



MINISTERO DELLA DIFESA

MARINACCAD LIVORNO

SERVIZIO TECNICO INFRASTRUTTURE

LIVORNO – ACCADEMIA NAVALE - Lavori di “ripristino delle condizioni di fruibilità delle Aule Didattiche e Uffici di Palazzo Bernotti, compresi i Servizi igienici lato sud, previa bonifica M.C.A.” – Cod. ID 3518 - Cap. 7120/28 SMM – EE.FF. 2026/2027

PROGETTO ESECUTIVO



DESCRIZIONE: **RELAZIONE TECNICA GRADONATA**

DISCIPLINA: **DOCUMENTI GENERALI**

DATA: **31/03/2026**

SCALA: **----**

TAVOLA: **GEN-06**

PROGETTISTI:
T.V (INFR) Claudio BATTIATO

S.T.V. (INFR) Gianluca GIORDANO

S.T.V. (INFR) Alessio BIANCHI

1°M.Ilo ATG TUMA Rocco

RUP:
C.F. (INFR) Domenico Egidio MAGGI

Firmato Digitalmente da/Signed by:

DOMENICO EGIDIO MAGGI

In Data/On Date:

mercoledì 29 luglio 2026 17:27:12

REVISIONE	DATA	RIFERIMENTO REVISIONE
REV01	31/03/2026	PROGETTO ORIGINALE

RELAZIONE DI VERIFICA ESECUTIVA

VERIFICA STRUTTURALE DELL'IMPALCATO MAGGIORMENTE SOLLECITATO, DEI MONTANTI, DEL NODO IMBULLONATO TRA ELEMENTI DEI PIEDINI E DELLA SALDATURA TRA TRAVI HEA COSTITUENTI LA GRADONATA DELL'AULA DIDATTICA 2/VIII DI PALAZZO BERNOTTI.

Sommario

2. PREMESSA	2
3. DATI DI PROGETTO	2
4. RIFERIMENTI NORMATIVI E COMBINAZIONI DI CALCOLO	3
5. CARICHI SULLA TRAVE DELLA MAGLIA MAGGIORMENTE SOLLECITATA	3
6. PROPRIETÀ DELLA SEZIONE HEA 100 ADOTTATA	4
7. VERIFICA SLU DELLA TRAVE HEA 100	4
8. VERIFICHE SLE DELLA TRAVE HEA 100	5
9. VERIFICA DEL MONTANTE	5
10. VERIFICA PRELIMINARE DEL NODO IMBULLONATO	6
11. VERIFICA PRELIMINARE DELLA SALDATURA TRA TRAVI HEA	7
12. CONTROLLO GLOBALE DI COERENZA	7
13. CONCLUSIONI	8

1. PREMESSA

L'aula oggetto della presente relazione di calcolo è l'Aula 2/VIII, ubicata in Palazzo Bernotti. La gradonata è destinata ad accogliere un numero massimo di 100 studenti; la maglia strutturale maggiormente sollecitata presenta dimensioni pari a $1,10 \text{ m} \times 0,745 \text{ m}$ (74,5 cm), con area tributaria pari a $0,8195 \text{ m}^2$. La presente relazione sviluppa in forma organica e coerente le verifiche strutturali preliminari della gradonata didattica, assumendo come elemento di riferimento tale impalcato modulare. Le verifiche sono svolte in termini di Stati Limite Ultimi (SLU) e Stati Limite di Esercizio (SLE), con esplicitazione dei dati di progetto, dei carichi, delle ipotesi di calcolo, delle proprietà geometriche adottate e dei risultati numerici. Sono inoltre riportate una verifica preliminare del nodo imbullonato tra gli elementi dei piedini e una verifica preliminare del collegamento saldato tra travi HEA. Si evidenzia che tutte le verifiche e i dimensionamenti riportati nella presente relazione sono stati svolti sulla base delle assunzioni progettuali e del livello di definizione sviluppato. Poiché il progetto prevede la possibilità di proposte migliorative basate sull'innovazione tecnologica, in fase esecutiva, a seguito della definizione dei particolari costruttivi, delle caratteristiche dei componenti e dei sistemi costruttivi proposti dall'impresa esecutrice e approvati dalla Direzione Lavori, dovrà essere effettuato il ricalcolo della struttura e il conseguente aggiornamento delle verifiche, al fine di confermare la piena rispondenza dell'opera alle prestazioni richieste e alle normative vigenti. Ove possibile, dovranno essere privilegiati sistemi e componenti di produzione standardizzata e certificati per l'impiego previsto.

