

COMUNE DI CALENDASCO

**CONSOLIDAMENTO DI PARTE DELL'ALA
SUD-OVEST DEL CASTELLO DI CALENDASCO**

RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE

Piacenza, aprile 2025

1	RELAZIONE GENERALE.....	3
1.1	DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA E CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE, ANALISI E VERIFICA	3
1.2	QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO ADOTTATO.....	4
1.3	AZIONI DI PROGETTO SULLA COSTRUZIONE	4
1.4	ANALISI STORICO-CRITICA	6
1.5	LINEE DI INTERVENTO	6
2	RELAZIONE DI CALCOLO	9
2.1	FATTORE DI CONFIDENZA	9
2.2	TIPO DI ANALISI SVOLTA	9
2.3	SOSTITUZIONE DI SOLAIO	11

1 RELAZIONE GENERALE

1.1 DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA E CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE, ANALISI E VERIFICA

DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA

Oggetto del presente progetto sono le opere di consolidamento di parte dell'ala sud-ovest del castello di Calendasco, nell'ambito della riqualificazione del bene, con messa in sicurezza strutturale, realizzazione di nuovi servizi igienici e realizzazione delle "cucine francigene"

L'intervento strutturale consiste in:

- rifacimento del solaio d'interpiano nella tipologia legno-calcestruzzo, con collegamento perimetrale alle strutture esistenti
- completamento dell'intervento in fondazione di cui al Bando Giovanni, con realizzazione di cordoli interni sui lati nord e ovest.

A piano terra, per conferire maggiore uniformità al piano di posa del vespaio, si prevede la realizzazione di una cappa in CA, armata con rete e collegata perimetralmente alle murature.

CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE

L'intervento si configura come **INTERVENTO LOCALE**.

CRITERI DI ANALISI E VERIFICA

Le analisi sono condotte con riferimento alle Norme Tecniche di cui al DM 17-1-2018.

1.2 QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO ADOTTATO

1.2.1 NORME DI RIFERIMENTO COGENTI

La normativa di riferimento è il D.M. 17/1/2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni".

D.M. 17.1.2018: "Aggiornamento delle nuove norme tecniche per le costruzioni", Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale", n.42 del 20 febbraio 2018.

Circolare n° 7 del 21-1-2019: "Istruzioni per l'applicazione dell'"Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018"

L.R 19/2008: "Norme per la riduzione del rischio sismico"

1.2.2 ALTRE NORME E DOCUMENTI TECNICI INTEGRATIVI

Riferimenti tecnici: EuroCodici

Per quanto non diversamente specificato nel D.M.17.1.2018, si intendono coerenti con i principi alla base del Decreto le indicazioni riportate nei documenti di riferimento elencati in §12; fra questi: gli EuroCodici strutturali.

1.3 AZIONI DI PROGETTO SULLA COSTRUZIONE

Azioni ambientali e naturali

- azione sismica
territorio di Calendasco è in zona sismica 3 secondo la classificazione indicata nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003

Azioni antropiche

- peso proprio dei materiali strutturali
muratura in mattoni pieni/mista 18 kN/m³
legno massello: 6 kN/m³
- carichi permanenti non strutturali
Si considerano carichi permanenti non strutturali quelli derivanti da massetti, pavimenti, rivestimenti, impianti, tramezzi.

Azioni sismiche

L'azione sismica di riferimento è calcolata sulla base delle indicazioni contenute nella relazione geologica eseguita per i recenti interventi sul castello, come di seguito riportato. Classe d'uso III.

Stati limite

Classe Edificio: III. Affollamento significativo...

Vita Nominale: 50

Interpolazione: Media ponderata

CU = 1.5

Stato Limite	Tr [anni]	a _g [g]	Tc [s]
Operatività (SLO)	45	0.035	2.561
Danno (SLD)	75	0.043	2.546
Salvaguardia vita (SLV)	712	0.103	2.491
Prevenzione collasso (SLC)	1462	0.133	2.482
Periodo di riferimento per l'azione sismica:	75		

Coefficienti sismici

Tipi: Muri di sostegno NTC 2008

Muri di sostegno che non sono in grado di subire spostamenti.

