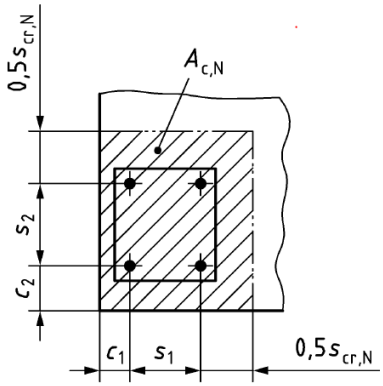
$A_{c,N}^0$ è l'area di proiezione di riferimento che valuta l'influenza della posizione dell'installazione dell'ancorante nei confronti del bordo del calcestruzzo, e si valuta come:



$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N}$$

dove $s_{cr,N}$ è la spaziatura critica nei confronti del cono di rottura del calcestruzzo ed è un valore riportato nella Specifica tecnica di prodotto europea (ETA20/0830), pari a 126 mm per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e 156 mm per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***.

$A_{c,N}$ è l'area di proiezione effettiva limitata dalla sovrapposizione dei coni di rottura degli ancoranti adiacenti e si valuta come:

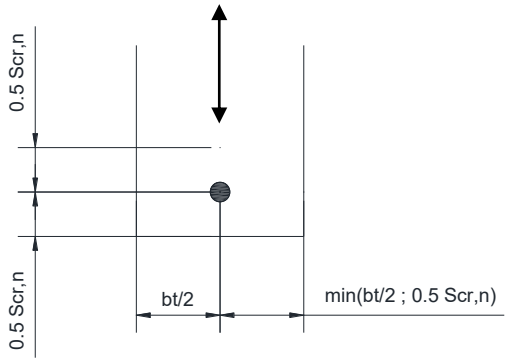


$$A_{c,N} = \left(c_1 + s_1 + 0.5 s_{cr,N}\right) \cdot \left(c_2 + s_2 + 0.5 s_{cr,N}\right)$$

Nel caso dei solai, se $h_{ef} \leq h_c$ (con h_c spessore della caldana esistente) oppure se $s_{cr,N} \leq b_t$ (con b_t base del travetto), $A_{c,N} = A_{c,N}^0$, altrimenti si segue la formulazione illustrata nel seguito.

Nel caso specifico dei solai non si impegnano né ancoranti di gruppo né in doppia fila: questo significa che s_1 e s_2 sono pari 0; c_1 è la distanza dal bordo ed è pari a $b_t/2$ e c_2 è la distanza dal bordo nella direzione di orditura del travetto, assimilata a $0.5s_{cr,N}$ (con $s_{cr,N} = 126\ mm$ per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e $s_{cr,N} = 156\ mm$ per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***) vista l'estensione dei travetti all'interno delle murature.

In riferimento all'immagine precedente, nella situazione in esame diventa:



Pertanto, la formula precedente diventa:

$$A_{c,N} = \left(\frac{b_t}{2} + min\left(\frac{b_t}{2}; 0.5s_{cr,N}\right)\right) \cdot s_{cr,N}$$

$\psi_{s,N}$ è il fattore riduttivo che tiene conto della distorsione della distribuzione delle sollecitazioni nel calcestruzzo a causa della vicinanza con il bordo dell'elemento in cui viene installato il sistema di connessione e viene valutato come:

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} \leq 1$$

dove:

- c è la distanza effettiva dell'ancorante rispetto al bordo (pari a $b_t/2$ poiché ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e ***Connettore Calcestruzzo Plus D12*** vengono installati nella mezzeria del travetto);
- $c_{cr,N}$ è la distanza critica dal bordo nei confronti di rottura del cono del calcestruzzo ed è un valore riportato nella Specifica tecnica di prodotto europea (ETA20/0830), pari a 63 mm per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e 78 mm per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***.

$\psi_{re,N}$ è il fattore di spalling che valuta l'effetto delle armature, tra cui è installato il connettore quando $h_{ef} < 100\ mm$ e viene valutato come:

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1$$

con h_{ef} lunghezza effettiva di ancoraggio ed è un valore riportato nella Specifica tecnica di prodotto europea (ETA20/0830), pari a 42 mm per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e 52 mm per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***.

$\psi_{ec,N}$ e $\psi_{M,N}$ sono rispettivamente il coefficiente che considera l'effetto di gruppo e il coefficiente che tiene conto dell'effetto di una forza di compressione tra ancorante e calcestruzzo nel caso di momenti flettenti: non sono da considerare nel caso specifico in quanto non previsti dalle applicazioni di ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***.

È quindi possibile determinare la resistenza di un ancorante nei confronti di sforzi di taglio per rottura per pry-out del calcestruzzo su lato opposto alla direzione di carico. Tale resistenza viene valutata come:

$$V_{Rd,cp} = \frac{k_8 \cdot N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}}$$

dove:

- k_8 è lo specifico fattore pari a 1.0 ed è riportato nella Specifica norma tecnica europea di prodotto (ETA20/0830);
- $N_{Rk,c}$ è la resistenza di un ancorante sottoposto a trazione in caso di rottura per cono del calcestruzzo precedentemente calcolata;
- γ_{Mc} è il fattore parziale di sicurezza riportato nella Specifica norma tecnica europea di prodotto (ETA20/0830) pari a 1.50.

2.5.4. Rottura del bordo di calcestruzzo $V_{Rd,c}$

Il riferimento per il calcolo di $V_{Rd,c}$ è il paragrafo §7.2.2.5 UNI EN 1992-4:2018. Tale modalità di rottura dipende fortemente dallo stato di compressione/trazione del calcestruzzo nel quale viene inserito il connettore e, per tale motivo, si calcolano due valori di $V_{Rk,c}$ (uno per la condizione di calcestruzzo fessurato e uno per la condizione di calcestruzzo non fessurato). La resistenza caratteristica di un ancoraggio caricato verso il bordo è valutabile come:

$$V_{Rk,c} = V^0_{Rk,c} \cdot \frac{A_{c,V}}{A^0_{c,V}} \cdot \psi_{s,V} \cdot \psi_{h,V} \cdot \psi_{ec,V} \cdot \psi_{\alpha,V} \cdot \psi_{re,V}$$

$V^0_{Rk,c}$ è la resistenza iniziale caratteristica del singolo ancorante caricato perpendicolarmente al bordo e si valuta come:

$$V^0_{Rk,c} = k_9 \cdot d^{\alpha}_{nom} \cdot l^{\beta}_f \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot c_1^{1.5}$$

dove:

- k_9 è pari a 1.7 per calcestruzzo fessurato ($k_{9.cr}$) e pari a 2.4 per calcestruzzo non fessurato ($k_{9.ucr}$);
- d_{nom} è il diametro esterno dell'ancorante ed è riportato nella pertinente Specifica tecnica di prodotto europea (ETA20/0830) ed è pari a 7.5 mm per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e 12.5 mm per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***;
- l_f (nel caso di connettori con diametro uniforme) è pari a h_{ef} ovvero la lunghezza effettiva di ancoraggio, valore riportato nella Specifica tecnica di prodotto europea (ETA20/0830) pari a 42 mm per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e 52 mm per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***;
- f_{ck} è la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo (riferito a quello in cui si inserisce il connettore ovvero quello esistente). Nello specifico, in funzione della scelta delle caratteristiche

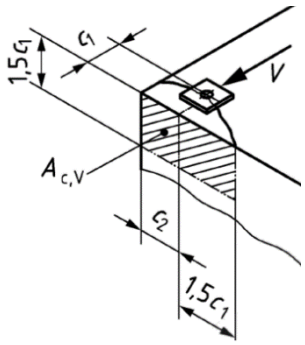
meccaniche del calcestruzzo esistente nella maschera Materiali, il software utilizza il valore di f_{ck} se viene selezionato "**Da relazione**", il valore di f_{cm} se viene selezionato "**Da prove**" e il valore di f_{cd} se viene selezionato "**Da utente**";

- c_1 è la distanza minima dal bordo pari a $b_t/2$;
- α e β sono dei parametri numerici adimensionali e si valutano come:

$$\alpha = 0.1 \cdot \left(\frac{l_f}{c_1}\right)^{0.5}$$

$$\beta = 0.1 \cdot \left(\frac{d_{nom}}{c_1}\right)^{0.2}$$

$A_{c,V}$ è l'area del corpo di rottura del calcestruzzo idealizzato, limitata dai coni di calcestruzzo sovrapposti degli ancoranti adiacenti, dalla vicinanza dal bordo e dallo spessore dell'elemento in cui è installato:



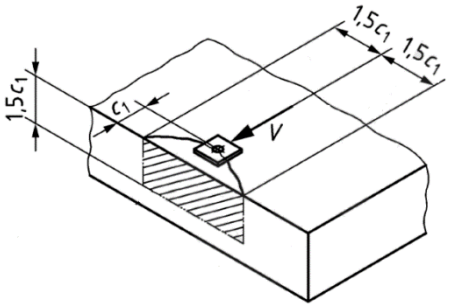
$$A_{c,v} = 1.5c_1 \cdot (c_2 + 1.5c_1)$$

Nel caso specifico dei solai c_2 è pari a $b_t/2$ e c_1 è la distanza del primo connettore rispetto a filo muro (30 mm per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e 45 mm per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***), trascurando a favore di sicurezza che il travetto prosegue all'interno della muratura/parete. Essendo $A_{c,v}$ un'area effettiva, si deve verificare che si possa sviluppare effettivamente all'interno della geometria specifica del solaio in esame. Pertanto, la formula sopra indicata diventa:

$$A_{c,v} = min(h_t + h_c\ ;\ 1.5c_1) \cdot min(3c_1\ ;\ b_t)$$

con h_t altezza del travetto, h_c spessore della caldana esistente (se presente), b_t base del travetto.

$A^0_{c,V}$ è l'area di proiezione di riferimento per il campo di rottura idealizzato di un singolo ancorante:



$$A_{c,v}^{0} = 1.5c_1 \cdot (1.5c_1 + 1.5c_1) = 4.5c_1^2$$

Nel caso specifico dei solai c_1 è la distanza del primo connettore rispetto a filo muro (30 mm per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e 45 mm per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***).

$\psi_{s,V}$ è il fattore riduttivo che tiene conto della distorsione della distribuzione delle sollecitazioni nel calcestruzzo dovute ad altri bordi dell'elemento di calcestruzzo sulla resistenza a taglio e viene valutato come:

$$\psi_{s,V} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c_2}{1.5c_1} \leq 1$$

Nel caso specifico di $\psi_{s,V}$, c_1 e c_2 sono equivalenti in quanto i connettori vengono posizionati al centro del travetto e quindi assumono entrambi il valore di $b_t/2$.

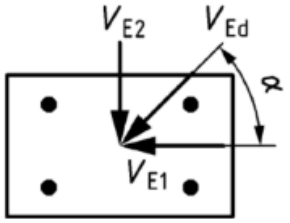
$\psi_{h,V}$ è il fattore che tiene conto che la resistenza del bordo di calcestruzzo non decresce proporzionalmente allo spessore dell'elemento assunto dal rapporto $\frac{A_{c,V}}{A_{c,V}^{0}}$ e viene valutato come:

$$\psi_{h,V} = \left(\frac{1.5c_1}{h}\right)^{0.5} = \left(\frac{1.5 \cdot \frac{b_t}{2}}{h_t + h_c}\right)^{0.5} \geq 1$$

dove h rappresenta l'altezza dell'elemento in cui è installato il sistema di ancoraggio e coincide con l'altezza del travetto se il solaio è rasato altrimenti con la somma dell'altezza del travetto e dello spessore della caldana esistente, c_1 è pari a $b_t/2$.

$\psi_{ec,V}$ è il coefficiente che considera l'effetto di gruppo, non risulta essere rilevante per le modalità applicative di ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***.

$\psi_{\alpha,V}$ è il fattore che tiene conto che la resistenza del bordo di calcestruzzo non decresce proporzionalmente allo spessore dell'elemento assunto dal rapporto $\frac{A_{c,V}}{A_{c,V}^{0}}$ e viene valutato come:



$$\psi_{\alpha,V} = \sqrt{\frac{1}{(cos\,\alpha_V)^2 + (0.5sin\,\alpha_V)^2}} \geq 1$$

dove α_V è l'angolo compreso tra un carico di taglio sollecitante di progetto V_{Ed} e una retta perpendicolare al bordo verificato, nel caso di ancoranti singoli disposti su solai: $\alpha_V = 90°$.

$\psi_{re,V}$ è il fattore che tiene conto dell'effetto dell'armatura situata lungo il bordo ed è pari a 1.0 sia in condizione di calcestruzzo fessurato che non fessurato.

È quindi possibile determinare la resistenza di un ancorante nei confronti di sforzi di taglio per rottura del bordo del calcestruzzo. Tale resistenza viene valutata come:

$$V_{Rd,c} = \frac{V_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}}$$

dove:

- $V_{Rk,c}$ è la resistenza di un ancorante nei confronti della rottura rispetto al bordo del calcestruzzo precedentemente calcolata;
- γ_{Mc} è il fattore parziale di sicurezza riportato nella Specifica norma tecnica europea di prodotto (ETA20/0830), pari a 1.50.

2.6. Calcolo dello scorrimento e dell'aderenza all'interfaccia (Connettori meccanici)

Il numero di connettori da impiegare è quello necessario a trasmettere lo scorrimento tra il solaio esistente e la nuova soletta in calcestruzzo leggero strutturale. Lo scorrimento si calcola tramite la formula di Jourawsky.

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento positivo:

$$n^{+} = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,LECA}}{2}}$$

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento negativo:

$$n^{-} = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,esistente}}{2}}$$

$$\tau_{interfaccia} \cdot b = \frac{V_{Sd} \cdot S_{int}}{J_n}$$

I termini della formula di Jourawsky indicano:

- **V_{Sd}**: valore della forza di taglio agente in combinazione SLU nella sezione considerata;
- **S_{int}**: momento statico (sezione parzializzata) della porzione al di sopra della corda rispetto alla quale calcolare lo sforzo di taglio. Viene considerato il contributo del calcestruzzo compresso e/o dell'armatura sopra la corda;
- **J_n**: inerzia dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro;
- **b**: larghezza della corda da considerare, pari alla minima larghezza di contatto fra solaio esistente e nuova soletta.

Tale scorrimento ($\tau_{interfaccia} \cdot b$) viene confrontato con la resistenza di progetto del connettore P_{Rd} (in zona fessurata o in zona non fessurata in funzione della sezione considerata), come illustrato al paragrafo seguente. Si considera inoltre il contributo offerto dall'aderenza allo scorrimento v_{Rdi}, valutato in accordo al paragrafo §6.2.5 UNI EN 1992-1-1:2015, utilizzando i parametri per superficie liscia, con la seguente formula:

$$v_{Rdi} = min\left(c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot sin\,\alpha + cos\,\alpha);\ 0.5 \cdot \nu \cdot f'_{cd}\right)$$

dove:

- $\boldsymbol{c}$ e $\boldsymbol{\mu}$ per superficie liscia valgono rispettivamente 0.2 e 0.6;
- $\boldsymbol{f_{ctd}}$ è il valore della resistenza di trazione di progetto (valutata come segue);
- $\boldsymbol{\sigma_n}$ è la tensione di compressione prodotta dalla forza esterna minima agente all'interfaccia che può agire simultaneamente con la forza di taglio (valutata come segue);
- $\boldsymbol{\rho}$ è il rapporto tra l'area di armatura specifica trasversale che attraversa l'interfaccia e l'area del giunto (pari a 0 nel caso specifico);
- $\boldsymbol{\nu}$ è un coefficiente di riduzione della resistenza (valutato come segue).

La resistenza a trazione di progetto f_{ctd} viene valutata come la minima tra la resistenza a trazione del calcestruzzo esistente e quella del calcestruzzo strutturale leggero:

$$f_{ctd} = min\left(f_{ctd,esistente}\ ;\ f_{lctd}\right)$$

con:

$$f_{ctd,esistente} = \begin{Bmatrix} \dfrac{0.7\ \cdot 0.3\ {f_{ck}}^{2/3}}{FC \cdot \gamma_c} & da\ relazione \\ \dfrac{0.7\ \cdot 0.3\ {f_{cm}}^{2/3}}{FC \cdot \gamma_c} & da\ prove \\ 0.7\ \cdot 0.3\ {f_{cd}}^{2/3} & da\ utente \end{Bmatrix}$$

$$f_{lctd} = \frac{0.85 \cdot f_{lctk}}{\gamma_c}$$

$$f_{lctk} = 0.7 \cdot f_{lctm}$$

$$f_{lctm} = 0.3 \cdot f_{lck}^{2/3} \cdot \eta_1$$

$$\eta_1 = 0.4 + 0.6 \cdot \frac{\rho}{2200}$$

dove ρ è il valore limite superiore della massa per unità di volume del calcestruzzo, per la classe di massa per unità di volume di appartenenza in kg/m^3.