2. DATI DI PROGETTO

Sulla base degli elaborati esecutivi dell'impalcato e dei dati di progetto, per la gradonata dell'Aula 2/VIII di Palazzo Bernotti si assumono i seguenti parametri:

Parametro	Simbolo e valore
Numero massimo di studenti sulla gradonata	n.max 100 studenti
Peso convenzionale per studente	Pk 100 kg $\approx 0,981 \text{ kN}$
Aula oggetto di verifica	Aula 2/VIII – Palazzo Bernotti
Carico variabile normativo di progetto (come da NTC 2018)	qk 5,00 kN/m ²
Dimensioni della maglia più sollecitata	L $\times$ b 1,10 m $\times$ 0,745 m
Area della maglia	A 0,8195 m ²
Travi impalcato	HEA 100 in acciaio S275
Montanti / piedini	tubolare quadro 90 $\times$ 90 $\times$ 3 mm
Altezza massima montanti	h 1,20 m
Peso permanente rivestimento impalcato	gk,p 0,50 kN/m ² = 50 kg/m ²
Peso permanente banchini	gk,b 0,50 kN/m ² = 50 kg/m ²
Peso proprio trave HEA 100	gk,trave 0,164 kN/m

Il peso complessivo associato alla capienza massima di 100 studenti, assumendo un peso convenzionale di 100 kg per studente, risulta pari a:

$$Q_{\text{studenti}} = 100 \cdot 0,981 = 98,10 \text{ kN}$$

Il corrispondente carico medio reale viene valutato nel successivo controllo globale di coerenza sulla superficie minima delle maglie necessarie. Le verifiche locali sono comunque condotte con il più gravoso carico variabile normativo $q_k = 5,00 \text{ kN/m}^2$.

La verifica viene pertanto eseguita con il carico normativo $q_k = 5,00 \text{ kN/m}^2$, che governa la progettazione dell'impalcato e determina un'impostazione cautelativa.

Il carico variabile è pertanto assunto pari a 500 kg/m^2 , corrispondente a $5,00 \text{ kN/m}^2$.

Tale valore coincide con il sovraccarico verticale uniformemente distribuito q_k previsto dalle NTC 2018 per la categoria C5, relativa ad aree suscettibili di grandi affollamenti, incluse tribune e gradinate.

Le verifiche sono svolte agli stati limite ultimi e di esercizio con riferimento a una maglia strutturale elementare. Ai fini dello studio degli elementi e dei nodi si adotta lo schema statico cautelativo di trave semplicemente appoggiata.

3. RIFERIMENTI NORMATIVI E COMBINAZIONI DI CALCOLO

Le verifiche sono impostate assumendo i criteri generali delle NTC 2018 per ambienti suscettibili di affollamento / gradinate e per elementi in carpenteria metallica. Per le combinazioni di carico si assume una distinzione tra peso proprio strutturale G_1 , carichi permanenti non strutturali G_2 e carico variabile Q_k .

Combinazione fondamentale SLU:

$$E_d = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_Q \cdot Q_k$$

$$q_d = 1,30 \cdot G_1 + 1,50 \cdot G_2 + 1,50 \cdot Q_k$$

Combinazioni SLE:

$$q_{sle,rara} = G_1 + G_2 + Q_k$$

$$q_{sle,freq} = G_1 + G_2 + \psi_1 \cdot Q_k = G_1 + G_2 + 0,70 \cdot Q_k$$

$$q_{sle,qp} = G_1 + G_2 + \psi_2 \cdot Q_k = G_1 + G_2 + 0,60 \cdot Q_k$$

4. CARICHI SULLA TRAVE DELLA MAGLIA MAGGIORMENTE SOLLECITATA

Si verifica la direzione più sfavorevole, cioè la trave con luce $L = 1,10 \text{ m}$ e fascia di influenza pari a $b = 0,745 \text{ m}$. La direzione con luce pari a $0,745 \text{ m}$ risulta automaticamente più favorevole.

$$G_{1,trave} = 0,164 \text{ kN/m}$$

$$G_{2,piano} = 0,50 \cdot 0,745 = 0,3725 \text{ kN/m}$$

$$G_{2,banchini} = 0,50 \cdot 0,745 = 0,3725 \text{ kN/m}$$

$$Q_k = 5,00 \cdot 0,745 = 3,725 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,tot} = 0,164 + 0,3725 + 0,3725 = 0,909 \text{ kN/m}$$

$$q_d = 1,30 \cdot 0,164 + 1,50 \cdot 0,3725 + 1,50 \cdot 0,3725 + 1,50 \cdot 3,725 = 6,918 \text{ kN/m}$$

$$q_{sle,rara} = 0,164 + 0,3725 + 0,3725 + 3,725 = 4,634 \text{ kN/m}$$

$$q_{sle,freq} = 0,164 + 0,3725 + 0,3725 + 0,70 \cdot 3,725 = 3,517 \text{ kN/m}$$

$$q_{sle,qp} = 0,164 + 0,3725 + 0,3725 + 0,60 \cdot 3,725 = 3,144 \text{ kN/m}$$

5. PROPRIETÀ DELLA SEZIONE HEA 100 ADOTTATA

Per il profilo HEA 100 si assumono le proprietà del tipo HE 100 A (serie HE) riportate nei prospetti del produttore.