H (m)	us (m)
1	0.1

Cat. Sottosuolo: C

Cat. Topografica: T1

SLO	SLD	SLV	SLC
SS Amplificazione stratigrafica	1,50	1,50	1,50
CC Coeff. funz categoria	1,74	1,67	1,58
ST Amplificazione topografica	1,00	1,00	1,00

Acc. ne massima attesa al sito [m/s²] 0.6

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.010	0.012	0.037	0.048

SLO

a _{max}	0,521 m/s ²
β _s	0,20
K _{hk}	0,011
K _v	0,005

SLV

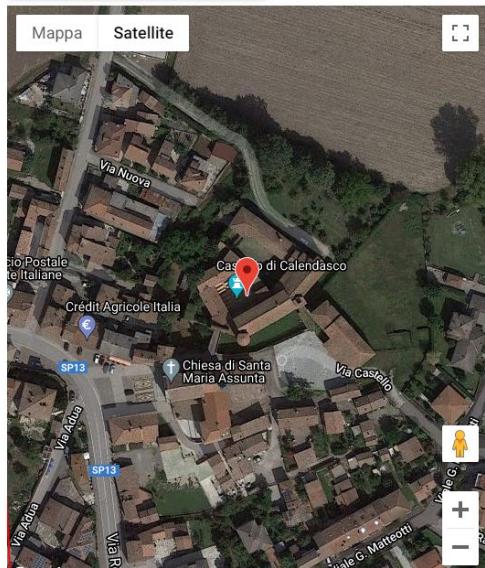
a _{max}	1,518 m/s ²
β _s	0,24
K _{hk}	0,036
K _v	0,018

SLD

a _{max}	0,636 m/s ²
β _s	0,20
K _{hk}	0,013
K _v	0,006

SLC

a _{max}	1,961 m/s ²
β _s	0,24
K _{hk}	0,048
K _v	0,024



1.4 ANALISI STORICO-CRITICA

Per i dettagli circa l'evoluzione del complesso edilizio si rimanda alla relazione architettonica.

Nel seguito se ne riassumono gli aspetti salienti, emersi dalle indagini storico-documentali e dai saggi svolti, che rivestono interesse strutturale.

- gli ambienti delle ali nord-ovest e sud-ovest del Castello sono stato oggetto di significative trasformazioni, cambiando radicalmente l'impianto originario;
- l'ala sud ovest, sul lato verso le mura (locali A-B-C), era dotata di un piano ipogeo, come attestato dalle volte rinvenute nel corso dei saggi;
- il muro perimetrale lato mura ha fondazioni in muratura con archi di scarico, come già rilevato anche in corrispondenza dell'ambiente F nel corso di indagini precedenti;
- la soletta di copertura dell'ambiente F piano terra è in ottimo stato, in quanto oggetto di recente intervento di rifacimento nell'ambito del BANDO GIOVANI INSIEME;
- la soletta di copertura degli ambienti piano terra dell'ala sud è del tipo a putrelle e tavelloni, senza cappa. Di fatto è un controsoffitto non calpestabile, risalente alla seconda metà del '900,

1.5 LINEE DI INTERVENTO

L'intervento di rifunzionalizzazione dell'ala sud ovest coinvolge anche uno dei locali oggetto del Bando Giovani.

Le opere principali opere di messa in sicurezza sono quindi già state realizzate e comprendono:

- realizzazione di cuciture armate/cuci scuci sulla parete lato nord-ovest e sud-ovest;
- Inserimento di catene in corrispondenza della soletta di copertura del piano primo/sottotetto;
- Consolidamento delle fondazioni dei lati nord-ovest e sud-ovest r
- Sostituzione del solaio di copertura del locale F piano terra (futuri servizi igienici delle cucine francigene).

A completamento dell'intervento relativo ai locali afferenti al progetto delle cucine francigene si prevede il rifacimento di solaio in acciaio e laterizio a copertura del piano terra.

Il nuovo solaio è analogo al solaio già realizzato a copertura del locale F ed è del tipo legno-calcestruzzo, da realizzarsi con travetti ed assito in legno di rovere.

Per garantire una buona distribuzione dei carichi al piano terra e preservare le volte interrate rinvenute, si prevede di realizzare una soletta contro terra, armata e collegata alle murature perimetrali, che funga altresì da base per la posa del vespaiò.