La tensione di compressione prodotta dalla forza esterna minima agente all'interfaccia che può agire simultaneamente con la forza di taglio risulta:

$$\sigma_n = min(q^*_{slu}\ ;\ 0.6 f'_{cd})$$

con:

$$q^*_{slu} = \gamma_{G1} \cdot [P_{soletta} + P_{massetto} + P_{sottofondo}] + \gamma_{G2} \cdot P_{altri} + \gamma_Q \cdot Q_{var}$$

$$f'_{cd} = min(f_{cd,esistente,parametri\ fragili};\ f_{lcd})$$

Il coefficiente ν risulta:

$$\nu = min\left[0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck,esistente}}{250}\right); 0.5 \cdot \left(1 - \frac{f_{lck}}{250}\right)\right]$$

dove per $f_{ck,esistente}$, in funzione della scelta delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo esistente nella maschera Materiali, il software utilizza il valore di f_{ck} se viene selezionato "**Da relazione**", il valore di f_{cm} se viene selezionato "**Da prove**" e il valore di f_{cd} se viene selezionato "**Da utente**"; e f_{lck} rappresenta la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo leggero strutturale.

Il termine v_{Rdi} viene poi moltiplicato per il termine L, al fine di ottenere una quantità confrontabile con $\tau_{interfaccia} \cdot b$. Il termine L rappresenta la larghezza di pertinenza cui viene affidato lo scorrimento per aderenza, pari a:

$$L = \begin{Bmatrix} b_t & se\ h_c < 20\ mm\ e\ h_p = 0\ mm \\ i_{tr} & se\ h_c \geq 20\ mm\ e\ h_p = 0\ mm \\ \min(b_t; b_r) & se\ h_c < 20\ mm\ e\ h_p > 0\ mm \\ b_r & se\ h_c \geq 20\ mm\ e\ h_p > 0\ mm \end{Bmatrix}$$

con b_t base del travetto, i_{tr} interasse del solaio, h_c spessore della caldana esistente, h_p spessore del pannello di alleggerimento e b_r base del raccordo in calcestruzzo (se presente il pannello di alleggerimento).

La ricerca dell'asse neutro elastico viene condotta come segue:

- ogni sezione viene resa internamente al programma con una serie di punti, dalla quale si valutano aree, momenti statici e d'inerzia per via numerica;
- viene associato ad ogni figura della sezione il proprio materiale. Dallo stesso materiale vengono assunti i valori di *FC* (Fattore di Confidenza) e γ_m del materiale, oltre alle deformazioni e alle resistenze;
- vengono calcolate le proprietà geometriche di ogni parte di sezione e viene ricavato il baricentro;
- la sezione viene quindi analizzata valutando le deformazioni conseguenti all'applicazione del momento sollecitante. Vengono quindi individuate le parti reagenti calcolando le tensioni di ogni materiale presente (calcestruzzo, barre);
- viene restituita la posizione dell'asse neutro.

In particolare, viene descritto il calcolo dell'area e del momento statico di una sezione definita da *N* punti x_i, y_i.

$$A = \frac{1}{2}\sum_i (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$$

$$S_x = \frac{1}{6}\sum_i (x_{i+1} - x_i)({y_i}^2 + y_i y_{i+1} + {y_{i+1}}^2)$$

Analogamente si procede per il momento d'inerzia.

In particolare, per il momento statico della sezione parzializzata, si procede nel modo seguente:

- viene acquisita la parte di sezione reagente;
- si trasla l'asse orizzontale della sezione in corrispondenza dell'asse neutro;
- si calcola il momento statico della sezione parzializzata considerando solo le parti al di sopra della corda di verifica, posizionata all'interfaccia solaio esistente-nuova soletta.

Analogamente si procede per il momento d'inerzia.

2.7. Calcolo del passo e della distribuzione dei connettori

Ai fini del calcolo del passo e della distribuzione dei connettori, risulta necessario conoscere:

- lo scorrimento all'interfaccia $\tau_{interfaccia} \cdot b$, con b larghezza della corda da considerare, pari alla minima larghezza di contatto fra solaio esistente e nuova soletta;
- la resistenza allo scorrimento offerta dall'aderenza $v_{Rdi} \cdot L$;
- la resistenza di calcolo del connettore scelto in zona fessurata $P_{Rd,ck}$ e in zona non fessurata $P_{Rd,uck}$;
- il verso del momento sollecitante nella condizione pre-intervento, di seguito denominato $M_{sd,pre-int}$;
- l'affondamento dell'asse neutro a momento positivo nella condizione pre-intervento, di seguito denominato $A^{+}_{N,pre-int}$.

Per ogni punto in cui è stato discretizzato il solaio analizzato, si calcola il passo (denominato PC = passo calcolato) dei connettori nella coordinata considerata come segue:

$$PC\ [mm] = \begin{cases} \dfrac{P_{Rd,ck}}{(\tau_{interfaccia} \cdot b) - (v_{Rdi} \cdot L)} & se\ M_{sd,pre-int} < 0 \\ \dfrac{P_{Rd,ck}}{(\tau_{interfaccia} \cdot b) - (v_{Rdi} \cdot L)} & se\ M_{sd,pre-int} \geq 0\ e\ A^{+}_{N,pre-int} < 0.9 h_{ef} \\ \dfrac{P_{Rd,uck}}{(\tau_{interfaccia} \cdot b) - (v_{Rdi} \cdot L)} & se\ M_{sd,pre-int} \geq 0\ e\ A^{+}_{N,pre-int} \geq 0.9 h_{ef} \end{cases}$$

Per ogni coordinata, qualora il passo calcolato PC risulti inferiore o pari a zero o superiore alla spaziatura massima, si impone la spaziatura massima pari a 500 mm, ottenendo così il passo calcolato corretto PCC:

$$PCC\ [mm] = \begin{Bmatrix} s_{max} = 500\ mm & se\ PC \leq 0\ o\ PC > s_{max} \\ PC & se\ 0 < PC \leq s_{max} \end{Bmatrix}$$

Il software calcola sempre sia la posa con spaziatura variabile sia la posa con spaziatura costante per campata, riportando entrambe le opzioni di posa all'interno della relazione e la sola opzione di posa con spaziatura variabile cliccando sul pulsante **Tabella connettori** nell'interfaccia del software.

2.7.1. Spaziatura variabile

Per ogni campata, il software identifica i punti in cui è stato discretizzato il solaio appartenenti a $L/4$ di sinistra, a $L/4$ di destra e a $L/2$ centrali e determina il passo teorico di posa nel tratto considerato nel modo seguente:

$$passo\ teorico = \begin{cases} min(PCC)\ in\ \dfrac{L}{4}\ di\ sinistra \\ min(PCC)\ in\ \dfrac{L}{2}\ centrali \\ min(PCC)\ in\ \dfrac{L}{4}\ di\ destra \end{cases}$$

Noto il passo teorico, è possibile calcolare il numero teorico di connettori per il tratto considerato:

$$N.conn\ teorico = \frac{L_i}{passo\ teorico}$$

con L_i pari alla lunghezza del tratto considerato.

$N.conn\ teorico$ risulta essere un numero non intero, si procede quindi ad arrotondare il numero di connettori teorico, trovando così $N.connettori$ e quindi il passo reale cui andranno posati i connettori nel tratto considerato:

$$passo = \frac{L_i}{N.connettori}$$

Nello specifico, l'arrotondamento viene eseguito nel seguente modo:

- al primo intero successivo per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** sia in $L/4$ che in $L/2$;
- al primo intero successivo per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12*** in $L/4$;
- al primo intero successivo pari per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12*** in $L/2$.

Se in uno dei tratti $passo$ risulta minore della spaziatura critica $s_{cr,N}$ (pari a 126 mm per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e $s_{cr,N} = 156\ mm$ per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***), il software segnala, con un apposito alert, che la spaziatura calcolata risulta inferiore alla spaziatura critica secondo ETA.

Il numero di connettori a m^2 si ottiene facendo la somma di $N.connettori$ sui diversi tratti e dividendo il totale per la somma delle luci delle campate e l'interasse.

Qualora in una campata sia presente l'estremo libero, in tale campata il software restituisce la posa con spaziatura costante (calcolata come indicato al paragrafo seguente), mantenendo la posa con spaziatura variabile nelle altre campate del solaio (se presenti).

2.7.2. Spaziatura costante per campata

Per ogni campata, il software determina il passo teorico di posa nel modo seguente:

$$passo\ teorico = min(PCC)$$

Noto il passo teorico, è possibile calcolare il numero teorico di connettori per la campata considerata:

$$N.conn\ teorico = \frac{L_i}{passo\ teorico}$$

con L_i pari alla lunghezza della campata considerata.

$N.conn\ teorico$ risulta essere un numero non intero, si procede quindi ad arrotondare il numero di connettori teorico, trovando così $N.connettori$ e quindi il passo reale cui andranno posati i connettori:

$$passo = \frac{L_i}{N.connettori}$$

Nello specifico, l'arrotondamento viene eseguito nel seguente modo:

- al primo intero successivo per ***Mini Connettore Calcestruzzo***;
- al primo intero successivo pari per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12*** nelle campate senza l'estremo libero;
- al primo intero successivo per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12*** nelle campate con estremo libero.

Se in una delle campate $passo$ risulta minore della spaziatura critica $s_{cr,N}$ (pari a 126 mm per ***Mini Connettore Calcestruzzo*** e $s_{cr,N} = 156\ mm$ per ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***), il software segnala, con un apposito alert, che la spaziatura calcolata risulta inferiore alla spaziatura critica secondo ETA.

Il numero di connettori a m^2 si ottiene facendo la somma di $N.connettori$ sulle diverse campate e dividendo il totale per la somma delle luci delle campate e l'interasse.

3. VALIDAZIONE DEL CALCOLO

Nel presente capitolo, si riportano degli esempi di calcolo quale validazione delle procedure di calcolo adottate nel programma.

3.1. Caso 1 – Solaio con nuova soletta e Connettore CentroStorico Chimico

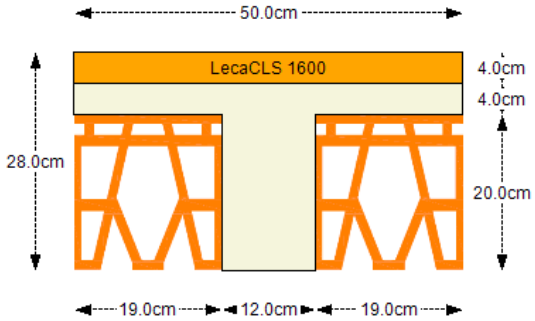
Si analizza un solaio esistente, con le caratteristiche di seguito descritte, consolidato mediante realizzazione di una nuova soletta in calcestruzzo leggero strutturale ***LecaCLS 1600***, interconnessa al solaio esistente mediante ***Connettore CentroStorico Chimico***.

Si adottano i seguenti materiali esistenti:

- per il calcestruzzo esistente, si seleziona "**Da relazione**" la classe C20/25 e un Livello di Conoscenza LC2 corrispondente ad un Fattore di Confidenza pari a 1.20;
- per l'acciaio esistente, si seleziona "**Da relazione**" la classe FeB44k e un Livello di Conoscenza LC1 corrispondente ad un Fattore di Confidenza pari a 1.35.

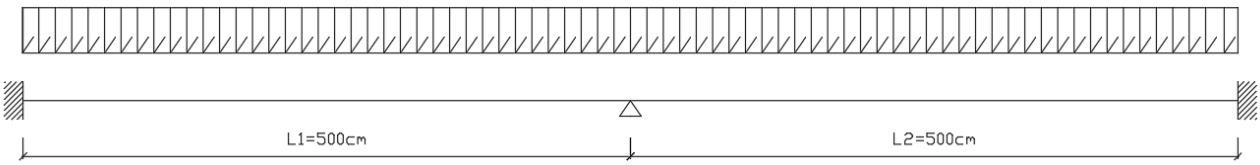
Il calcolo viene svolto assumendo un comportamento fragile dei materiali esistenti.

Viene adottata la seguente geometria:



GEOMETRIA		
Spessore nuova soletta	4.0	cm
Spessore caldana esistente	4.0	cm
Base travetto	12.0	cm
Altezza travetto	20.0	cm
Interasse travetti	50.0	cm
Lunghezza campata 1	500.0	cm
Lunghezza campata 2	500.0	cm

Lo schema statico del solaio è costituito da 2 campate da 500 cm con incastro alle estremità:



Il carico allo Stato Limite Ultimo è determinato come segue:

Coefficienti di sicurezza	Carichi permanenti strutturali	γ_{G1}	1.3	-
	Altri carichi permanenti non strutturali	γ_{G2}	1.5	-
	Carichi variabili	γ_{Q}	1.5	-
Peso proprio	Solaio esistente	G_1	3.11	kN/m^2
	Soletta collaborante (4 cm)		0.70	kN/m^2
Permanenti	Lecamix Facile (4.00 cm)	G_2	0.40	kN/m^2
	Sottofondo CentroStorico (5.00 cm)		0.33	kN/m^2
	Altri permanenti		1.00	kN/m^2
Variabili		Q	2.00	kN/m^2

La combinazione di carico agli SLU considerata è:

$$q = i_{tr} \cdot \left[\gamma_{G1} \cdot \left(P_{solaio} + P_{soletta} + P_{massetto} + P_{sottofondo}\right) + \gamma_{G2} \cdot P_{altri} + \gamma_{Q} \cdot Q_{var}\right]$$

dove il peso proprio del solaio è valutato considerando una densità del calcestruzzo del travetto esistente di 25 kN/m^3 e delle pignatte di 6 kN/m^3, il peso della soletta viene valutato considerando la classe di massa volumica di appartenenza del calcestruzzo leggero strutturale e il corrispondente valore di massa per unità di volume in accordo alla Tab. C4.1.VI (calcestruzzo non armato).

Il carico per travetto risulta pertanto:

$$q = 0.5 \cdot [1.3 \cdot (3.11 + 0.7 + 0.4 + 0.325) + 1.5 \cdot 1 + 1.5 \cdot 2] = 5.2 \ \frac{kN}{m}$$

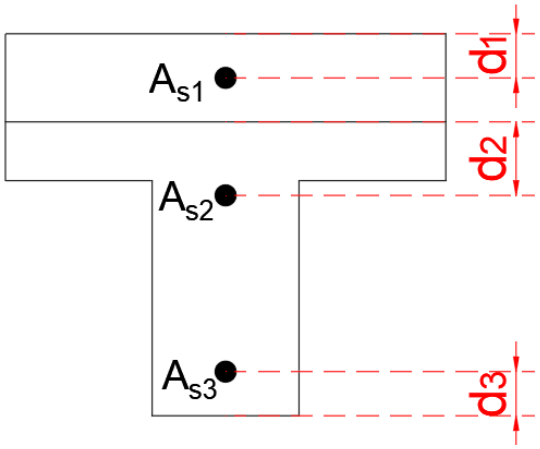
Si procede con il calcolo delle sollecitazioni della trave continua così formata:

$$V_{max} = \frac{qL}{2} = 13.00 \ kN$$

$$M_{max} = \frac{qL^2}{24} = 5.42 \ kNm$$

$$M_{min} = \frac{-qL^2}{12} = -10.83 \ kNm$$

Le armature in sezione sono definite come segue:



$A_{s1} = 2.26\ cm^2\ d_1 = 3\ cm\ (B450C)$
$A_{s2} = 0.50\ cm^2\ d_2 = 3\ cm\ (FeB44k)$
$A_{s3} = 1.13\ cm^2\ d_3 = 3\ cm\ (FeB44k)$

Per B450C:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = \frac{450}{1.15} = 391.30\ MPa$$

Per FeB44k:

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_m FC} = \frac{430}{1.15 \cdot 1.35} = 276.97\ MPa$$

Verifica a flessione

Si procede quindi al calcolo della resistenza a flessione positiva e negativa allo SLU del solaio consolidato mediante la nuova soletta in ***LecaCLS 1600***, interconnessa al solaio esistente mediante ***Connettore CentroStorico Chimico***.

Le distanze dall'estradosso delle armature presenti nella sezione risultano:

$$c_1 = 3\ cm$$

$$c_2 = 7\ cm$$

$$c_3 = 25\ cm$$

Nel seguito, al solo fine di semplificare l'esecuzione manuale dei calcoli di validazione, viene utilizzato un legame costitutivo di tipo stress block per il calcestruzzo leggero strutturale. Si ricorda però che nel software è stato utilizzato il legame costitutivo di tipo parabola rettangolo, coerentemente con le indicazioni da Normativa.