Parametro	Simbolo	Valore
Massa lineare	G	16,7 kg/m
Momento d'inerzia asse forte	I _y	349,2 cm ⁴
Modulo resistente elastico asse forte	W _{el,y}	72,75 cm ³
Acciaio di calcolo	f _y	275 MPa
Modulo elastico	E	210000 MPa

Si sceglie tale sezione per il predimensionamento perché di facile reperimento sul mercato e adatta agli scopi realizzativi, in quanto ampiamente impiegata per impalcati. I risultati ottenuti mostrano che la struttura risulta efficace; sarà tuttavia possibile ottimizzarla ulteriormente, previa presentazione di specifici calcoli a cura della Ditta esecutrice.

6. VERIFICA SLU DELLA TRAVE HEA 100

Schema statico adottato: trave semplicemente appoggiata con carico uniformemente distribuito.

Per una trave appoggiata:

$$M_{Ed} = q_d \cdot L^2 / 8$$

$$V_{Ed} = q_d \cdot L / 2$$

$$M_{Ed} = 6,918 \cdot 1,10^2 / 8 = 1,046 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 6,918 \cdot 1,10 / 2 = 3,805 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = W_{el,y} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 72,75 \cdot 10^3 \cdot 275 / 10^6 = 20,01 \text{ kNm}$$

$$\eta_M = M_{Ed} / M_{Rd} = 1,046 / 20,01 = 0,052$$

Esito SLU trave:

La verifica a flessione risulta largamente soddisfatta; il grado di utilizzazione è pari a circa il 5,2%. La verifica a taglio risulta automaticamente soddisfatta, essendo $V_{Ed} = 3,805 \text{ kN}$ molto inferiore alla capacità resistente di una HEA 100.

7. VERIFICHE SLE DELLA TRAVE HEA 100

Per la freccia massima della trave appoggiata si utilizza la relazione:

$$f_{max} = 5 \cdot q \cdot L^4 / (384 \cdot E \cdot I)$$

Sostituendo $E = 210000 \text{ MPa}$, $I = 349,2 \text{ cm}^4$ e le tre combinazioni SLE si ottengono i seguenti valori:

$$f_{rara} = 0,120 \text{ mm}$$

$$f_{freq} = 0,091 \text{ mm}$$

$$f_{qp} = 0,082 \text{ mm}$$

$$f_{lim} = L / 300 = 1100 / 300 = 3,67 \text{ mm}$$

Esito SLE trave:

Tutte le frecce risultano trascurabili rispetto al limite convenzionale $L/300$; anche la combinazione rara produce una deformazione largamente contenuta.

8. VERIFICA DEL MONTANTE

Verifica del montante $90 \times 90 \times 3 \text{ mm}$

Per il montante si considera il caso cautelativo di nodo interno, con area tributaria pari a una maglia completa $A = 0,8195 \text{ m}^2$ e altezza libera di inflessione pari a $1,20 \text{ m}$.

$$Q_{k,col} = 5,00 \cdot 0,8195 = 4,098 \text{ kN}$$

$$G_{2,col} = (0,50 + 0,50) \cdot 0,8195 = 0,8195 \text{ kN}$$

$$G_{1,col,beams} \approx 0,164 \cdot (1,10 + 0,745) = 0,303 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 1,30 \cdot 0,303 + 1,50 \cdot 0,8195 + 1,50 \cdot 4,098 = 7,769 \text{ kN}$$

Proprietà del tubolare quadro $90 \times 90 \times 3 \text{ mm}$:

$$A = 90^2 - 84^2 = 1044 \text{ mm}^2$$

$$I = (90^4 - 84^4) / 12 = 1,318 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$i = \sqrt{I/A} = 35,5 \text{ mm}$$

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} = 1044 \cdot 275 / 1000 = 287 \text{ kN}$$

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I / L^2 = 1898 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{(A \cdot f_y / N_{cr})} = 0,389$$

$$\chi \approx 0,93$$

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1} \approx 0,93 \cdot 1044 \cdot 275 / 1000 = 267 \text{ kN}$$

$$\eta_N = N_{Ed} / N_{b,Rd} = 7,769 / 267 = 0,029$$

Esito SLU montante

Il montante è ampiamente verificato sia a resistenza di sezione sia a stabilità per carico assiale centrato; il grado di utilizzazione risulta pari a circa il 2,9%.

