

**TRAVI RETICOLARI SPAZIALI DI ACCIAIO INNOVATIVE
PER LA TUTELA DEI SITI ARCHEOLOGICI:
MODELLAZIONE FEM ED ABACHI DI PROGETTO**

**INNOVATIVE STEEL 3D TRUSSES FOR PRESERVATION OF
ARCHAEOLOGICAL SITES: FEM MODELING AND DESIGN
CHARTS**

Gianmaria Di Lorenzo, Giusy Terracciano, Antonio Formisano, Raffaele Landolfo
University of Naples Federico II
Department of Structures for Engineering and Architecture
Naples, Italy
gianmaria.dilorenzo@unina.it, giusy.terracciano@unina.it, antoform@unina.it
landolfo@unina.it

ABSTRACT

Three-dimensional lattice beams represent a highly efficient typological solution in covering large spans, especially in case of members not provided with intermediate lateral restraints against bending-torsion instability phenomena. Being already widely applied in both civil and industrial engineering fields, space lattice beams are investigated in the present study with the aim to be used, in combination with a structural glass slab, as roof decks for protection of monumental assets and archaeological sites. Following a brief description of both the structural system and the design criterion, the procedure applied for deriving Design Charts, to be used as design tools for member sizing of the proposed system, is presented. Models and algorithms used for the creation of such design charts are described as well as their experimentally and numerically validation. Finally, an application example to a case study is also provided.

SOMMARIO

Le travi reticolari spaziali costituiscono una soluzione tipologica estremamente efficiente per coprire grandi luci, soprattutto nei casi in cui le membrature non presentino ritegni laterali intermedi, atti ad impedire fenomeni d'instabilità flesso-torsionale. Diffusamente utilizzate nei più svariati settori dell'ingegneria civile ed industriale, nel presente studio è stata valutata la possibilità di impiegarle, in combinazione con il vetro strutturale, per realizzare impalcati di copertura a protezione di beni monumentali e siti archeologici. Descritto brevemente il sistema costruttivo ed il criterio di progetto utilizzato in fase di dimensionamento, nel presente lavoro l'attenzione è rivol-

ta alla procedura per la costruzione degli abachi di progetto (Design Charts) utilizzabili come strumenti per il dimensionamento delle membrature del sistema oggetto di studio (Design Tools). Accanto ai modelli e agli algoritmi utilizzati per la costruzione degli abachi e alla loro validazione, di tipo numerico sperimentale, a scopo esemplificativo è inoltre riportata l'applicazione ad un caso studio.

1 INTRODUZIONE

Le travi reticolari spaziali sono elementi a prevalente sviluppo monodimensionale che appartengono alla più grande famiglia delle strutture spaziali [1], contraddistinte tipicamente da un comportamento tridimensionale (comportamento spaziale) e da regimi primari di sollecitazione di tipo assiale (comportamento reticolare). Le travi reticolari spaziali propriamente dette sono costituite dalla ripetizione di moduli tetraedrici e/o emiottaedrici realizzati con aste metalliche, generalmente tubolari, mutuamente collegate tra loro per via diretta, mediante saldatura, o attraverso interposti nodi che ne caratterizzano il sistema costruttivo. L'elevata rigidità torsionale, unitamente a quella flessionale, soprattutto fuori piano, rendono conveniente la soluzione spaziale rispetto a quella piana in tutti i casi in cui sia richiesta autoportanza in fase di costruzione e/o non siano presenti nel sistema ritegni laterali intermedi atti ad impedire fenomeni di instabilità flessio-torsionali [2]. Le prime applicazioni di strutture reticolari spaziale prefabbricate risalgono agli inizi del 900' ad opera di Alexander Graham Bell per la realizzazione di alianti e strutture alari. Le potenzialità di questo sistema costruttivo furono riconosciute anche per altri impieghi solo dopo alcuni decenni, quando fu possibile realizzare sistemi di connessione affidabili che coniugassero elevate prestazioni strutturali alla semplicità di posa in opera [3]. I numerosi brevetti depositati a partire dal primo o secondo dopoguerra, soprattutto nel settore delle costruzioni, testimoniano i diversi tentativi di sperimentazione di edilizia industrializzata [4]. Gli anni 70 rappresentano la "golden age" delle strutture reticolari spaziali prefabbricate che oggi stanno ritrovando un nuovo impulso per la realizzazione di costruzioni a geometria complessa, "ricercata" o "libera", in acciaio o lega d'alluminio [5], utilizzate in ambito civile per la realizzazione di grandi coperture e torri a traliccio [6] o in ambito industriale nei più svariati settori che vanno dall'automotive, agli apparecchi di sollevamento, ai grossi impianti offshore, etc.