Al fine di determinare la posizione dell'asse neutro, si ipotizza che le armature presenti nel travetto esistente siano tese e snervate mentre che l'armatura presente nella nuova soletta collaborante sia tesa e in fase elastica (deformazione inferiore alla deformazione di snervamento, valutata come rapporto tra la tensione di progetto e il modulo elastico E_s dell'acciaio fissato in 210000 MPa), che l'asse neutro cada nella nuova soletta in **LecaCLS 1600** e che si raggiunga la rottura all'estremo lembo compresso (deformazione ultima $\varepsilon_{lcu} = 3\ ‰$). Tali ipotesi devono poi essere verificate a posteriori.

L'equazione di equilibrio alla traslazione dunque risulta:

$$-0.8 \cdot f_{cd} \cdot i_{tr} \cdot x + A_{s1} \cdot E_s \cdot \frac{\varepsilon_{lcu}}{x} \cdot (c_1 - x) + A_{s2} \cdot f_{sd} + A_{s3} \cdot f_{sd} = 0$$

La deformazione dell'armatura presente in soletta è espressa mediante la similitudine dei triangoli.

Risolvendo l'equazione di secondo grado che ne deriva e scartando la soluzione non ammissibile, si ottiene un asse neutro pari a:

$$x = 1.86\ cm$$

Si verificano ora che le deformazioni nei tre livelli armatura siano coerenti con le ipotesi definite:

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\varepsilon_{lcu}}{x}(c_1 - x) = 1.84\ ‰ < 1.86\ ‰$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\varepsilon_{lcu}}{x}(c_2 - x) = 8.30\ ‰ > 1.32\ ‰$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{\varepsilon_{lcu}}{x}(c_3 - x) = 37.4\ ‰ > 1.32\ ‰$$

Le ipotesi risultano verificate e si procede pertanto alla valutazione del momento resistente, scrivendo l'equazione di equilibrio alla rotazione:

$$M_{rdp} = \varepsilon_{s1}E_sA_{s1}(c_1 - 0.4x) + f_{sd}A_{s2}(c_2 - 0.4x) + f_{sd}A_{s3}(c_3 - 0.4x) = 10.43\ kNm$$

Le piccole differenze in termini di asse neutro e momento resistente sono dovute ai diversi modelli costitutivi implementati nel software e impiegati nei calcoli manuali.

La verifica a flessione positiva quindi risulta soddisfatta:

$$M_{max} = \frac{qL^2}{24} = 5.42\ kNm < \ M_{rdp} = 10.43\ kNm$$

Si procede con la valutazione della resistenza a flessione negativa.

Le distanze dall'intradosso delle armature presenti nella sezione risultano:

$$e_1 = 25\ cm$$

$$e_2 = 21\ cm$$

$$e_3 = 3\ cm$$

Nel seguito, al solo fine di semplificare l'esecuzione manuale dei calcoli di validazione, viene utilizzato un legame costitutivo di tipo stress block per il calcestruzzo esistente ma si ricorda che nel software è stato utilizzato il legame costitutivo di tipo parabola rettangolo. Le piccole differenze in termini di asse neutro e di momento resistente sono dovute ai diversi modelli costitutivi implementati nel software e impiegati nei calcoli manuali.

Al fine di determinare la posizione dell'asse neutro, si ipotizza che tutte le armature presenti siano snervate, che l'armatura A_{s3} sia in compressione mentre A_{s1} e A_{s2} in trazione, che l'asse neutro cada all'interno del travetto esistente e compreso tra i due livelli di armatura presenti nel travetto e che si raggiunga la rottura all'estremo lembo compresso (deformazione ultima $\varepsilon_{cu} = 3.50\ ‰$). Analogamente a quanto fatto in precedenza, tali ipotesi devono poi essere verificate a posteriori.

L'equazione di equilibrio alla traslazione dunque risulta:

$$-f_{yd} \cdot A_{s1} - f_{sd} \cdot A_{s2} + f_{sd} \cdot A_{s3} + f_{cd} \cdot b \cdot 0.8 \cdot x1 = 0$$

Risolvendo l'equazione, si ottiene un asse neutro pari a:

$$x1 = 7.83\ cm$$

Si verificano ora che le deformazioni nei tre livelli armatura siano coerenti con le ipotesi definite:

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x1}(e_1 - x1) = 7.68\ ‰ > 1.86\ ‰$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x1}(e_2 - x1) = 5.89\ ‰ > 1.32\ ‰$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x1}(e_3 - x1) = -2.16\ ‰ < -1.32\ ‰$$

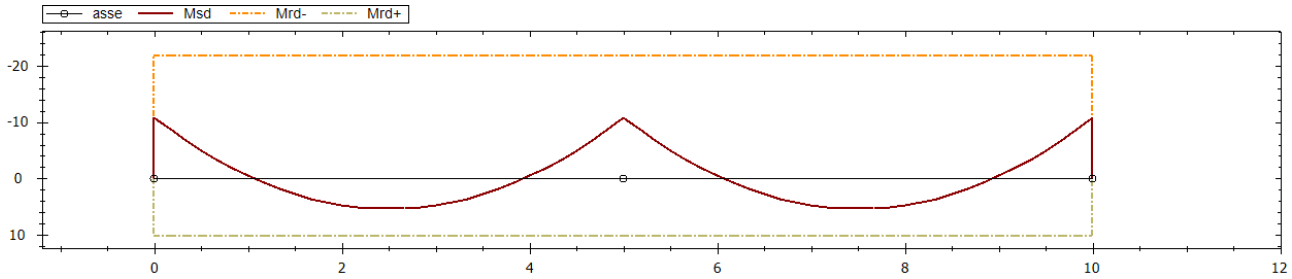
Le ipotesi risultano verificate e si procede pertanto alla valutazione del momento resistente, scrivendo l'equazione di equilibrio alla rotazione:

$$M_{rdn} = f_{yd}A_{s1}(e_1 - 0.4x1) + f_{sd}A_{s2}(e_2 - 0.4x1) - f_{sd}A_{s3}(e_3 - 0.4x1) = 21.85\ kNm$$

La verifica a flessione negativa quindi risulta soddisfatta:

$$M_{min} = \frac{-qL^2}{12} = -10.83\ kNm < M_{rdn} = -21.85\ kNm$$

Si riporta il grafico elaborato dal software:



Verifica a taglio

Si valuta la resistenza a taglio in corrispondenza degli appoggi dove il taglio sollecitante risulta massimo. In tale zona le armature tese sono A_{s1} e A_{s2}.

Poiché $f_{ck,LECA} > f_{ck}/FC$, si procede con la **verifica a taglio allo SLU**, per elementi sprovvisti di specifica armatura a taglio, in accordo al paragrafo *§4.1.2.3.5.1* delle *Norme tecniche per le costruzioni,* secondo la relazione seguente:

$$V_{Rd} = \max\left\{\left[\frac{0.18}{\gamma_m}\cdot k\cdot\left(100\cdot\rho_l\cdot\frac{f_{ck}}{FC}\right)^{\frac{1}{3}}+0.15\sigma_{cp}\right]b_w\cdot ds,\ \left(\nu_{\min}+0.15\sigma_{cp}\right)b_w\cdot ds\right\} = \max\left(V_{r1};V_{r2}\right)$$

con:

$$k = 1+\sqrt{\frac{200}{ds}} = 1.89 \le 2$$

$$\nu_{\min} = 0.035k^{1.5}\left(\frac{f_{ck}}{FC}\right)^{0.5} = 0.373$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w\cdot ds} = \frac{A_{s1}+A_{s2}}{b_w\cdot ds} = 0.0092 \le 0.02$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

e ds altezza utile della sezione pari a 25 cm, A_{sl} area dell'armatura longitudinale tesa (somma di A_{s1} e A_{s2}), b_w base minima della sezione reagente pari a 12 cm e γ_m pari a 1.5.

Risulta quindi:

$$V_{r1} = \left[\frac{0.18}{\gamma_m}\cdot k\cdot\left(100\cdot\rho_l\cdot\frac{f_{ck}}{FC}\right)^{\frac{1}{3}}+0.15\sigma_{cp}\right]b_w\cdot ds = 16.94\ kN$$

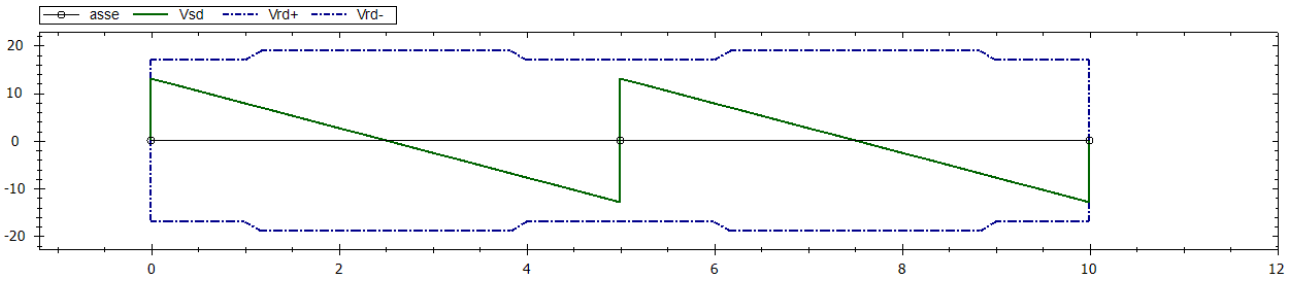
$$V_{r2} = \left(\nu_{\min}+0.15\sigma_{cp}\right)b_w\cdot ds = 11.18\ kN$$

$$V_{Rd} = \max(V_{r1};V_{r2}) = 16.94\ kN$$

La verifica a taglio risulta quindi soddisfatta:

$$V_{max} = \frac{qL}{2} = 13.00\ kN < V_{Rd} = 16.94\ kN$$

Si riporta il grafico elaborato dal software:



Verifica allo scorrimento sulla superficie di contatto con la nuova cappa

Per il calcolo della perfetta adesione tra la nuova soletta in calcestruzzo ***LecaCLS 1600*** e il solaio esistente, si confronta la tensione tagliante presente all'interfaccia soletta-solaio esistente (valutata con la formula di Jourawsky) con il valore di progetto del ***Connettore CentroStorico Chimico*** pari a 0.72 MPa, necessaria per la corretta collaborazione tra le due parti.

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento positivo:

$$n^{+} = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,LECA}}{2}} = \frac{210000\ MPa}{\left(\frac{20000\ MPa}{2}\right)} = 21.0$$

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento negativo:

$$n^{-} = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,esistente}}{2}} = \frac{210000\ MPa}{\left(\frac{29962\ MPa}{2}\right)} = 14.02$$

Nel caso specifico, il taglio massimo sollecitante pari a 13 kN si verifica in una zona soggetta a momento negativo, pertanto, le successive valutazioni sono eseguite utilizzando n^{-}.

Si valuta dapprima la posizione dell'asse neutro da calcolo elastico della sezione, imponendo che il momento statico dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro sia nullo (ipotesi di asse neutro nel travetto esistente):

$$bx_n\frac{x_n}{2} + n^{-}[A_{s1}(x_n - e_1) + A_{s2}(x_n - e_2) + A_{s3}(x_n - e_3)] = 0$$

da cui si ricava $x_n = 9.06\ cm$. L'ipotesi risulta verificata.

Si valuta quindi il momento statico della porzione al di sopra della corda *b* considerata posta all'interfaccia tra solaio esistente e nuova soletta, che in tal caso coinvolge la sola armatura presente in soletta:

$$S_{int} = A_{s1}n^{-}(e_1 - x_n) = 504.95\ cm^3$$

Il momento d'inerzia dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro viene valutato come segue:

$$J_n = \frac{A_{c_1}\cdot {x_n}^2}{12} + A_{c_1}\cdot\left(\frac{x_n}{2}\right)^2 + n^{-}\cdot(A_{s1}\cdot(e_1 - x_n)^2 + A_{s2}\cdot(e_2 - x_n)^2 + A_{s3}\cdot(e_3 - x_n)^2)$$

$$J_n = 12605.03\ cm^4$$

con $A_{c_1} = x_n b$ ovvero l'area della parte compressa di calcestruzzo.

Si calcola infine la tensione tangenziale all'interfaccia utilizzando la formula di Jourawsky:

$$\tau_{interfaccia} = \frac{V_{Sd,max}\cdot S_{int}}{J_n\cdot b} = 0.10\ MPa < 0.72\ MPa$$

con $V_{Sd,max} = V_{max} = 13\ kN$ e $b = 50\ cm$.

La verifica è soddisfatta poiché la tensione è inferiore a quella di progetto di *Connettore CentroStorico Chimico.*

Si riportano di seguito i risultati ottenuti nel software:

Verifica pre-intervento

La combinazione di carico agli SLU, per il pre-intervento, considerata è:

$$q = i_{tr} \cdot [\gamma_{G1} \cdot (P_{solaio} + P_{massetto} + P_{sottofondo}) + \gamma_{G2} \cdot P_{altri} + \gamma_Q \cdot Q_{var}]$$

dove il peso proprio del solaio è valutato considerando una densità del calcestruzzo del travetto esistente di 25 kN/m^3 e delle pignatte di 6 kN/m^3.

Il carico per travetto risulta pertanto:

$$q = 0.5 \cdot [1.3 \cdot (3.11 + 0.4 + 0.325) + 1.5 \cdot 1 + 1.5 \cdot 2] = 4.74\ \frac{kN}{m}$$

Si procede con il calcolo delle sollecitazioni della trave continua così formata:

$$V_{max} = \frac{qL}{2} = 11.86\ kN$$

$$M_{max} = \frac{qL^2}{24} = 4.94\ kNm$$

$$M_{min} = \frac{-qL^2}{12} = -9.88\ kNm$$

In maniera analoga a quanto indicato in precedenza, si ricava la posizione dell'asse neutro a momento positivo scrivendo l'equazione di equilibrio alla traslazione (ipotizzando che le armature siano entrambe snervate e che l'asse neutro cada nella caldana esistente):

$$x = \frac{f_{sd}(A_{s2} + A_{s3})}{0.8 f_{cd} i_{tr}} = 1.20\ cm$$

Il momento resistente positivo risulta:

$$M_{rdp} = f_{sd} \cdot A_{s2} \cdot (c_2 - 0.4 \cdot x) + f_{sd} \cdot A_{s3} \cdot (c_3 - 0.4 \cdot x) = 6.77\ kNm$$

dove ai valori di c_2 e c_3 vengono assegnate le altezze utili delle armature misurate dall'estradosso del solaio esistente.

Si ricava la posizione dell'asse neutro a momento negativo scrivendo l'equazione di equilibrio alla traslazione (ipotizzando che l'armatura A_{s2} sia snervata mentre che l'armatura A_{s3} sia elastica):

$$-f_{sd} \cdot A_{s2} + \frac{E_s \cdot \varepsilon_{cu} \cdot (x1 - e_3)}{x1} \cdot A_{s3} + f_{cd} \cdot b \cdot 0.8 \cdot x1 = 0$$

$$x1 = 2.67\ cm$$

Il momento resistente negativo risulta:

$$M_{rdn} = f_{sd} \cdot A_{s2} \cdot (e_2 - 0.4 \cdot x1) - \varepsilon_{s3} \cdot E_s \cdot A_{s3} \cdot (e_3 - 0.4 \cdot x1) = 2.96\ kNm$$

dove ai valori di e_2 ed e_3 vengono assegnate le altezze utili delle armature misurate dall'intradosso del solaio esistente.

Per la verifica al taglio (in corrispondenza degli appoggi) si procede applicando la formulazione per elementi non armati a taglio, analogamente a quanto eseguito in precedenza:

$$V_{Rd} = \max\left\{\left[\frac{0.18}{\gamma_m} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{FC}\right)^{\frac{1}{3}} + 0.15\sigma_{cp}\right] b_w \cdot ds,\ \left(\nu_{\min} + 0.15\sigma_{cp}\right) b_w \cdot ds\right\} = \max\left(V_{r1}; V_{r2}\right)$$

con:

$$ds = h + s_e - c_2 = 21\ cm$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot ds} = \frac{A_{s2} + A_{s3}}{b_w \cdot ds} = 0.00647 \leq 0.02$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{ds}} = 1.98 \leq 2$$

$$\nu_{\min} = 0.035k^{1.5}\left(\frac{f_{ck}}{FC}\right)^{0.5} = 0.397$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

e ds altezza utile della sezione pari a 21 cm, A_{sl} area dell'armatura longitudinale tesa (somma di A_{s2} e A_{s3}), b_w base minima della sezione reagente pari a 12 cm e γ_m pari a 1.5.