9. VERIFICA PRELIMINARE DEL NODO IMBULLONATO

Il collegamento tra elementi dei piedini dei banchi è assunto realizzato mediante piastrina e n. 2 bulloni M12 classe 8.8. In assenza del dettaglio costruttivo definitivo si adotta una verifica cautelativa con foro normale $d_0 = 13 \text{ mm}$, spessore efficace $t = 3 \text{ mm}$, distanza dal bordo $e_1 = 30 \text{ mm}$ ed interasse $p_1 = 60 \text{ mm}$.

Si assume un'azione di progetto cautelativa sul nodo pari a 5,0 kN, superiore alla reazione vincolare di progetto $V_{Ed} = 3,805 \text{ kN}$ calcolata per la trave maggiormente sollecitata.

Verifica a taglio bulloni:

$$A_s = 84,3 \text{ mm}^2 ; f_{ub} = 800 \text{ MPa} ; \gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2}$$

$$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 800 \cdot 84,3 / 1,25 = 32,37 \text{ kN per bullone}$$

$$F_{v,Rd,tot} = 2 \cdot 32,37 = 64,74 \text{ kN}$$

$$\eta_v = 5,0 / 64,74 = 0,077$$

Verifica a rifollamento / bearing:

$$f_u = 430 \text{ MPa} ; d = 12 \text{ mm} ; t = 3 \text{ mm}$$

$$F_{b,Rd} \approx 23,8 \text{ kN per bullone}$$

$$F_{b,Rd,tot} \approx 47,6 \text{ kN}$$

$$\eta_b = 5,0 / 47,6 = 0,105$$

Esito nodo imbullonato

Il nodo imbullonato preliminare con 2 bulloni M12 classe 8.8 risulta ampiamente verificato sia a taglio sia a rifollamento.

10. VERIFICA PRELIMINARE DELLA SALDATURA TRA TRAVI HEA

Per il collegamento saldato tra elementi HEA si assume una giunzione con due cordoni d'angolo paralleli, spessore di gola efficace $a = 4 \text{ mm}$ e lunghezza utile $l = 60 \text{ mm}$ per ciascun cordone.

$$f_u = 430 \text{ MPa} ; \beta_w = 0,85 ; \gamma_{Mw} = 1,25$$

$$F_{w,Rd} = 2 \cdot a \cdot l \cdot f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \sqrt{3})$$

$$F_{w,Rd} = 2 \cdot 4 \cdot 60 \cdot 430 / (0,85 \cdot 1,25 \cdot 1,732) = 112,3 \text{ kN}$$

$$\eta_w = 5,0 / 112,3 = 0,045$$

Esito saldatura.

La saldatura tra travi HEA risulta ampiamente verificata rispetto alle azioni di progetto considerate.

11. CONTROLLO GLOBALE DI COERENZA

Numero minimo di maglie richiesto = $100 / 3 = 33,33$, assunto pari a 34 maglie

$$\text{Area totale corrispondente} = 34 \cdot 0,8195 = 27,86 \text{ m}^2$$

$$\text{Peso totale studenti} = 100 \cdot 100 = 10000 \text{ kg} = 98,10 \text{ kN}$$

$$\text{Carico medio reale sulla superficie minima delle maglie} = 98,10 / 27,86 = 3,52 \text{ kN/m}^2$$

Il progetto viene verificato con $5,00 \text{ kN/m}^2$, cioè con un valore superiore di circa il 42% rispetto al carico medio reale stimato sulle sole maglie occupate, confermando il carattere cautelativo della verifica.

Prescrizioni esecutive

I bulloni dovranno essere conformi alla classe 8.8, con serraggio controllato. Le saldature dovranno essere eseguite in officina da personale qualificato. Il peso reale della stratigrafia di impalcato e dei

banchini dovrà essere confermato in fase esecutiva finale. Gli ancoraggi alla struttura di supporto e la verifica del solaio esistente restano esclusi dal presente elaborato e dovranno essere verificati separatamente.

12. CONCLUSIONI

Sulla base dei dati di progetto oggi disponibili, la gradonata didattica dell'Aula 2/VIII di Palazzo Bernotti, dimensionata per un massimo di 100 studenti e costituita da maglie strutturali $1,10 \times 0,745$ m, travi HEA 100 e montanti $90 \times 90 \times 3$ mm, risulta ampiamente verificata agli stati limite ultimi e agli stati limite di esercizio per il carico di progetto pari a $5,00 \text{ kN/m}^2$, includendo il contributo permanente dei banchini pari a 50 kg/m^2 .

Le travi presentano un grado di utilizzazione a flessione di circa il 5,2% e deformazioni estremamente contenute; i montanti risultano verificati con un grado di utilizzazione assiale di circa il 2,9%. Il nodo imbullonato e la saldatura tra travi HEA risultano a loro volta ampiamente verificati, con azione cautelativa assunta pari a 5,0 kN.