Analogamente a quanto già fatto per l'intervento di cui al Vando Giovani, si prevede il ripristino della continuità muraria attraverso interventi mirati di cuci scuci e risarciture delle lesioni, che riguardano principalmente il fronte ovest.

Tutti gli interventi proposti sono ideati in modo unitario e coerentemente con le indicazioni dalle **"Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale – allineamento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni"** di cui al D.P.C.M. del 09/02/2011.

Interventi in fondazione (rif. Linee Guida p.to 6.3.9)

A completamento di quanto fatto nell'ambito del Bando Giovani si prevede la realizzazione anche dei cordoli interni all'edifici sui lati nord e ovest.
L'intervento è coerente con le Linee Guida, che ----forniscono le seguenti indicazioni.

"Allargamento delle fondazioni mediante cordoli o platea armata.

L'intervento dovrà essere realizzato curando il collegamento fra vecchia e nuova fondazione al fine di ottenere un sistema di fondazione sufficientemente rigido da limitare adeguatamente i possibili cedimenti differenziali. A tal fine si adotteranno travi in c.a. armate e staffate, traversi in acciaio di idonea rigidità, barre post-tese che garantiscono una trasmissione degli sforzi per attrito e simili accorgimenti. Questo tipo di intervento ha anche l'effetto benefico di realizzare un efficace collegamento orizzontale fra le murature a livello di fondazione."

Interventi volti ad incrementare la resistenza degli elementi murari (rif. Linee Guida p.to 6.3.6)

Riguardo all'incremento della resistenza muraria le linee guida di cui al D.P.C.M. del 09/02/2011 al p.to 6.3.6 per tali problematiche indicano la seguente strada:

A seconda dei casi si procederà:

- a riparazioni localizzate di parti lesionate o degradate;
- a ricostituire la compagine muraria in corrispondenza di manomissioni quali cavità, vani di varia natura (scarichi e canne fumarie, ecc.);
- a migliorare le caratteristiche di murature particolarmente scadenti per tipo di apparecchiatura e/o di composto legante.

L'intervento di scuci e cuci è finalizzato al ripristino della continuità muraria lungo le linee di fessurazione ed al risanamento di porzioni di muratura gravemente deteriorate. Si consiglia di utilizzare materiali simili a quelli originari per forma, dimensioni, rigidità e resistenza, collegando i nuovi elementi alla muratura esistente con adeguate ammorsature nel piano del paramento murario e se possibile anche trasversalmente al paramento stesso, in modo da conseguire la massima omogeneità e monoliticità della parete riparata. Tale intervento può essere utilizzato anche per la chiusura di nicchie, canne fumarie e per la riduzione dei vuoti, in particolare nel caso in cui la nicchia/apertura/ cavità sia posizionata a ridosso di angolate o martelli murari.

L'adozione di iniezioni di miscele leganti mira al miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura da consolidare. A tale tecnica non può essere affidato il compito di realizzare efficaci ammorsature tra le pareti murarie. Tale intervento risulta inefficace se impiegato su tipologie murarie che per loro natura siano scarsamente iniettabili (scarsa presenza di vuoti e/o vuoti non collegati tra loro).

Particolare attenzione va posta nella scelta della pressione di immissione della miscela, per evitare l'insorgere di dilatazioni trasversali.

Particolare cura dovrà essere rivolta alla scelta della miscela da iniettare, curandone la compatibilità chimico-fisico-meccanica con la tipologia muraria oggetto dell'intervento.

L'intervento di ristolatura dei giunti, se effettuato in profondità su entrambi i lati, può migliorare le caratteristiche meccaniche della muratura, in particolare nel caso di murature di spessore non elevato

Quanto alla scelta dei materiali da utilizzare, le Linee Guida recitano:

Malte a base cementizia possono produrre danni alle murature e in particolare alle superfici, per la produzione di sali; l'affioramento di sali solubili dalla malta provoca efflorescenze sulla superficie della muratura, particolarmente dannose in presenza di antichi intonaci storici o affreschi. Tali malte potranno essere utilizzate solo dopo averne accuratamente valutati gli eventuali effetti negativi.