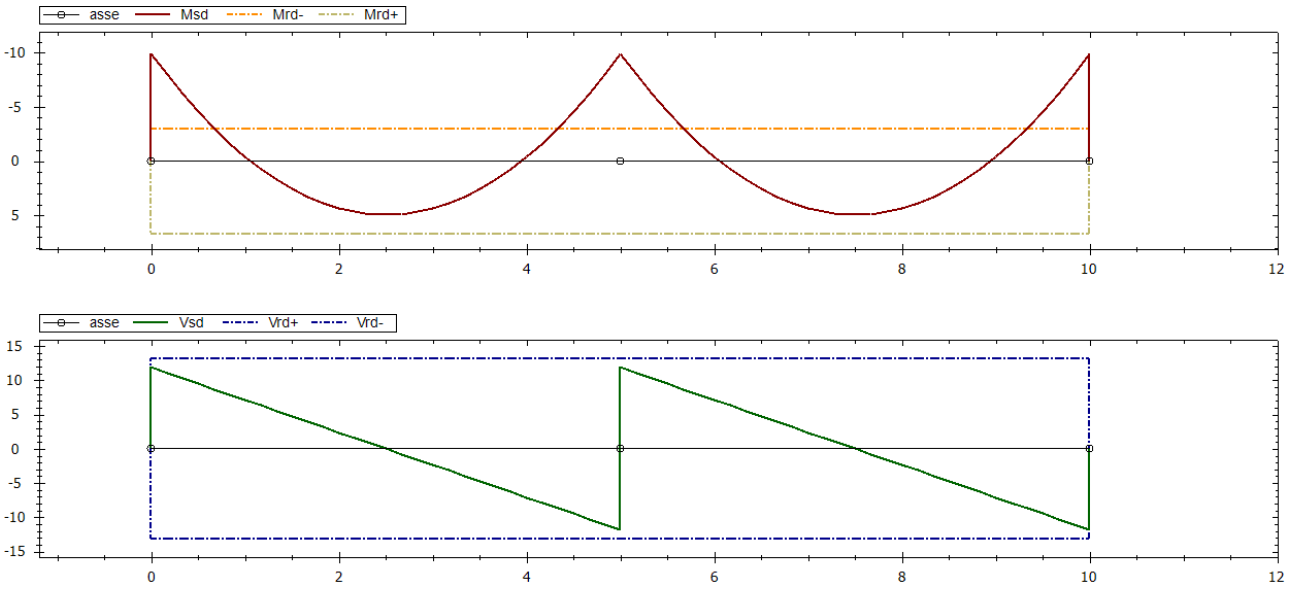
Risulta quindi:

$$V_{r1} = \left[\frac{0.18}{\gamma_m} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{FC}\right)^{\frac{1}{3}} + 0.15\sigma_{cp}\right] b_w \cdot ds = 13.20\ kN\ kN$$

$$V_{r2} = (\nu_{\min} + 0.15\sigma_{cp}) b_w \cdot ds = 10.00\ kN$$

$$V_{Rd} = \max(V_{r1}; V_{r2}) = 13.20\ kN$$

Si riportano i grafici elaborati dal software:



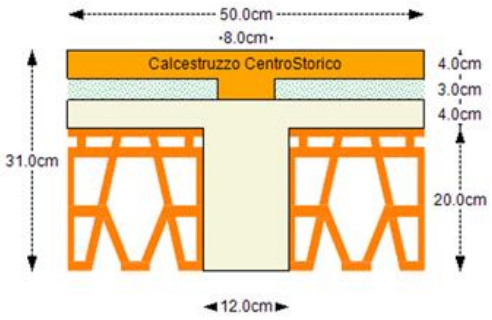
3.2. Caso 2 – Solaio con nuova soletta e pannello di alleggerimento e Connettore CentroStorico Chimico

Si analizza un solaio esistente, con le caratteristiche di seguito descritte, consolidato mediante realizzazione di una nuova soletta in calcestruzzo leggero strutturale ***Calcestruzzo CentroStorico***, interconnessa al solaio esistente mediante ***Connettore CentroStorico Chimico***. È inoltre prevista la posa di pannelli di alleggerimento, come dettagliato nel seguito.

Si adottano i seguenti materiali esistenti:

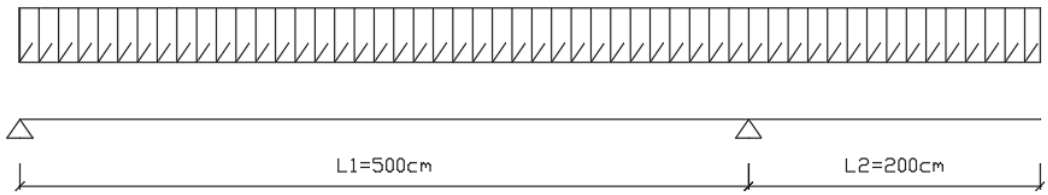
- per il calcestruzzo esistente, si seleziona "**Da utente**" e si inserisce il valore di progetto della resistenza a compressione di 20 MPa;
- per l'acciaio esistente, si seleziona "**Da utente**" e si inserisce il valore di progetto della tensione di snervamento di 450 MPa.

Viene adottata la seguente geometria:



GEOMETRIA		
Spessore nuova soletta	4.0	cm
Spessore caldana esistente	4.0	cm
Base travetto	12.0	cm
Altezza travetto	20.0	cm
Interasse travetti	50.0	cm
Base raccordo	8.0	cm
Altezza raccordo alleggerimento	3.0	cm
Lunghezza campata 1	500.0	cm
Lunghezza campata 2	200.0	cm

Lo schema statico del solaio è costituito da 2 campate, la prima da 500 cm e la seconda da 200 cm con un appoggio all'estremità sinistra mentre l'altra estremità è libera:



È inoltre presente una zona in calcestruzzo pieno in corrispondenza dell'appoggio centrale di estensione pari a 60 cm per la campata di sinistra e di 40 cm per la campata di destra.

Il carico allo Stato Limite Ultimo è determinato come segue:

Coefficienti di sicurezza	Carichi permanenti strutturali	γ_{G1}	1.3	-
	Altri carichi permanenti non strutturali	γ_{G2}	1.5	-
	Carichi variabili	γ_{Q}	1.5	-
Peso proprio	Solaio esistente	G_1	3.11	kN/m^2
	Soletta collaborante (4 cm)		0.74	kN/m^2
Permanenti	-	G_2	0.00	kN/m^2
	-		0.00	kN/m^2
	Altri permanenti		1.50	kN/m^2
Variabili		Q	2.00	kN/m^2

La combinazione di carico agli SLU considerata è:

$$q = i_{tr} \cdot [\gamma_{G1} \cdot (P_{solaio} + P_{soletta}) + \gamma_{G2} \cdot P_{altri} + \gamma_{Q} \cdot Q_{var}]$$

dove il peso proprio del solaio è valutato considerando una densità del calcestruzzo del travetto esistente di 25 kN/m^3 e delle pignatte di 6 kN/m^3, il peso della soletta viene valutato considerando la classe di massa volumica di appartenenza del calcestruzzo leggero strutturale e il corrispondente valore di massa per unità di volume in accordo alla Tab. C4.1.VI (calcestruzzo non armato).

Il carico per travetto risulta pertanto:

$$q = 0.5 \cdot [1.3 \cdot (3.11 + 0.74) + 1.5 \cdot 1.5 + 1.5 \cdot 2] = 5.13 \ \frac{kN}{m}$$

Si procede con il calcolo delle sollecitazioni della trave continua così formata:

$$V_A = \frac{q \cdot (L1^2 - L2^2)}{2 \cdot L1} = 10.77 \ kN$$

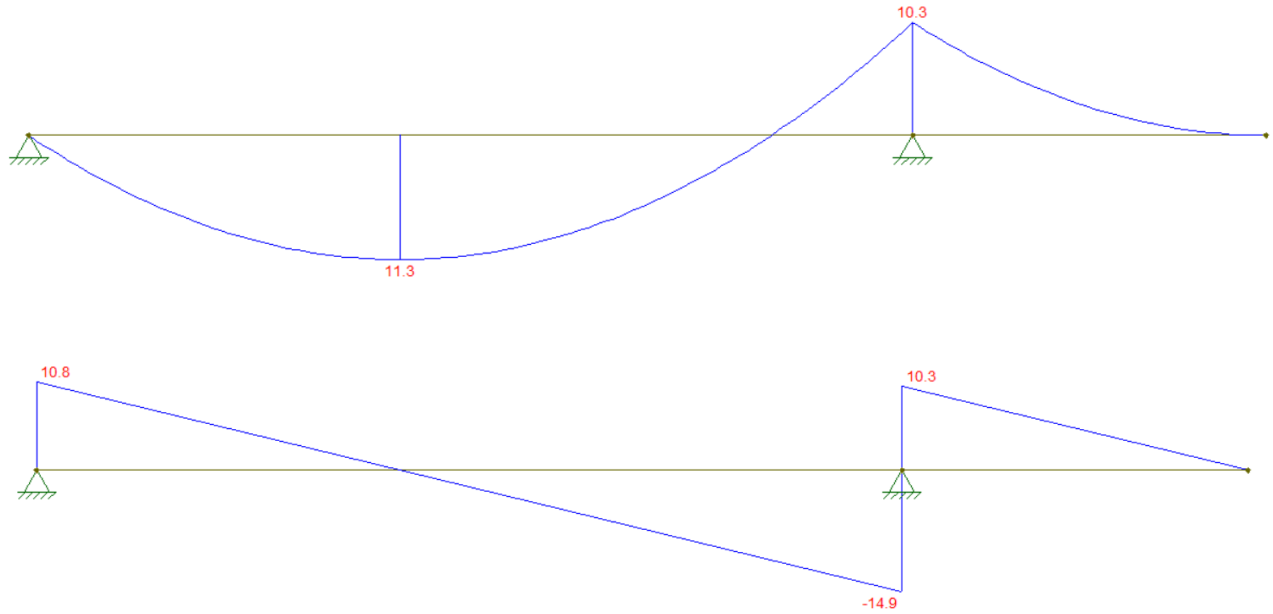
$$V_{B1} = -\left(\frac{q}{2 \cdot L1} \cdot (L1 + L2)^2 - q \cdot L2\right) = -14.87 \ kN$$

$$V_{B2} = q \cdot L2 = 10.26 \ kN$$

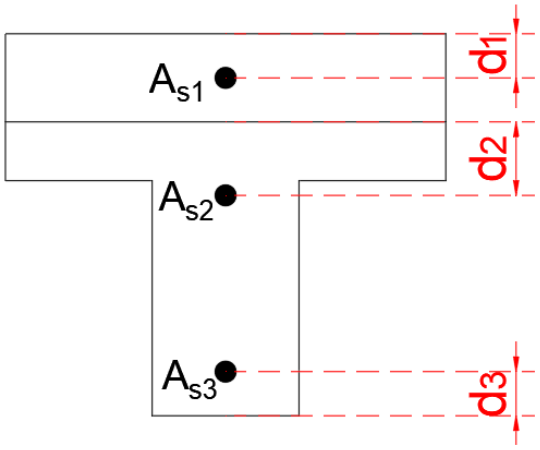
$$x_0 = \frac{L1^2 - L2^2}{2 \cdot L1} = 2.1 \ m$$

$$M_{max} = \frac{q}{2 \cdot L1} \cdot (L1^2 - L2^2) \cdot x_0 - \frac{q \cdot {x_0}^2}{2} = 11.3 \ kNm$$

$$M_{min} = \frac{-q \cdot L2^2}{2} = -10.26 \ kNm$$



Le armature in sezione sono definite come segue:



$A_{s1} = 1.57\ cm^2\ d_1 = 2\ cm\ (B450C)$
$A_{s2} = 1.01\ cm^2\ d_2 = 2\ cm\ (Acciaio\ utente)$
$A_{s3} = 0.79\ cm^2\ d_3 = 2\ cm\ (Acciaio\ utente)$

Per B450C:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = \frac{450}{1.15} = 391.30\ MPa$$

Verifica a flessione

Si procede quindi al calcolo della resistenza a flessione positiva e negativa allo SLU del solaio consolidato mediante la nuova soletta in ***Calcestruzzo CentroStorico***, interconnessa al solaio esistente mediante ***Connettore CentroStorico Chimico***, e con interposizione del pannello di alleggerimento.

Le distanze dall'estradosso delle armature presenti nella sezione risultano:

$$c_1 = 2\ cm$$

$$c_2 = 9\ cm$$

$$c_3 = 29\ cm$$

Nel seguito, al solo fine di semplificare l'esecuzione manuale dei calcoli di validazione, viene utilizzato un legame costitutivo di tipo stress block per il calcestruzzo leggero strutturale. Si ricorda però che nel software è stato utilizzato il legame costitutivo di tipo parabola rettangolo, coerentemente con le indicazioni da Normativa.

La posizione dell'asse neutro è ricavata imponendo l'equilibrio alla traslazione, effettuando un'ipotesi sullo stato deformativo della sezione da verificarsi poi in seguito:

$$\frac{\varepsilon_{lcu} \cdot (c_1 - x)}{x} \cdot E_s \cdot A_{s1} + f_{sd} \cdot (A_{s2} + A_{s3}) - f_{Ld} \cdot i_{tr} \cdot 0.8 \cdot x = 0$$

dove ε_{lcu} è la deformazione ultima del calcestruzzo leggero strutturale valutata in accordo alle NTC18 e relativa Circolare.

Risolvendo l'equazione di secondo grado che ne deriva e scartando la soluzione non ammissibile, si ottiene un asse neutro (a flessione positiva) pari a:

$$x = 1.71\ cm$$

Si verificano le ipotesi di partenza e si procede pertanto alla valutazione del momento resistente, scrivendo l'equazione di equilibrio alla rotazione:

$$M_{rdp} = \varepsilon_{s1} \cdot E_s \cdot A_{s1} \cdot (c_1 - 0.4 \cdot x) + f_{sd} \cdot A_{s2} \cdot (c_2 - 0.4 \cdot x) + f_{sd} \cdot A_{s3} \cdot (c_3 - 0.4 \cdot x) = 14.06\ kNm$$

Le piccole differenze in termini di asse neutro e momento resistente sono dovute ai diversi modelli costitutivi implementati nel software e impiegati nei calcoli manuali.

La verifica a flessione positiva quindi risulta soddisfatta.

Si procede con la valutazione della resistenza a flessione negativa in corrispondenza della zona piena.

Le distanze dall'intradosso delle armature presenti nella sezione risultano:

$$e_1 = 29\ cm$$

$$e_2 = 22\ cm$$

$$e_3 = 2\ cm$$

Nel seguito, al solo fine di semplificare l'esecuzione manuale dei calcoli di validazione, viene utilizzato un legame costitutivo di tipo stress block per il calcestruzzo esistente ma si ricorda che nel software è stato utilizzato il legame costitutivo di tipo parabola rettangolo. Le piccole differenze in termini di asse neutro e di momento resistente sono dovute ai diversi modelli costitutivi implementati nel software e impiegati nei calcoli manuali.

La posizione dell'asse neutro è ricavata imponendo l'equilibrio alla traslazione, effettuando un'ipotesi sullo stato deformativo della sezione da verificarsi in seguito:

$$-f_{yd} \cdot A_{s1} - f_{sd} \cdot A_{s2} - \frac{\varepsilon_{cu} \cdot (e_3 - x1)}{x1} \cdot E_s \cdot A_{s3} + f_{cd} \cdot i_{tr} \cdot 0.8 \cdot x1 = 0$$

La profondità dell'asse neutro a momento negativo è pari a:

$$x1 = 1.55\ cm$$

Si verificano le ipotesi di partenza e si procede pertanto alla valutazione del momento resistente, scrivendo l'equazione di equilibrio alla rotazione:

$$M_{rdn} = f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot (e_1 - 0.4 \cdot x1) + f_{sd} \cdot A_{s2} \cdot (e_2 - 0.4 \cdot x1) + \sigma_{s3} \cdot A_{s3} \cdot (e_3 - 0.4 \cdot x1) = 27.39\ kNm$$

con:

$$\sigma_{s3} = \frac{\varepsilon_{cu} \cdot (e_3 - x1)}{x1} \cdot E_s$$

La verifica a flessione negativa quindi risulta soddisfatta.

Verifica a taglio

Si valuta la resistenza a taglio in corrispondenza della coordinata x=5 m nella prima campata, dove il taglio sollecitante risulta massimo. In tale zona tutte le armature sono tese.

Poiché $f_{ck,LECA} > f_{cd}$, si procede con la **verifica a taglio allo SLU**, per elementi sprovvisti di specifica armatura a taglio, in accordo al paragrafo *§4.1.2.3.5.1* delle *Norme tecniche per le costruzioni,* secondo la relazione seguente:

$$V_{Rd} = \max\left\{\left[\frac{0.18}{\gamma_m} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cd})^{\frac{1}{3}} + 0.15\sigma_{cp}\right] b_w \cdot ds,\ \left(\nu_{\min} + 0.15\sigma_{cp}\right) b_w \cdot ds\right\} = \max\left(V_{r1}; V_{r2}\right)$$

con:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{ds}} = 1.83 \leq 2$$

$$\nu_{\min} = 0.035 k^{1.5} (f_{cd})^{0.5} = 0.388$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot ds} = \frac{A_{s1} + A_{s2} + A_{s3}}{b_w \cdot ds} = 0.0145 \leq 0.02$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

e ds altezza utile della sezione pari a 29 cm, A_{sl} area dell'armatura longitudinale tesa, b_w base minima della sezione reagente pari a 8 cm e γ_m pari a 1.5.

Risulta quindi:

$$V_{r1} = \left[\frac{0.18}{\gamma_m} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{FC}\right)^{\frac{1}{3}} + 0.15\sigma_{cp}\right] b_w \cdot ds = 15.67\ kN$$

$$V_{r2} = \left(v_{\min} + 0.15\sigma_{cp}\right) b_w \cdot ds = 8.99\ kN$$

$$V_{Rd} = \max(V_{r1}; V_{r2}) = 15.67\ kN$$

La verifica a taglio risulta quindi soddisfatta.

Verifica allo scorrimento sulla superficie di contatto con la nuova cappa

Per il calcolo della perfetta adesione tra la nuova soletta in calcestruzzo ***Calcestruzzo CentroStorico*** e il solaio esistente, si confronta la tensione tagliante presente all'interfaccia soletta-solaio esistente (valutata con la formula di Jourawski) con il valore di progetto del ***Connettore CentroStorico Chimico*** pari a 0.72 MPa, necessaria per la corretta collaborazione tra le due parti.

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento positivo:

$$n^+ = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,LECA}}{2}} = \frac{210000\ MPa}{\left(\frac{17000\ MPa}{2}\right)} = 24.71$$

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento negativo:

$$n^- = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,esistente}}{2}} = \frac{210000\ MPa}{\left(\frac{27085\ MPa}{2}\right)} = 15.51$$

A titolo di esempio per le zone soggette a momento positivo, si valuta la posizione dell'asse neutro da calcolo elastico della sezione, imponendo che il momento statico dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro sia nullo (ipotesi di asse neutro nel nuovo getto di calcestruzzo strutturale ed in particolare all'interno dell'anima della T di calcestruzzo):

$$h_s i_{tr}\left(x_p - \frac{h_s}{2}\right) + \frac{b_r(x_p - h_s)(x - h_s)}{2} + n^+\left[A_{s1}(x_p - c_1) + A_{s2}(x_p - c_2) + A_{s3}(x_p - c_3)\right] = 0$$

da cui si ricava $x_p = 4.47\ cm$. L'ipotesi risulta verificata. Nell'equazione precedente h_s è lo spessore della nuova soletta (4 cm), b_r è la larghezza del raccordo in calcestruzzo (8 cm).

Si valuta quindi il momento statico della porzione al di sopra della corda *b* considerata posta all'interfaccia tra solaio esistente e nuova soletta, che in tal caso coinvolge l'armatura presente in soletta e la parte di calcestruzzo compressa:

$$S_{int} = h_s i_{tr}\left(x_p - \frac{h_s}{2}\right) + \frac{b_r(x_p - h_s)(x - h_s)}{2} + n^+ A_{s1}(x_p - c_1) = 591.63\ cm^3$$

Il momento d'inerzia dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro viene valutato come segue:

$$J_n = \frac{i_{tr} \cdot {h_s}^3}{12} + h_s i_{tr} \cdot \left(x_p - \frac{h_s}{2}\right)^2 + b_r \frac{\left(x_p - h_s\right)^3}{12} + b_r \left(x_p - h_s\right) \left(\frac{x_p - h_s}{2}\right)^2 + \\ + n^+ \cdot \left(A_{s1} \cdot \left(x_p - c_1\right)^2 + A_{s2} \cdot \left(x_p - c_2\right)^2 + A_{s3} \cdot \left(x_p - c_3\right)^2\right)$$

$$J_n = 13979.99\ cm^4$$

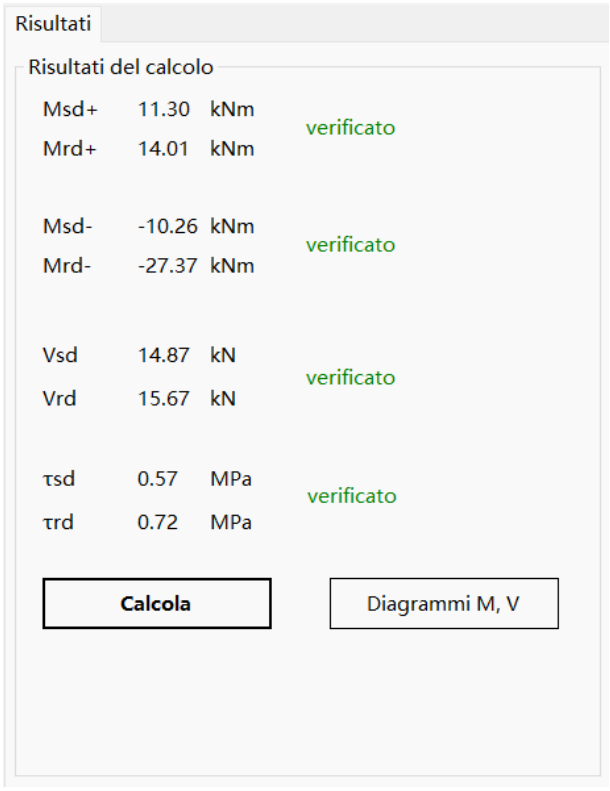
Si calcola infine la tensione tangenziale all'interfaccia utilizzando la formula di Jourawsky nell'appoggio di sinistra dove si ha il taglio massimo per le zone soggette a momento positivo:

$$\tau_{interfaccia} = \frac{V_A \cdot S_{int}}{J_n \cdot b} = 0.57\ MPa < 0.72\ MPa$$

con $b = b_r = 8\ cm$.

La verifica è soddisfatta poiché la tensione è inferiore a quella di progetto di *Connettore CentroStorico Chimico.*

Si riportano di seguito i risultati ottenuti nel software:



Si riportano i diagrammi dei momenti flettenti e del taglio, comprensivi dei valori resistenti.

Diagramma del momento:

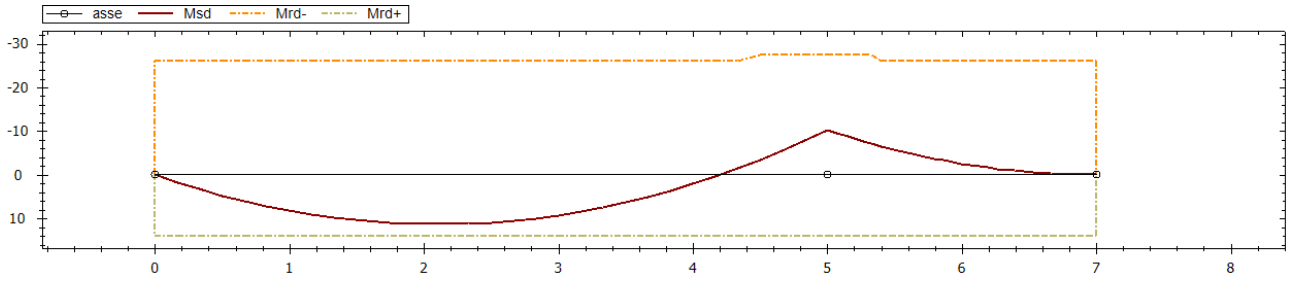
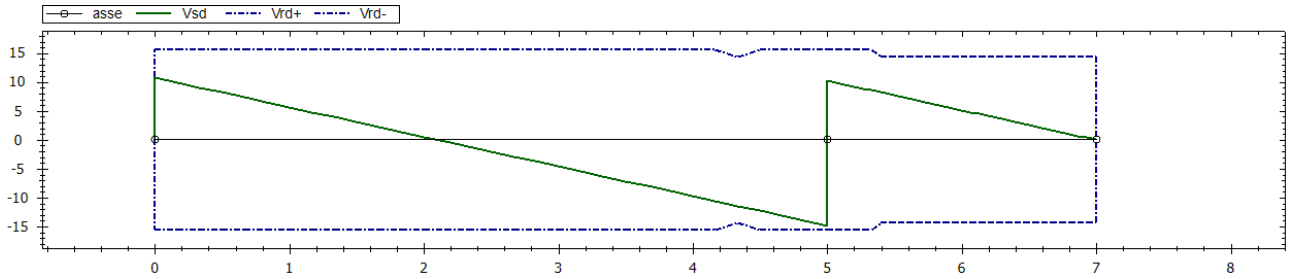


Diagramma del taglio:

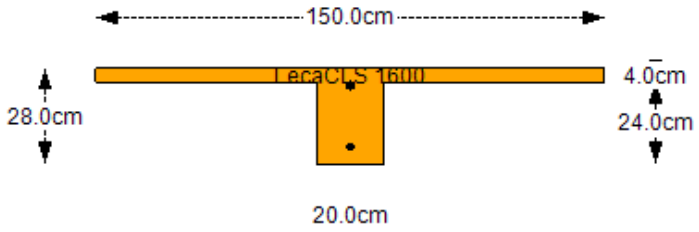


3.3. Caso 3 – Irrigidimento in spessore di solaio

Nell'ipotesi in cui il consolidamento del solaio esistente mediante la sola realizzazione di una nuova soletta in calcestruzzo strutturale leggero, resa collaborante con Connettore CentroStorico Chimico, non consenta di soddisfare tutte le verifiche a Stato Limite Ultimo, il software consente il dimensionamento di irrigidimenti del solaio esistente.

Nel caso specifico, si analizza un irrigidimento in spessore. Si rimanda al paragrafo successivo per il dimensionamento dell'irrigidimento fuori spessore.

Si mantengono il medesimo schema statico, geometria del solaio esistente e carichi del Caso 1. Si ipotizza una variazione dell'armatura presente, fissata in 0.5 cm^2 per i livelli di armatura.
Con la variazione dell'armatura, il solaio non risulta più verificato con la sola realizzazione della soletta collaborante.



GEOMETRIA	Tipo	in spessore
Spessore nuova soletta	4.0	cm
Base nuovo travetto	20.0	cm
Altezza nuovo travetto	24.0	cm
Interasse nuovi travetti	150.0	cm
Lunghezza campata 1	500.0	cm
Lunghezza campata 2	500.0	cm

Campata	As [cm2]	c [cm2]	As' [cm2]	c' [cm2]	Staffe e passo
1	3.08	5.0	4.62	5.0	2ϕ6/25
2	3.08	5.0	4.62	5.0	2ϕ6/25

Per il calcolo del carico, in combinazione allo Stato Limite Ultimo, sul singolo nuovo travetto in calcestruzzo strutturale leggero si utilizza la massa per unità di volume del calcestruzzo armato per la classe di appartenenza del calcestruzzo, in accordo alla Tab. C4.1.VI della Circolare. Nello specifico, utilizzando ***LecaCLS 1600***, il valore utilizzato è 18.5 kN/m^3 (classe D1,7).

Il carico in combinazione SLU sul singolo travetto risulta 16.83 kN/m.

Si ricordano le caratteristiche meccaniche dell'acciaio nuovo e del calcestruzzo leggero ***strutturale LecaCLS 1600***:

- ***LecaCLS 1600***:

$$f_{lck} = 31.5\ MPa$$

$$f_{lcd} = \frac{0.85 f_{lck}}{1.5} = 18.85\ MPa$$

$$E = 20000\ MPa$$

- ***Acciaio B450C***:

$$f_{yk} = 450\ MPa$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1.15} = 391.3\ MPa$$

$$E_S = 210000\ MPa$$

Si riportano i diagrammi di sollecitazione.

Diagramma del momento

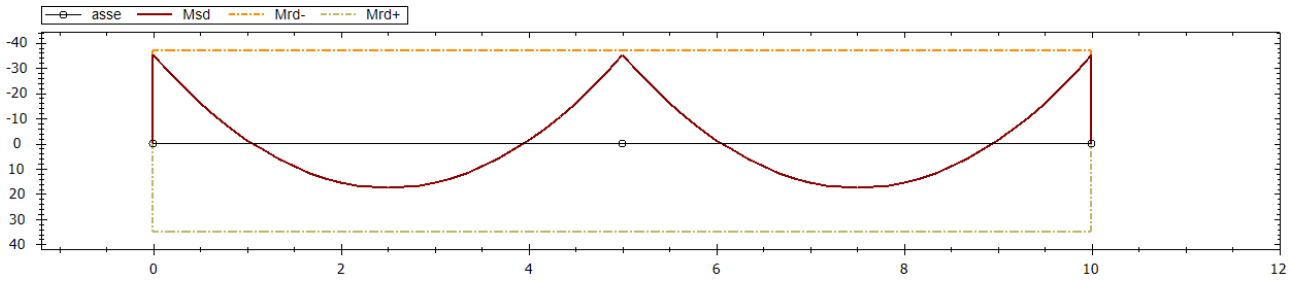
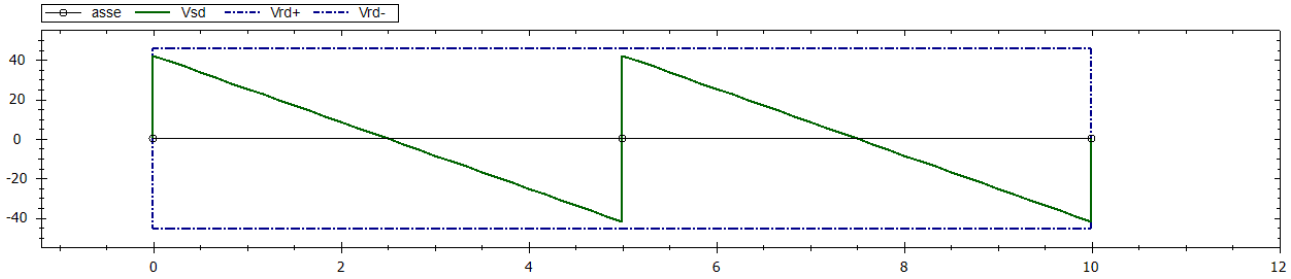


Diagramma del taglio



Verifica a flessione

Si valuta dapprima il momento resistente positivo. Le distanze dall'estradosso delle armature presenti nella sezione risultano:

$$c_1 = 5\ cm$$

$$c_2 = 23\ cm$$

Nel seguito, al solo fine di semplificare l'esecuzione manuale dei calcoli di validazione, viene utilizzato un legame costitutivo di tipo stress block per il calcestruzzo leggero strutturale. Si ricorda però che nel software è stato utilizzato il legame costitutivo di tipo parabola rettangolo, coerentemente con le indicazioni da Normativa.

La posizione dell'asse neutro, ottenuta scrivendo l'equazione di equilibrio alla traslazione ipotizzando che cada in soletta e che entrambi i livelli di armatura siano snervati e tesi, risulta:

$$x_p = \frac{f_{yd} \cdot A_{s1} + f_{yd} \cdot A_{s2}}{f_{Ld} \cdot i_{tr} \cdot 0.8} = \frac{391.3\ MPa \cdot 4.62\ cm^2 + 391.3\ MPa \cdot 3.08\ cm^2}{17.85\ MPa \cdot 100\ cm \cdot 0.8} = 1.41\ cm$$

Le ipotesi risultano verificate e si procede pertanto alla valutazione del momento resistente positivo, scrivendo l'equazione di equilibrio alla rotazione:

$$M_{rdp} = f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot (c_1 - 0.4 \cdot x_p) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (c_2 - 0.4 \cdot x_p) = 35.06\ kNm$$

Le piccole differenze in termini di asse neutro e momento resistente sono dovute ai diversi modelli costitutivi implementati nel software e impiegati nei calcoli manuali.

Si procede con la valutazione del momento resistente negativo. Le distanze dall'intradosso dell'irrigidimento delle armature presenti nella sezione risultano:

$$e_1 = 23\ cm$$

$$e_2 = 5\ cm$$

Nel seguito, al solo fine di semplificare l'esecuzione manuale dei calcoli di validazione, viene utilizzato un legame costitutivo di tipo stress block per il calcestruzzo leggero strutturale. Si ricorda però che nel software è stato utilizzato il legame costitutivo di tipo parabola rettangolo, coerentemente con le indicazioni da Normativa.