Si prevedono dunque i seguenti interventi:

- risarcitura delle lesioni con malte a base di calce, di tipo reoplastico, antiritiro, dotate di buona fluidità ed iniettabilità, adesione al supporto, prive di sali solubili e caratterizzate da un'ottima resistenza meccanica e un basso modulo elastico.
- Cuci scuci locale delle porzioni che presentano dislocazione di pietre e laterizi ed aperture di grande ampiezza (> 10 mm)
- cuciture armate della parete maggiormente disammorsata, sul fronte nord.

Il ricorso a materiali compatibili con gli originali consente infatti una più sicura integrazione dei nuovi elementi con il manufatto, limitando eventuali discontinuità nelle caratteristiche chimiche e meccaniche.

Sia per i ripristini, sia per inghisaggi ed iniezioni si prevedono malte che diano garanzia tanto di prestazione meccanica (classi M5-M10), quanto di compatibilità (malte a base di calce). In particolare:

- Malte per allestimenti: Rudus Muratura - Calchèra San Giorgio, resistenza M5
- Malte per iniezioni: Boiacca Iniezione 100 - Calchèra San Giorgio, resistenza M10
- Malte per inghisaggi: Boiacca Iniezione 100 - Calchèra San Giorgio, resistenza M10
- Malte per ripristini intonaco: Intonaco Lavato - Calchèra San Giorgio

2 RELAZIONE DI CALCOLO

2.1 FATTORE DI CONFIDENZA

Per la determinazione del fattore di confidenza, si fa riferimento al D.P.C.M. del 09/02/2011, punto 4.2.

Rilievo geometrico	identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	Proprietà meccaniche dei materiali	Terreno e fondazioni
rilievo geometrico completo $F_{ci} = 0.05$	restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associati alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche) $F_{c2} = 0.12$	parametri meccanici desunti da dati già disponibili $F_{c3} = 0.12$	limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni $F_{c4} = 0.06$
rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi $F_{ci} = 0$	restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associati alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associati alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche) $F_{c2} = 0.06$	limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali $F_{ci} = 0.06$	disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni $F_{c4} = 0.03$
	restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esauriente rilievo materico e degli elementi costruttivi associati alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche) $F_{c2} = 0$	estese indagini sui parametri meccanici dei materiali $F_{ci} = 0$	estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni $F_{c4} = 0$

$$F_{c1}=0.00 \quad F_{c2}=0.12 \quad F_{c3}=0.12 \quad F_{c4}=0.06 \quad \rightarrow \quad FC= 1+\Sigma F_{ci}=1.3$$

La circolare MIT n° 7 del 21-01-2019 al punto C8.5.4 definisce tuttavia un fattore di confidenza più cautelativo:

$$FC= 1.35$$

2.2 TIPO DI ANALISI SVOLTA

INTERVENTO DI RIPARAZIONE O INTERVENTO LOCALE

Nel caso di interventi localizzati le NTC specificano al punto 8.4.1 quanto segue.

In generale, gli interventi di questo tipo riguardano singole parti e/o elementi delle strutture. Essi non devono cambiare significativamente il comportamento globale della costruzione e sono volti a conseguire una o più delle seguenti finalità:

- ...
- migliorare le caratteristiche di resistenza e/o duttilità di elementi o parti danneggiate
- impedire meccanismi di collasso locale
- modificare un elemento o una porzione limitata della struttura

Con l'intervento non viene modificata in modo significativo la rigidezza degli elementi strutturali, né ci sarà un aumento significativo dei carichi verticali.

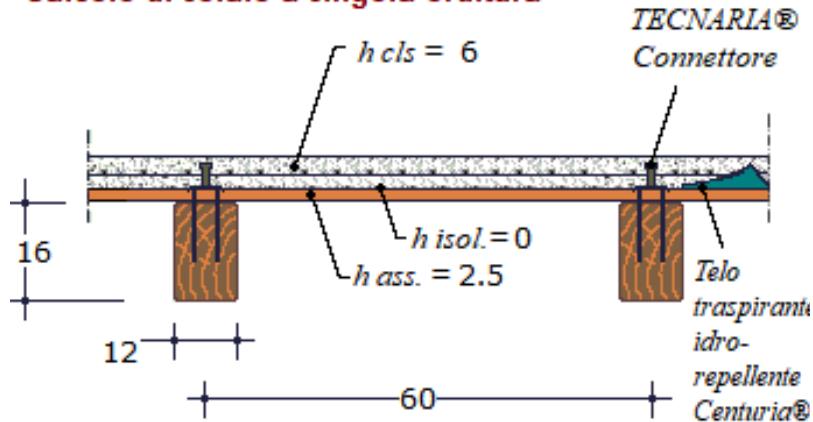
Poiché gli interventi prospettati non ricadono fra quelli per cui è obbligatoria la valutazione della sicurezza globale secondo le NTC 2018, si procederà alla verifica della variazione del livello locale di sicurezza.