L'equazione di equilibrio alla traslazione, nell'ipotesi che le armature intradossali siano in compressione e in fase elastica e che le armature estradossali siano tese e snervate, risulta:

$$f_{yd} \cdot A_{s1} - E_s \cdot \frac{\varepsilon_{lcu} \cdot (x_n - e_2)}{x_n} \cdot A_{s2} - f_{lcd} \cdot b_{tr} \cdot 0.8 \cdot x_n = 0$$

Risolvendo l'equazione, si ottiene un asse neutro pari a:

$$x_n = 5.60\ cm$$

Le ipotesi risultano verificate e si procede pertanto alla valutazione del momento resistente negativo, scrivendo l'equazione di equilibrio alla rotazione:

$$M_{rdn} = f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot (e_1 - 0.4 \cdot x_n) + E_s \cdot \frac{\varepsilon_{lcu} \cdot (x_n - e_2)}{x_n} \cdot A_{s2} \cdot (e_2 - 0.4 \cdot x_n) = 38.10\ kNm$$

Le differenze in termini di asse neutro e momento resistente sono dovute ai diversi modelli costitutivi implementati nel software e impiegati nei calcoli manuali.

Verifica a taglio

Si valuta la resistenza a taglio per elementi con armature trasversali resistenti al taglio in accordo ai paragrafi *§4.1.2.3.5.2* e *§C4.1.12.1.3.2.2* delle *Norme tecniche per le costruzioni*:

$$V_{Rsd} = 0.9d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot\alpha + cot\theta) \cdot \sin\alpha$$

$$V_{Rcd} = 0.9d \cdot b_w \cdot 0.4 f_{lcd} \cdot \frac{(\cot\alpha + cot\theta)}{(1 + \cot^2\theta)}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

con A_{sw} area dell'armatura trasversale (staffe), *s* passo staffe, $\alpha = 90°$ e $21.8° \leq \theta \leq 45°$.

Nello specifico, A_{sw} risulta:

$$A_{sw} = \frac{n_b \cdot \pi \cdot \text{ø}_{st}{}^2}{4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (6\ mm)^2}{4} = 56.55\ mm^2$$

Si ricerca se esiste un angolo θ per la rottura a taglio bilanciata imponendo l'uguaglianza tra V_{Rcd} e V_{Rsd}. Da tale equazione si ricava un angolo di 12.87°, non ricadente all'interno del range previsto da Normativa. Pertanto, si assume un valore di 21.8° nei calcoli successivi.

Si valutano quindi la resistenza lato acciaio e lato calcestruzzo:

$$V_{Rsd} = 0.9d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot\alpha + cot\theta) \cdot \sin\alpha = 45.80\ kN$$

$$V_{Rcd} = 0.9d \cdot b_w \cdot 0.4 f_{lcd} \cdot \frac{(\cot\alpha + cot\theta)}{(1 + \cot^2\theta)} = 101.93\ kN$$

con b_w pari a 20 cm e d pari a 23 cm.

La resistenza a taglio dell'irrigidimento quindi risulta:

$$V_{Rd} = min(V_{Rsd}; V_{Rcd}) = 45.80\ kN$$

Verifica a scorrimento dell'interfaccia

Si valuta lo scorrimento all'interfaccia tra la soletta superiore del nuovo travetto, il solaio esistente e l'anima del nuovo travetto in corrispondenza della zona soggetta a momento positivo. Nella valutazione dello sforzo tangenziale, viene trascurato il solaio esistente.

Coefficiente di omogeneizzazione:

$$n^+ = \frac{E_s}{\frac{E}{2}} = 21$$

L'asse neutro elastico viene valutato imponendo che il momento statico dell'intera sezione parzializzata sia nullo:

$$S = i_{tr} \cdot x \cdot \left(x - \frac{x}{2}\right) + n^+ \cdot A_{s1} \cdot (x - c_1) + n^+ \cdot A_{s2} \cdot (x - c_2) = 0$$

Risolvendo l'equazione, si ottiene:

$$x = 4.16\ cm$$

Si procede quindi con la valutazione dei termini necessari al calcolo dello scorrimento all'interfaccia:

$$\tau_{interfaccia} = \frac{V_{Sd} \cdot S_{int}}{J_n \cdot b}$$

Il momento statico (sezione parzializzata) della porzione al di sopra della corda S_{int} vale:

$$S_{int} = \mathrm{x} \cdot i_{tr} \cdot \frac{\mathrm{x}}{2} = 1298.98\ cm^3$$

L'inerzia dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro J_n vale:

$$J_n = \frac{A_c \cdot x^2}{12} + A_c \cdot \left(\frac{\mathrm{x}}{2}\right)^2 + n^+ \cdot (A_{s1} \cdot (c_1 - \mathrm{x})^2 + A_{s2} \cdot (c_2 - \mathrm{x})^2) = 26625.65\ cm^4$$

La larghezza della corda da considerare viene posta, cautelativamente, pari a 112 cm, ovvero la differenza tra l'interasse dell'irrigidimento e la larghezza della pignatta che viene in parte riempita dal nuovo travetto.

Il taglio massimo sollecitante in combinazione SLU nelle zone soggette a momento positivo è pari a 22.44 kN.

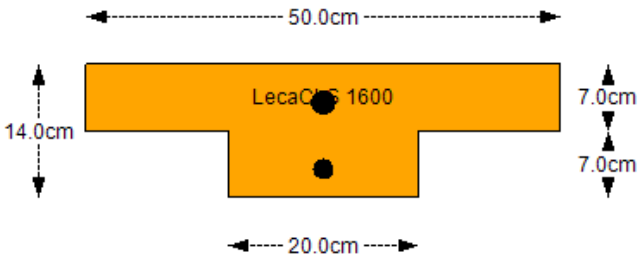
Si riportano di seguito i risultati del software:

3.4. Caso 4 – Irrigidimento fuori spessore di solaio

Nell'ipotesi in cui il consolidamento del solaio esistente mediante la sola realizzazione di una nuova soletta in calcestruzzo strutturale leggero, resa collaborante con Connettore CentroStorico Chimico, non consenta di soddisfare tutte le verifiche a Stato Limite Ultimo, il software consente il dimensionamento di irrigidimenti del solaio esistente.

Nel caso specifico, si analizza un irrigidimento fuori spessore di solaio.

Si mantengono il medesimo schema statico, geometria del solaio esistente e carichi del Caso 1. Si ipotizza una variazione dell'armatura presente, fissata in 0.5 cm^2 per le armature inferiori nel travetto esistente, e l'assenza di armature superiori esistenti.
Con la variazione dell'armatura, il solaio non risulta più verificato con la sola realizzazione della soletta collaborante.



GEOMETRIA	Tipo	fuori spessore
Spessore nuova soletta	7.0	cm
Base nuovo travetto	20.0	cm
Altezza nuovo travetto	7.0	cm
Interasse nuovi travetti	50.0	cm
Lunghezza campata 1	500.0	cm
Lunghezza campata 2	500.0	cm

Campata	As [cm2]	c [cm2]	As' [cm2]	c' [cm2]	Staffe e passo
1	3.08	3.0	4.62	4.0	2ϕ6/25
2	3.08	3.0	4.62	4.0	2ϕ6/25

Per il calcolo del carico, in combinazione allo Stato Limite Ultimo, sul singolo nuovo travetto in calcestruzzo strutturale leggero si utilizza la massa per unità di volume del calcestruzzo armato per la classe di appartenenza del calcestruzzo, in accordo alla Tab. C4.1.VI della Circolare. Nello specifico, utilizzando ***LecaCLS 1600***, il valore utilizzato è 18.5 kN/m^3 (classe D1,7).

Il carico in combinazione SLU sul singolo travetto risulta 5.92 kN/m.

Si ricordano le caratteristiche meccaniche dell'acciaio nuovo e del calcestruzzo leggero ***strutturale LecaCLS 1600***:

- ***LecaCLS 1600***:

$$f_{lck} = 31.5\ MPa$$

$$f_{lcd} = \frac{0.85 f_{lck}}{1.5} = 18.85\ MPa$$

$$E = 20000\ MPa$$

- ***Acciaio B450C***:

$$f_{yk} = 450\ MPa$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1.15} = 391.3\ MPa$$

$$E_S = 210000\ MPa$$

Si riportano i diagrammi di sollecitazione.

Diagramma del momento

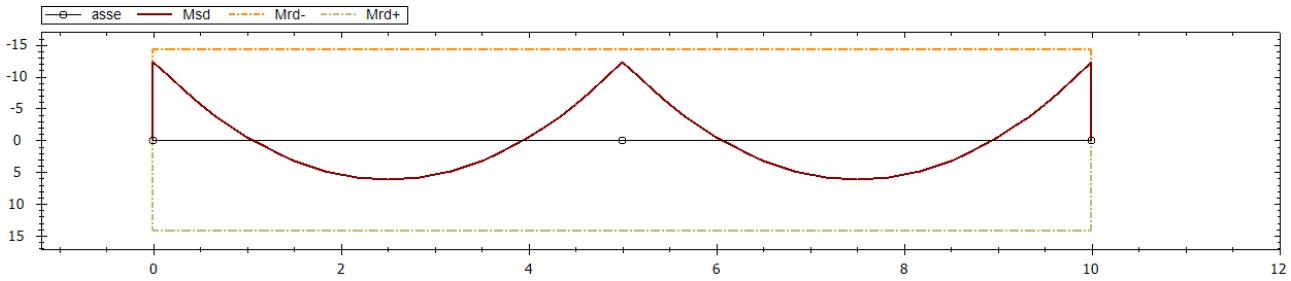
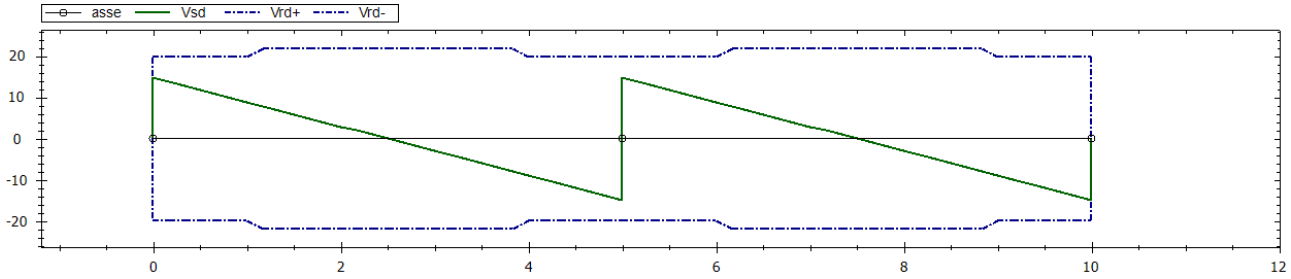


Diagramma del taglio



Verifica a flessione

Si valuta dapprima il momento resistente positivo. Le distanze dall'estradosso delle armature presenti nella sezione dell'irrigidimento risultano:

$$c_1 = 4\ cm$$

$$c_2 = 11\ cm$$

Nel seguito, al solo fine di semplificare l'esecuzione manuale dei calcoli di validazione, viene utilizzato un legame costitutivo di tipo stress block per il calcestruzzo leggero strutturale. Si ricorda però che nel software è stato utilizzato il legame costitutivo di tipo parabola rettangolo, coerentemente con le indicazioni da Normativa.

L'equazione di equilibrio alla traslazione, nell'ipotesi che le armature intradossali siano tese e snervate e che le armature estradossali siano tese ed elastiche, risulta:

$$f_{yd} \cdot A_{s2} + E_s \cdot \frac{\varepsilon_{lcu} \cdot (c_1 - x_p)}{x_p} \cdot A_{s1} - f_{lcd} \cdot i_{tr} \cdot 0.8 \cdot x_p = 0$$

Risolvendo l'equazione, si ottiene un asse neutro pari a:

$$x_p = 3.02\ cm$$

Le ipotesi risultano verificate e si procede pertanto alla valutazione del momento resistente positivo, scrivendo l'equazione di equilibrio alla rotazione:

$$M_{rdp} = E_s \cdot \frac{\varepsilon_{lcu} \cdot (c_1 - x_p)}{x_p} \cdot A_{s1} \cdot (c_1 - 0.4 \cdot x_p) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (c_2 - 0.4 \cdot x_p) = 14.45\ kNm$$

Le piccole differenze in termini di asse neutro e momento resistente sono dovute ai diversi modelli costitutivi implementati nel software e impiegati nei calcoli manuali.

Si procede con la valutazione del momento resistente negativo. Le distanze dall'intradosso dell'irrigidimento delle armature presenti nella sezione risultano:

$$e_1 = 10\ cm$$

$$e_2 = 3\ cm$$

Nel seguito, al solo fine di semplificare l'esecuzione manuale dei calcoli di validazione, viene utilizzato un legame costitutivo di tipo stress block per il calcestruzzo leggero strutturale. Si ricorda però che nel software è stato utilizzato il legame costitutivo di tipo parabola rettangolo, coerentemente con le indicazioni da Normativa.

L'equazione di equilibrio alla traslazione, nell'ipotesi che le armature intradossali siano in compressione e in fase elastica e che le armature estradossali siano tese e snervate, risulta:

$$f_{yd} \cdot A_{s1} - E_s \cdot \frac{\varepsilon_{lcu} \cdot (x_n - e_2)}{x_n} \cdot A_{s2} - f_{lcd} \cdot b_{tr} \cdot 0.8 \cdot x_n = 0$$

Risolvendo l'equazione, si ottiene un asse neutro pari a:

$$x_n = 4.29\ cm$$

Le ipotesi risultano verificate e si procede pertanto alla valutazione del momento resistente negativo, scrivendo l'equazione di equilibrio alla rotazione:

$$M_{rdn} = f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot (e_1 - 0.4 \cdot x_n) + E_s \cdot \frac{\varepsilon_{lcu} \cdot (x_n - e_2)}{x_n} \cdot A_{s2} \cdot (e_2 - 0.4 \cdot x_n) = 14.23\ kNm$$

Le piccole differenze in termini di asse neutro e momento resistente sono dovute ai diversi modelli costitutivi implementati nel software e impiegati nei calcoli manuali.

Verifica a taglio

Si valuta la resistenza a taglio per elementi con armature trasversali resistenti al taglio in accordo ai paragrafi *§4.1.2.3.5.2* e *§C4.1.12.1.3.2.2* delle *Norme tecniche per le costruzioni*:

$$V_{Rsd} = 0.9d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot\alpha + cot\theta) \cdot \sin\alpha$$

$$V_{Rcd} = 0.9d \cdot b_w \cdot 0.4 f_{lcd} \cdot \frac{(\cot\alpha + cot\theta)}{(1 + \cot^2\theta)}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

con A_{sw} area dell'armatura trasversale (staffe), *s* passo staffe, $\alpha = 90°$ e $21.8° \leq \theta \leq 45°$.

Nello specifico, A_{sw} risulta:

$$A_{sw} = \frac{n_b \cdot \pi \cdot \text{ø}_{st}{}^2}{4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (6\ mm)^2}{4} = 56.55\ mm^2$$

Si ricerca se esiste un angolo θ per la rottura a taglio bilanciata imponendo l'uguaglianza tra V_{Rcd} e V_{Rsd}. Da tale equazione si ricava un angolo di 14.42°, non ricadente all'interno del range previsto da Normativa. Pertanto, si assume un valore di 21.8° nei calcoli successivi.

Si valutano quindi la resistenza lato acciaio e lato calcestruzzo:

$$V_{Rsd} = 0.9d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot\alpha + cot\theta) \cdot \sin\alpha = 19.91\ kN$$

$$V_{Rcd} = 0.9d \cdot b_w \cdot 0.4 f_{lcd} \cdot \frac{(\cot\alpha + cot\theta)}{(1 + \cot^2\theta)} = 44.32\ kN$$

con b_w pari a 20 cm e d pari a 10 cm.

La resistenza a taglio dell'irrigidimento quindi risulta:

$$V_{Rd} = min(V_{Rsd}; V_{Rcd}) = 19.91\ kN$$

La valutazione è stata eseguita nelle zone soggette a momento negativo, in maniera analoga, utilizzando la corretta altezza utile, si esegue la valutazione nelle zone soggette a momento positivo.

Verifica a scorrimento dell'interfaccia

Si valuta lo scorrimento all'interfaccia tra il nuovo travetto e il solaio esistente in corrispondenza della zona soggetta a momento positivo.

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento positivo:

$$n^{+} = \frac{E_s}{\frac{E}{2}} = 21$$

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento negativo:

$$n^{-} = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,es}}{2}} = 14.02$$

Si esegue nel seguito la valutazione di asse neutro elastico, momento statico della porzione al di sopra della corda considerata e del momento d'inerzia dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro per le zone soggette a momento positivo e per le zone soggette a momento negativo. Relativamente al taglio sollecitante da considerare per la valutazione dello scorrimento all'interfaccia, è necessario considerare il valore del taglio nella sezione esatta in cui si sta eseguendo la verifica.
La larghezza della corda da considerare è pari alla base del nuovo travetto di irrigidimento.

Zone soggette a momento positivo:

L'asse neutro elastico viene valutato imponendo che il momento statico dell'intera sezione parzializzata sia nullo:

$$S = i_{tr} \cdot x_{p1} \cdot \left(x_{p1} - \frac{x_{p1}}{2}\right) + n^{+} \cdot A_{s1} \cdot (x_{p1} - c_1) + n^{+} \cdot A_{s2} \cdot (x_{p1} - c_2) + n^{+} \cdot A_{se3} \cdot (x_{p1} - c_{e3}) = 0$$

con A_{se3} armatura presente nel travetto esistente pari a 0.50 cm2 e posta a 3 cm dall'intradosso del solaio esistente e c_{e3} altezza utile di tale armatura misurata dall'estradosso del solaio rinforzato (35 cm).

Risolvendo l'equazione, si ottiene:

$$x_{p1} = 4.96\ cm$$

Il momento statico (sezione parzializzata) della porzione al di sopra della corda S_{int} vale:

$$S_{int} = i_{tr} \cdot x_{p1} \cdot \left(x_{p1} - \frac{x_{p1}}{2}\right) + n^{+} \cdot A_{s1} \cdot (x_{p1} - c_1) + n^{+} \cdot A_{s2} \cdot (x_{p1} - c_2) = 315.47\ cm^3$$

L'inerzia dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro J_n vale:

$$J_n = \frac{i_{tr} \cdot {x_{p1}}^3}{12} + i_{tr} \cdot x_{p1} \cdot \left(x_{p1} - \frac{x_{p1}}{2}\right)^2 + n^{+}\left(A_{s1} \cdot (c_1 - x_{p1})^2 + A_{s2} \cdot (c_2 - x_{p1})^2 + A_{se3} \cdot (c_{e3} - x_{p1})^2\right)$$

$$J_n = 13958\ cm^4$$

Zone soggette a momento negativo:

L'asse neutro elastico viene valutato imponendo che il momento statico dell'intera sezione parzializzata sia nullo:

$$S = b \cdot x_{n1} \cdot \left(x_{n1} - \frac{x_{n1}}{2}\right) + n^{-} \cdot A_{s1} \cdot (x_{n1} - cn_1) + n^{-} \cdot A_{s2} \cdot (x_{n1} - cn_2) + n^{-} \cdot A_{se3} \cdot (x_{n1} - e_{e3}) = 0$$

con b base del travetto esistente (12 cm), cn_1 altezza utile dell'armatura A_{s1} misurata dall'intradosso del solaio rinforzato (34 cm), cn_2 altezza utile dell'armatura A_{s2} misurata dall'intradosso del solaio rinforzato (27 cm) e e_{e3} altezza utile dell'armatura A_{se3} misurata dall'intradosso del solaio rinforzato (3 cm).

Risolvendo l'equazione, si ottiene:

$$x_{n1} = 16.04\ cm$$

Il momento statico (sezione parzializzata) della porzione al di sopra della corda S_{int} vale:

$$S_{int} = n^- \cdot A_{s1} \cdot (x_{n1} - cn_1) + n^- \cdot A_{s2} \cdot (x_{n1} - cn_2) = 1635.89\ cm^3$$

Il valore sopra indicato è riportato in valore assoluto.

L'inerzia dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro J_n vale:

$$J_n = \frac{b \cdot {x_{n1}}^3}{12} + b \cdot x_{n1} \cdot \left(x_{n1} - \frac{x_{n1}}{2}\right)^2 + n^- \cdot (A_{s1} \cdot (cn_1 - x_{n1})^2 + A_{s2} \cdot (cn_2 - x_{n1})^2 + A_{se3} \cdot (e_{e3} - x_{n1})^2)$$

$$J_n = 43774.9\ cm^4$$

Si riportano di seguito i risultati del software:

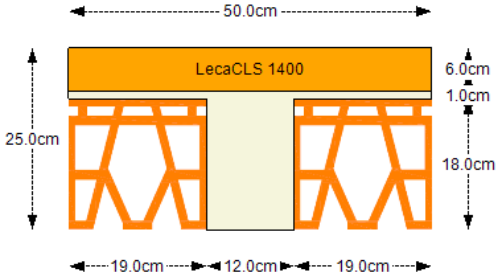
3.5. Caso 5 – Solaio con nuova soletta e Connettore Calcestruzzo Plus D12

Si analizza un solaio esistente, con le caratteristiche di seguito descritte, consolidato mediante realizzazione di una nuova soletta in calcestruzzo leggero strutturale ***LecaCLS 1400***, interconnessa al solaio esistente mediante ***Connettore Calcestruzzo Plus D12***.

Si adottano i seguenti materiali esistenti, con parametri fragili:

- per il calcestruzzo esistente, si seleziona "**Da relazione**" la classe C20/25 e un Livello di Conoscenza LC1 corrispondente ad un Fattore di Confidenza pari a 1.35;
- per l'acciaio esistente, si seleziona "**Da relazione**" la classe FeB44k e un Livello di Conoscenza LC1 corrispondente ad un Fattore di Confidenza pari a 1.35.

Viene adottata la seguente geometria:



GEOMETRIA		
Spessore nuova soletta	6.0	cm
Spessore caldana esistente	1.0	cm
Base travetto	12.0	cm
Altezza travetto	18.0	cm
Interasse travetti	50.0	cm
Lunghezza campata 1	450.0	cm

Il grado di rigidezza è pari a rigidezza molto bassa ad entrambi gli estemi.

Il carico allo Stato Limite Ultimo è determinato come segue:

Coefficienti di sicurezza	Carichi permanenti strutturali	γ_{G1}	1.3	-
	Altri carichi permanenti non strutturali	γ_{G2}	1.5	-
	Carichi variabili	γ_{Q}	1.5	-
Peso proprio	Solaio esistente	G_1	2.15	kN/m^2
	Soletta collaborante (6 cm)		0.93	kN/m^2
Permanenti	Lecamix Facile (6.00 cm)	G_2	0.60	kN/m^2
	Altri permanenti		0.30	kN/m^2
Variabili		Q	2.00	kN/m^2

La combinazione di carico agli SLU considerata è:

$$q = i_{tr} \cdot \left[\gamma_{G1} \cdot (P_{solaio} + P_{soletta} + P_{massetto}) + \gamma_{G2} \cdot P_{altri} + \gamma_{Q} \cdot Q_{var}\right]$$

dove il peso proprio del solaio è valutato considerando una densità del calcestruzzo del travetto esistente di 25 kN/m^3 e delle pignatte di 6 kN/m^3, il peso della soletta viene valutato considerando la classe di massa volumica di appartenenza del calcestruzzo leggero strutturale e il corrispondente valore di massa per unità di volume in accordo alla Tab. C4.1.VI (calcestruzzo non armato).

Il carico per travetto risulta pertanto:

$$q = 50\ cm \cdot [1.3 \cdot (2.15 + 0.93 + 0.60) + 1.5 \cdot 0.30 + 1.5 \cdot 2.00] = 4.12\ \frac{kN}{m}$$

Ai fini del calcolo della spaziatura dei connettori, risulta necessario conoscere il verso del momento sollecitante pre-intervento e nello specifico l'andamento è determinato dalla seguente espressione:

$$M_{sd,pre-int}(x) = q_{pre-int} \cdot \frac{L}{2} \cdot x - q_{pre-int} \cdot \frac{x^2}{2} - q_{pre-int} \cdot \frac{L^2}{48}$$

Il momento si annulla in corrispondenza delle coordinate:

$$x = 4.30\ m$$

$$x = 0.20\ m$$

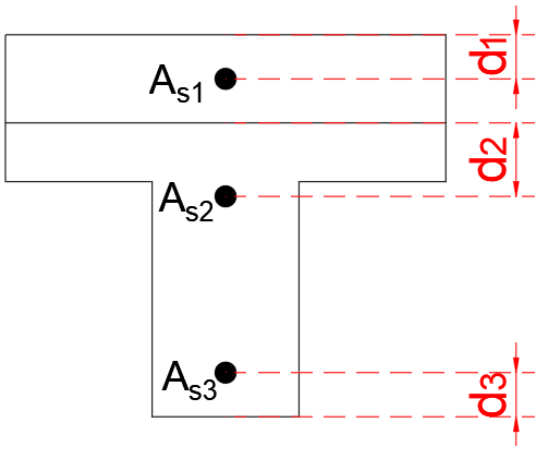
Pertanto, nel caso in esame per $x < 0.20\ m$ e $x > 4.30\ m$ il momento sollecitante risulta negativo mentre per $0.20\ m \leq x \leq 4.30\ m$ risulta positivo.

Ai fini del calcolo della spaziatura dei connettori, risulta inoltre necessario conoscere l'andamento del taglio sollecitante post-intervento:

$$V(x) = q \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right)$$

Il valore massimo del taglio sollecitante si ha agli appoggi e risulta pari a 9.26 kN.

Le armature in sezione sono definite come segue:



$A_{s2} = 0.50\ cm^2\ d_2 = 3\ cm\ (FeB44k)$
$A_{s3} = 1.57\ cm^2\ d_3 = 2\ cm\ (FeB44k)$

Per FeB44k – parametri fragili:

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{FC \cdot \gamma_{ac,es}} = \frac{430}{1.35 \cdot 1.15} = 276.97\ MPa$$

Per C20/25 – parametri fragili:

$$f_{cd} = \frac{0.85 \cdot f_{ck}}{FC \cdot \gamma_{c,es}} = \frac{0.85 \cdot 20}{1.35 \cdot 1.50} = 8.40\ MPa$$

Calcolo asse neutro positivo pre-intervento

Le distanze dall'estradosso della sezione esistente delle armature presenti risultano:

$$c_2 = 3\ cm$$

$$c_3 = 17\ cm$$

La posizione dell'asse neutro è ricavata imponendo l'equilibrio alla traslazione, ipotizzando che la rottura si raggiunga per raggiungimento della massima deformazione all'estremo lembo compresso del calcestruzzo, che l'asse neutro cada nel travetto esistente, che l'armatura superiore sia tesa ed elastica e che quella inferiore sia tesa e snervata (tali ipotesi vanno verificate a posteriori). In via semplificata, si utilizza un legame costitutivo di tipo stress-block per il calcestruzzo esistente (nel programma il legame implementato è il parabola-rettangolo):

$$i_{tr} \cdot f_{cd} \cdot h_{s,es} + b \cdot f_{cd} \cdot \left(0.8x - h_{s,es}\right) - A_{s3} \cdot f_{sd} - A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 0$$

dove $h_{s,es}$ è lo spessore della soletta esistente, E_s pari a 210000 MPa e ε_{s2} è la deformazione delle armature superiori ricavabile utilizzando la similitudine fra triangoli nel diagramma lineare delle deformazioni in sezione:

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\varepsilon_{cu}(c_2 - x)}{x}$$

Risolvendo l'equazione si ottiene un asse neutro (a flessione positiva) pari a:

$$x = 2.46\ cm$$

Le piccole differenze in termini di asse neutro sono dovute ai diversi modelli costitutivi implementati nel software e impiegati nei calcoli manuali.

Le ipotesi fatte risultano soddisfatte.

Calcolo dello scorrimento all'interfaccia

Il numero di connettori da impiegare è quello necessario a trasmettere lo scorrimento tra il solaio esistente e la nuova soletta in calcestruzzo leggero strutturale. Lo scorrimento si calcola tramite la formula di Jourawsky.

Si procede alla valutazione sia per le zone soggette a momento positivo che per le zone soggette a momento negativo.

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento positivo:

$$n^+ = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,LECA}}{2}} = \frac{210000\ MPa}{\left(\frac{15000\ MPa}{2}\right)} = 28.0$$

Si valuta la posizione dell'asse neutro da calcolo elastico della sezione, imponendo che il momento statico dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro sia nullo (ipotesi di asse neutro nella soletta in ***LecaCLS 1400***):

$$i_{tr} \cdot x_p \cdot \left(x_p - \frac{x_p}{2}\right) + n^{+} \cdot \left(A_{s2} \cdot (x_p - c_2) + A_{s3} \cdot (x_p - c_3)\right) = 0$$

dove i_{tr} è l'interasse del solaio.

Si ricava:

$$x_p = 5.68\ cm$$

Si valuta quindi il momento statico della porzione al di sopra della corda considerata posta all'interfaccia tra solaio esistente e nuova soletta, che in tal caso coinvolge la porzione compressa della soletta in calcestruzzo leggero strutturale:

$$S_{int} = i_{tr} \cdot x_p \cdot \left(x_p - \frac{x_p}{2}\right) = 807.64\ cm^3$$

Il momento d'inerzia dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro viene valutato come segue:

$$J_n = \frac{i_{tr} \cdot {x_p}^3}{12} + i_{tr} \cdot x_p \cdot \left(x_p - \frac{x_p}{2}\right)^2 + n^{+} \cdot \left(A_{s2} \cdot (x_p - c_2)^2 + A_{s3} \cdot (x_p - c_3)^2\right) = 16395.68\ cm^4$$

Coefficiente di omogeneizzazione per zone soggette a momento negativo:

$$n^{-} = \frac{E_s}{\frac{E_{cls,esistente}}{2}} = \frac{210000\ MPa}{\left(\frac{29962\ MPa}{2}\right)} = 14.0$$

Si valuta la posizione dell'asse neutro da calcolo elastico della sezione, imponendo che il momento statico dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro sia nullo (ipotesi di asse neutro nel travetto esistente):

$$b_t \cdot x_n \cdot \left(x_n - \frac{x_n}{2}\right) + n^{-} \cdot (A_{s2} \cdot (x_n - e_2)^2 + A_{s3} \cdot (x_n - e_3)^2) = 0$$

dove b_t è la base del travetto e e_2 ed e_3 sono le distanze delle armature dall'intradosso ovvero:

$$e_2 = 16\ cm$$

$$e_3 = 2\ cm$$

Si ricava:

$$x_n = 3.23\ cm$$

Il momento statico della porzione al di sopra della corda considerata posta all'interfaccia tra solaio esistente e nuova soletta risulta quindi nullo:

$$S_{int} = 0\ cm^3$$

Il momento d'inerzia dell'intera sezione parzializzata rispetto all'asse neutro viene valutato come segue:

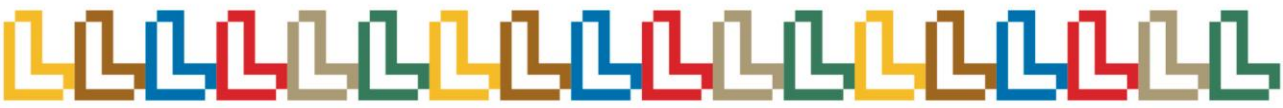
$$J_n = \frac{b_t \cdot {x_n}^3}{12} + b_t \cdot x_n \cdot \left(x_n - \frac{x_n}{2}\right)^2 + n^- \cdot (A_{s2} \cdot (x_n - e_2)^2 + A_{s3} \cdot (x_n - e_3)^2) = 1311.05\ cm^4$$

È quindi possibile calcolare, per ogni punto in cui è stato discretizzato il solaio, la tensione tangenziale all'interfaccia:

$$\tau_{interfaccia} \cdot b = \frac{V_{Sd} \cdot S_{int}}{J_n}$$

Si riporta nella seguente tabella il taglio sollecitante e il corrispondente valore di $\tau_{interfaccia} \cdot b$ nei punti di discretizzazione del solaio:

Camp.	Progr. [m]	V_{sd} [kN]	S_{int} [cm³]	J_n [cm⁴]	$\tau_{sd}b$ [N/mm]
1	0.00	9.26	0.00	1311.05	0.00
1	0.15	8.65	0.00	1311.05	0.00
1	0.30	8.03	807.64	16395.68	39.55
1	0.45	7.41	807.64	16395.68	36.51
1	0.60	6.79	807.64	16395.68	33.47
1	0.75	6.18	807.64	16395.68	30.42
1	0.90	5.56	807.64	16395.68	27.38
1	1.05	4.94	807.64	16395.68	24.34
1	1.20	4.32	807.64	16395.68	21.30
1	1.35	3.71	807.64	16395.68	18.25
1	1.50	3.09	807.64	16395.68	15.21
1	1.65	2.47	807.64	16395.68	12.17
1	1.80	1.85	807.64	16395.68	9.13
1	1.95	1.24	807.64	16395.68	6.08
1	2.10	0.62	807.64	16395.68	3.04
1	2.25	0	807.64	16395.68	0.00
1	2.40	-0.62	807.64	16395.68	3.04
1	2.55	-1.24	807.64	16395.68	6.08
1	2.70	-1.85	807.64	16395.68	9.13
1	2.85	-2.47	807.64	16395.68	12.17
1	3.00	-3.09	807.64	16395.68	15.21
1	3.15	-3.71	807.64	16395.68	18.25
1	3.30	-4.32	807.64	16395.68	21.30
1	3.45	-4.94	807.64	16395.68	24.34
1	3.60	-5.56	807.64	16395.68	27.38
1	3.75	-6.18	807.64	16395.68	30.42
1	3.90	-6.79	807.64	16395.68	33.47
1	4.05	-7.41	807.64	16395.68	36.51
1	4.20	-8.03	807.64	16395.68	39.55
1	4.35	-8.65	0.00	1311.05	0.00
1	4.50	-9.26	0.00	1311.05	0.00