Trattandosi di un edificio esistente in muratura, le verifiche sono svolte con riferimento allo Stato Limite Ultimo.

2.3 SOSTITUZIONE DI SOLAIO

Nel seguito si riporta il dimensionamento del nuovo solaio legno-calcestruzzo.

Calcolo di solaio a singola orditura



RISULTATI DELLE VERIFICHE

Connettore tipo CTL MAXI 12/ 40

Spaziatura variabile - ai quarti estremi della trave	10.8 cm
- nella metà centrale della trave	21.6 cm
Numero connettori: - per trave	37 - a metro quadro 10.28
Beff: 72.0 cm	M= 0.00+ 14.88 kNm EJ t0= 2006 kN m ²
	V= 0.00+ 11.91kN EJ tinf= 1094 kN m ²

Verifiche SLU a tempo ZERO

CLS - tensione sup.	$\sigma_{c,max} = 6.88 \leq 17.85 \text{ N/mm}^2$
CLS - tensione inf.	$\sigma_{c,min} = -3.97 \text{ N/mm}^2$
LEGNO - tensoflessione	$0.84 \leq 1.00$
LEGNO - taglio	$\tau_{l,max} = 0.76 \leq 2.08 \text{ N/mm}^2$
CONNETTORE - taglio	$F_{con,max} = 5419 \leq 7507 \text{ N}$

Verifiche SLU a tempo INFINITO

CLS - tensione sup	$\sigma_{c,max} = 5.50 \leq 17.85 \text{ N/mm}^2$
CLS - tensione inf	$\sigma_{c,min} = -2.48 \text{ N/mm}^2$
LEGNO - tensoflessione	$= 0.89 \leq 1.00$
LEGNO - taglio	$\tau_{l,max} = 0.80 \leq 2.08 \text{ N/mm}^2$
CONNETTORE - taglio	$F_{con,max} = 5637 \leq 7507 \text{ N}$

Verifiche SLE	Fr.iniziale solo Q	Fr max = 5.84 $\leq 10.00 \text{ mm}$
	Freccia attiva	Fr max = 9.99 $\leq 10.00 \text{ mm}$
	Freccia totale	Fr max = 18.11 $\leq 20.00 \text{ mm}$

Armatura corrente per trave

$A_{inf} = 0.00 \text{ cm}^2$ nel raccordo, in basso.	$A_{tr} = 0.60 \text{ cm}^2/\text{m}$
$A_{inf} = 0.80 \text{ cm}^2$ nella soletta, in basso.	Verifica puntone: 0.07 ≤ 1

Staffe

Calcolo eseguito senza staffe

Arm. trasversale

$A_{tr} = 0.60 \text{ cm}^2/\text{m}$
Verifica puntone: 0.07 ≤ 1

Ricalcola con staffe

GEOMETRIA

- Spessore soletta: 6 cm
- Spessore assito/pianelle/tavelle: 2.5 cm
- Spessore isolante: 0 cm
- Interasse travi: 72 cm
- Base travi: 12 cm
- Altezza travi: 16 cm
- Luce travi: 500 cm
- Limite freccia istantanea carichi variabili: $L/500 = 10.00 \text{ mm}$
- Limite freccia attiva: $500 = 10.00 \text{ mm}$
- Limite freccia finale comb. quasi perm.: $L/250 = 20.00 \text{ mm}$

CARICHI

- Permanenti strutturali: 1.38 kN/m²
- Permanenti non strutturali
- Carico iniziale 1: 0.60 kN/m²
- Carico iniziale 2: 0.40 kN/m²
- 1° carico fragile: 0.00 kN/m²
- Carichi successivi: 0.40 kN/m²
- Totale perm. non strutturali: 1.40 kN/m²
- Variabili: 2.00 kN/m²
- Carico SLU a metro lineare: 4.76 kN/m