Calcolo dell'aderenza all'interfaccia

Si valuta il contributo offerto dall'aderenza allo scorrimento v_{Rdi}, in accordo al paragrafo §6.2.5 UNI EN 1992-1-1:2015, utilizzando i parametri per superficie liscia, con la seguente formula:

$$v_{Rdi} = min(c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n;\ 0.5 \cdot \nu \cdot f'_{cd})$$

dove:

$$c = 0.2$$

$$\mu = 0.6$$

$$f_{ctd,esistente} = \frac{0.7 \cdot 0.3\ {f_{ck}}^{2/3}}{FC \cdot \gamma_c} = 0.76\ MPa$$

$$\eta_1 = 0.4 + 0.6 \cdot \frac{\rho}{2200} = 0.809$$

$$f_{lctm} = 0.3 \cdot f_{lck}^{\frac{2}{3}} \cdot \eta_1 = 1.93\ MPa$$

$$f_{lctk} = 0.7 \cdot f_{lctm} = 1.35\ MPa$$

$$f_{lctd} = \frac{0.85 \cdot f_{lctk}}{\gamma_c} = 0.77\ MPa$$

$$f_{ctd} = min\left(f_{ctd,esistente}\ ;\ f_{lctd}\right) = 0.76\ MPa$$

$$f'_{cd} = min\left(f_{cd,esistente,parametri\ fragili};\ f_{lcd}\right) = 8.40\ MPa$$

$$\nu = min\left[0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck,esistente}}{250}\right); 0.5 \cdot \left(1 - \frac{f_{lck}}{250}\right)\right] = 0.455$$

$$q^*_{slu} = \gamma_{G1} \cdot [P_{soletta} + P_{massetto}] + \gamma_{G2} \cdot P_{altri} + \gamma_Q \cdot Q_{var} = 0.005\ MPa$$

$$\sigma_n = min(q^*_{slu}\ ;\ 0.6 f'_{cd}) = 0.005\ MPa$$

dove ρ è il valore limite superiore della massa per unità di volume del calcestruzzo, per la classe di massa per unità di volume di appartenenza in kg/m^3 pari a 1500 nel caso specifico.

Risulta quindi:

$$v_{Rdi} = min\ (c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n; 0.5 \cdot \nu \cdot f'_{cd}) = min(0.16\ MPa;\ 1.91\ MPa) = 0.16\ MPa$$

Il termine v_{Rdi} viene poi moltiplicato per il termine L, al fine di ottenere una quantità confrontabile con $\tau_{interfaccia} \cdot b$. Il termine L risulta pari alla base del travetto $L = b_t = 120\ mm$.

Pertanto, risulta:

$$v_{Rdi} \cdot L = 18.72 \frac{N}{mm}$$

Valutazione della resistenza di calcolo di Connettore Calcestruzzo Plus D12

Si procede al calcolo dei termini che concorrono alla determinazione della resistenza di progetto del connettore da impiegare ai fini del calcolo nelle porzioni di solaio dove il calcestruzzo esistente sia fessurato ($P_{Rd,ck}$) e dove il calcestruzzo esistente sia non fessurato ($P_{Rd,uck}$).

Rottura dell'acciaio dell'ancorante:

La resistenza caratteristica per rottura dell'acciaio dell'ancorante, comune sia al caso fessurato che al caso non fessurato, risulta:

$$V_{Rd,s} = \frac{V_{Rk,s}}{\gamma_{Ms}} = \frac{25.6\ kN}{1.25} = 20.48\ kN$$

Rottura per pry-out del calcestruzzo:

Tale modalità di rottura dipende fortemente dallo stato di compressione/trazione del calcestruzzo nel quale viene inserito il connettore e, per tale ragione, si calcolano due valori di $N^0_{Rk,c}$ e quindi di $N_{Rk,c}$ (uno per la condizione di calcestruzzo fessurato e uno per la condizione di calcestruzzo non fessurato).

$$N^0_{Rk,c} = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5} = \begin{cases} 7.7 \cdot \sqrt{20} \cdot 52^{1.5} = 12912.51\ N\ (ck) \\ 11 \cdot \sqrt{20} \cdot 52^{1.5} = 18446.45\ N\ (uck) \end{cases}$$

$$A^0_{c,N} = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N} = 156 \cdot 156 = 24336\ mm^2$$

$$A_{c,N} = \left(\frac{b_t}{2} + min\left(\frac{b_t}{2}; 0.5 s_{cr,N}\right)\right) \cdot s_{cr,N} = \left(\frac{120}{2} + min\left(\frac{120}{2}; 0.5 \cdot 156\right)\right) \cdot 156 = 18720\ mm^2$$

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{60}{78} = 0.931 \leq 1$$

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} = 0.5 + \frac{52}{200} = 0.76 \leq 1$$

$$N_{Rk,c} = N^0_{Rk,c} \cdot \frac{A_{c,N}}{A^0_{c,N}} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} = \begin{cases} 12912.51 \cdot \frac{18720}{24336} \cdot 0.931 \cdot 0.76 = 7026.24\ N\ (ck) \\ 18446.45 \cdot \frac{18720}{24336} \cdot 0.931 \cdot 0.76 = 10037.49\ N\ (uck) \end{cases}$$

$$V_{Rd,cp} = \frac{k_8 \cdot N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} = \begin{cases} \frac{1 \cdot 7026.24}{1.5} = 4684.16\ N\ (ck) \\ \frac{1 \cdot 10037.49}{1.5} = 6691.66\ N\ (uck) \end{cases}$$

Rottura del bordo di calcestruzzo:

Tale modalità di rottura dipende fortemente dallo stato di compressione/trazione del calcestruzzo nel quale viene inserito il connettore e, per tale motivo, si calcolano due valori di $V^0_{Rk,c}$ e quindi di $V_{Rk,c}$ (uno per la condizione di calcestruzzo fessurato e uno per la condizione di calcestruzzo non fessurato).

$$\alpha = 0.1 \cdot \left(\frac{l_f}{c_1}\right)^{0.5} = 0.1 \cdot \left(\frac{52}{60}\right)^{0.5} = 0.093$$

$$\beta = 0.1 \cdot \left(\frac{d_{nom}}{c_1}\right)^{0.2} = 0.1 \cdot \left(\frac{12.5}{60}\right)^{0.2} = 0.073$$

$$V^0_{Rk,c} = k_9 \cdot d_{nom}^{\alpha} \cdot l_f^{\beta} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot c_1^{1.5} = \begin{cases} 1.7 \cdot 12.5^{0.093} \cdot 52^{0.073} \cdot \sqrt{20} \cdot 60^{1.5} = 5966.22\ N\ (ck) \\ 2.4 \cdot 12.5^{0.093} \cdot 52^{0.073} \cdot \sqrt{20} \cdot 60^{1.5} = 8422.90\ N\ (uck) \end{cases}$$

$$A^0_{c,v} = 1.5c_1 \cdot (1.5c_1 + 1.5c_1) = 4.5c_1^2 = 4.5 \cdot 45^2 = 9112.5\ mm^2$$

$$A_{c,v} = min(h_t + h_c\ ;\ 1.5c_1) \cdot min(3c_1\ ;\ b_t) = min(190; 67.5) \cdot min(135; 120) = 8100\ mm^2$$

$$\psi_{s,V} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c_2}{1.5c_1} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{60}{1.5 \cdot 60} = 0.90\ \leq 1$$

$$\psi_{h,V} = \left(\frac{1.5c_1}{h}\right)^{0.5} = \left(\frac{1.5 \cdot \frac{b_t}{2}}{h_t + h_c}\right)^{0.5} = \left(\frac{1.5 \cdot 60}{190}\right)^{0.5} = 0.69 < 1 \rightarrow\ \psi_{h,V} = 1$$

$$\psi_{\alpha,V} = \sqrt{\frac{1}{(cos\ \alpha_V)^2 + (0.5sin\ \alpha_V)^2}} = \sqrt{\frac{1}{(cos\ 90°)^2 + (0.5sin\ 90°)^2}} = 2 \geq 1$$

$$V_{Rk,c} = V^0_{Rk,c} \cdot \frac{A_{c,V}}{A^0_{c,V}} \cdot \psi_{s,V} \cdot \psi_{h,V} \cdot \psi_{\alpha,V} = \begin{cases} 5966.22 \cdot \frac{8100}{9112.5} \cdot 0.90 \cdot 1 \cdot 2 = 9545.96\ N\ (ck) \\ 8422.90 \cdot \frac{8100}{9112.5} \cdot 0.90 \cdot 1 \cdot 2 = 13476.65\ N\ (uck) \end{cases}$$

$$V_{Rd,c} = \frac{V_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} = \begin{cases} \frac{9545.96}{1.5} = 6363.97\ N\ (ck) \\ \frac{13476.65}{1.5} = 8984.43\ N\ (uck) \end{cases}$$

È quindi possibile valutare la resistenza di progetto del connettore:

$$P_{Rd,ck} = min(V_{Rd,s}; V_{Rd,cp}; V_{Rd,c}) = min(20480\ N; 4684.16\ N; 6363.97\ N) = 4.68\ kN$$

$$P_{Rd,uck} = min(V_{Rd,s}; V_{Rd,cp}; V_{Rd,c}) = min(20480\ N; 6691.66\ N; 8984.43\ N) = 6.69\ kN$$

Calcolo del passo e della distribuzione dei connettori

Per ogni punto in cui è stato discretizzato il solaio analizzato, si calcola il passo (denominato PC = passo calcolato) dei connettori nella coordinata considerata. Il valore di progetto di ***Connettore Calcestruzzo Plus D12*** risulta essere $P_{Rd,ck}$ in ogni coordinata ovvero sia nelle zone a momento negativo che nelle zone a momento positivo poiché l'asse neutro, in queste ultime zone, rispetta la condizione seguente:

$$A^{+}_{N,pre-int} = 2.46\ cm < 0.9h_{ef} = 4.68\ cm$$

A titolo di esempio, si riporta il calcolo di PC in corrispondenza del punto in cui lo scorrimento risulta massimo:

$$PC\ (x = 0.30\ m) = \frac{P_{Rd}}{(\tau_{interfaccia} \cdot b) - (v_{Rdi} \cdot L)} = 225\ mm$$

Per ogni coordinata, qualora il passo calcolato PC risulti inferiore o pari a zero oppure superiore alla spaziatura massima, si impone la spaziatura massima pari a 500 mm, ottenendo così il passo calcolato corretto PCC.
Si riporta nella seguente tabella i passi calcolati e i passi calcolati corretti per ogni punto di discretizzazione del solaio:

Camp.	Progr. [m]	PC [cm]	PCC [cm]
1	0.00	-25.01	50.00
1	0.15	-25.01	50.00
1	0.30	22.50	22.50
1	0.45	26.35	26.35
1	0.60	31.79	31.79
1	0.75	40.06	40.06
1	0.90	54.14	50.00
1	1.05	83.51	50.00
1	1.20	182.49	50.00
1	1.35	-985.04	50.00
1	1.50	-133.15	50.00
1	1.65	-71.40	50.00
1	1.80	-48.78	50.00
1	1.95	-37.04	50.00
1	2.10	-29.86	50.00
1	2.25	-25.01	50.00
1	2.40	-29.86	50.00
1	2.55	-37.04	50.00
1	2.70	-48.78	50.00
1	2.85	-71.40	50.00
1	3.00	-133.15	50.00
1	3.15	-985.04	50.00
1	3.30	182.49	50.00
1	3.45	83.51	50.00
1	3.60	54.14	50.00
1	3.75	40.06	40.06
1	3.90	31.79	31.79
1	4.05	26.35	26.35
1	4.20	22.50	22.50
1	4.35	-25.01	50.00
1	4.50	-25.01	50.00

Si determina quindi la disposizione dei connettori, sia nell'ipotesi di spaziatura costante per campata che variabile.

Spaziatura costante per campata

Il passo teorico di posa risulta essere il minimo dei passi calcolati corretti:

$$passo\ teorico = min(PCC) = 22.50\ cm$$

Noto il passo teorico, è possibile calcolare il numero teorico di connettori per la campata considerata:

$$N.conn\ teorico = \frac{L_i}{passo\ teorico} = \frac{450}{22.50} = 20.02$$

Il $N.conn\ teorico$ viene arrotondato all'intero pari successivo, trovando così $N.connettori$ (pari a 22) e quindi il passo reale con cui andranno posati i connettori:

$$passo = \frac{L_i}{N.connettori} = \frac{450}{22} = 20.5\ cm$$

Infine, il numero di connettori a metro quadro viene determinato dividendo il numero totale di connettori per la luce totale e l'interasse dei travetti.

$$N.conn.a\ m^2 = \frac{N.connettori}{L_i \cdot i_{tr}} = \frac{22}{4.5 \cdot 0.50} = 9.8$$

Si ottiene dunque:

	Campata 1
	L
Lunghezza [cm]	450.0
N° conn. [-]	22
Spaziatura [cm]	20.5
N° conn. a m²	9.8
N° conn. tot [-]	22

Spaziatura variabile

La spaziatura variabile viene calcolata considerando i quarti estremi di trave e la mezzeria centrale. Si identificano i punti in cui è stato discretizzato il solaio appartenenti a $L/4$ di sinistra, a $L/4$ di destra e a $L/2$ centrali e per ognuno dei tratti il passo teorico di posa risulta essere il minimo dei passi calcolati corretti dei punti appartenenti a quel tratto:

$$passo\ teorico = \begin{cases} min(PCC)\ in\ \frac{L}{4}\ di\ sinistra = 22.50\ cm \\ min(PCC)\ in\ \frac{L}{2}\ centrali = 50\ cm \\ min(PCC)\ in\ \frac{L}{4}\ di\ destra = 22.50\ cm \end{cases}$$

Noto il passo teorico, è possibile calcolare il numero teorico di connettori per il tratto considerato:

$$N.conn\ teorico = \frac{L_i}{passo\ teorico} = \begin{cases} \frac{112.5}{22.50} = 5.004\ in\ \frac{L}{4}\ di\ sinistra \\ \frac{225}{50} = 4.5\ in\ \frac{L}{2}\ centrali \\ \frac{112.5}{22.50} = 5.004\ in\ \frac{L}{4}\ di\ destra \end{cases}$$

con L_i pari alla lunghezza del tratto considerato.

$N.conn\ teorico$ risulta essere un numero non intero, si procede quindi ad arrotondare il numero di connettori teorico al primo intero successivo in $L/4$ e al primo intero successivo pari in $L/2$, trovando così $N.connettori$ e quindi il passo reale con cui andranno posati i connettori:

$$passo = \frac{L_i}{N.connettori} = \begin{cases} \frac{100}{6} = 18.8\ cm\ in\ \frac{L}{4}\ di\ sinistra \\ \frac{200}{6} = 37.5\ cm\ in\ \frac{L}{2}\ centrali \\ \frac{100}{6} = 18.8\ cm\ in\ \frac{L}{4}\ di\ destra \end{cases}$$

Infine, il numero di connettori a metro quadro viene determinato dividendo il numero totale di connettori per la luce totale e l'interasse dei travetti.

$$N.conn.\ a\ m^2 = \frac{N.connettori\ totale}{L_{tot} \cdot i_{tr}} = \frac{6+6+6}{4.5 \cdot 0.50} = 8.0$$

Si ottiene dunque:

Campata 1			
	L/4	L/2	L/4
Lunghezza [cm]	112.5	225.0	112.5
N° conn. [-]	6	6	6
Spaziatura [cm]	18.8	37.5	18.8
N° conn. a m²	8.0		
N° conn. tot [-]	18		

Distinti saluti.

Assistenza Tecnica

Laterlite

Laterlite
Le tue soluzioni per costruire

Laterlite SpA

Assistenza tecnica
via Correggio 3
20149 Milano
tel. 02 48011962
Laterlite@laterlite.it
Laterlite.it