MATERIALI

- Legno - Tipo : D30 secondo EN338:2016
 - Resistenza a flessione caratteristica $f_{m,k}$: 30.0 N/mm²
 - k_h a flessione: 1.00
 - Resistenza a trazione caratteristica $f_{t,0,k}$: 18.0 N/mm²
 - k_h a trazione: 1.00
 - Resistenza a taglio caratteristica $f_{v,k}$: 3.90 N/mm²
 - Modulo di elasticità medio $E_{0,m}$: 11000 N/mm²
 - Peso specifico medio r_m : 6.4 kN/m³
 - Coeff. modifica azioni variabili K_{mod} : 0.80
 - Fattore di deformazione K_{def} : 0.60
 - Riduzione larghezza per verifica a taglio k_{cr} : 0.67
 - Coefficiente di sicurezza 1.50
- Classe calcestruzzo: Leca CLS 1600
 - Resistenza caratteristica cilindrica $f_{c,k}$: 31.5 N/mm²
 - Resistenza caratteristica a trazione 5% f_{ctk} : 1.8 N/mm²
 - Modulo elasticità E: 20000 N/mm²
 - Peso specifico r: 17.5 kN/m³
 - Coefficiente di viscosità F: 2.50
 - Coefficiente di sicurezza g_m : 1.50
- Connettore: Tecnaria CTL MAXI 12/ 40 posato su tavolo di 2.50 cm
 - Resistenza caratteristica connettore F_k : 14075 N
 - Rigidezza connettore in esercizio K_{ser} : 6525 N/mm
 - Rigidezza connettore ultima K_u : 3928 N/mm
 - Coefficiente di sicurezza g_{mk} : 1.50
- Altri parametri
 - Peso specifico assito/pianelle/tavelle: 6.40 kN/m³
 - Peso specifico isolante: 0.25 kN/m³
 - Coefficiente parziale carichi strutturali gG1: 1.30
 - Coefficiente parziale perm. non strut. gG2: 1.30
 - Coefficiente parziale carichi variabili gQ: 1.50
 - Coefficiente psi2 carichi quasi permanenti: 0.30

Appoggio del tavolato su trave: 2.0 cm
Resistenza di progetto armatura fyd: 391.3 N/mm²

RISULTATI

Connettori Tecnaria MAXI 12/ 40 posati su tavolato continuo

Connettori a spaziatura variabile

- ai quarti estremi della trave: 10.8 cm
- nella metà centrale della trave: 21.6 cm

Numero di connettori per trave: 37

Numero di connettori a m²: 10.28

Armatura longitudinale minima nel raccordo: 0.00 cm²/trave nella parte inferiore.

Armatura longitudinale minima nella soletta: 0.80 cm²/trave nella parte inferiore.

Armatura trasversale nella soletta: 0.60 cm²/m

VERIFICHE

Larghezza soletta collaborante: 72.0 cm

____ STATO LIMITE ULTIMO ____

- Momento massimo: 14.88 kNm
- Taglio massimo: 11.91 kN
- Verifiche a tempo zero
 - CLS - tensione max: 6.88 N/mm² <= 17.85 N/mm²
 - CLS - tensione min: -3.97 N/mm²
 - LEGNO - tensoflessione: 0.84 <= 1.00
 - LEGNO - taglio: 0.76 N/mm² <= 2.08 N/mm²
 - CONN. - taglio: 5419 N <= 7507 N
- Verifiche a tempo infinito
 - CLS - tensione max: 5.50 N/mm² <= 17.85 N/mm²
 - CLS - tensione min: -2.48 N/mm²
 - LEGNO - tensoflessione: 0.89 <= 1.00
 - LEGNO - taglio: 0.80 N/mm² <= 2.08 N/mm²
 - CONN. - taglio: 5637 N <= 7507 N

____ STATO LIMITE DI ESERCIZIO ____

- EJ a tempo zero: 2006.0 kNm²
- EJ a tempo infinito: 1093.6 kNm²
- Freccia istantanea car. var.: 5.84 mm <= 10.00 mm
- Freccia attiva: 9.99 mm <= 10.00 mm
- Freccia a tempo infinito: 18.11 mm <= 20.00 mm

Piacenza, aprile 2025

Ing. Caterina Trintinaglia