Nel presente lavoro è valutata la possibilità di utilizzare travi reticolari spaziali, in combinazione con il vetro strutturale, per realizzare impalcati di copertura da utilizzare per proteggere beni monumentali e siti archeologici [7]. In particolare la memoria contiene la descrizione degli studi condotti per la costruzione degli abachi di progetto utilizzabili come strumenti per il dimensionamento delle membrature di travi reticolari spaziali di acciaio innovative. Gli studi descritti sono parte di attività svolte nell'ambito di un progetto di ricerca finalizzato allo sviluppo ed industrializzazione di sistemi innovativi di travi di acciaio in composizione saldata per solai e coperture leggere, per applicazioni in edifici monumentali e siti archeologici, nell'ambito dei quali sono stati condotti studi di ottimizzazione numerica e sperimentale [8], [9], [10]. L'utilizzo del vetro strutturale come solaio di copertura ha richiesto, infatti, la definizione di una adeguata metodologia di progetto, basata sul controllo di capacità, volta ad evitare l'insorgere di prematuri meccanismi di collasso fragili ovvero a favorire una rottura duttile delle travi in oggetto in presenza di azioni verticali di natura eccezionale. Le indagini sperimentali su prototipi in scala reale sono stati il presupposto indispensabile per la caratterizzazione del comportamento strutturale dei prototipi oggetto di studio, per la complessità dei fenomeni che generalmente caratterizzano la risposta dei sistemi reticolari spaziali che rendono estremamente difficile l'applicazione diretta di tradizionali modelli e metodi analitici per la progettazione strutturale [11], che devono essere opportunamente validati e calibrati per via sperimentale, tenendo conto del loro comportamento tridimensionale.

Nel seguito, dopo una breve descrizione del sistema costruttivo, l'attenzione è rivolta alla procedura adottata per la costruzione degli abachi di progetto (Design charts), strumenti utilizzabili sia

per il dimensionamento (Design Tools) delle membrature del sistema oggetto di studio, sia per una valutazione speditiva delle prestazioni strutturali.

2 CENNI SUL SISTEMA COSTRUTTIVO

La protezione dei siti archeologici e l'eventuale loro musealizzazione, soprattutto nel caso di insediamenti extraurbani, può avvenire con organismi strutturali che tendono a coprire (tettoie) o ad involuppare (esoscheletri integrali) i manufatti da proteggere. I principali requisiti che devono possedere questi sistemi strutturali sono la leggerezza, volta a minimizzare gli scarichi in fondazione, unitamente alla possibilità di coprire ampi spazi con limitati supporti intermedi per consentire una adeguata fruizione dei beni. Ad essi si aggiungono la flessibilità, la bassa manutenzione e la semplicità di montaggio e decostruzione, nonché la possibilità di riuso in altri contesti. Una valida alternativa al legno strutturale, ampiamente utilizzato per la protezione dei beni culturali, è fornita dall'acciaio basso legato con resistenza migliorata alla corrosione atmosferica (weathering steel) che, grazie alla sua particolare colorazione brunastra, bene si integra nel contesto, offrendo al contempo una elevata durabilità. Nel presente studio è proposto l'utilizzo di travi reticolari spaziali in acciaio S355J2W (designazione numerica 1.8965), in combinazione con il vetro strutturale stratificato, per la realizzazione di impalcati di copertura da utilizzare per la protezione dei siti archeologici (Fig. 1). La soluzione reticolare spaziale è giustificata dalla necessità di coprire luci significative senza supporti intermedi con membrature dotate di elevata stabilità laterale, requisito richiesto dall'assenza di un ulteriore ordine di elementi (travi secondarie o terziari) e/o di un sistema di controventamento orizzontale.

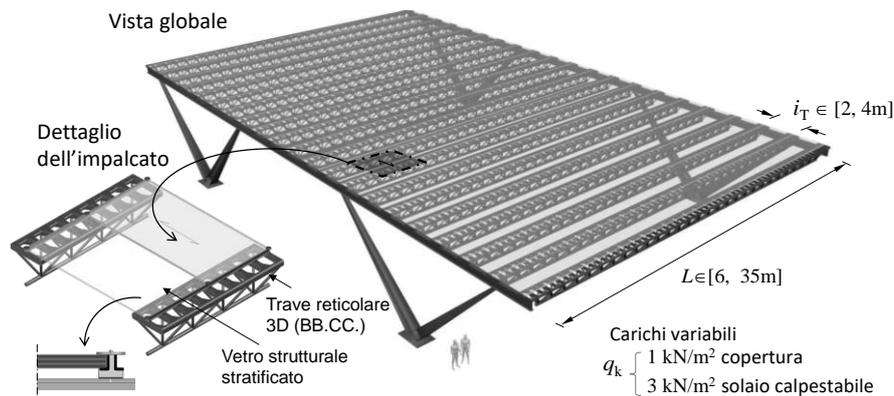


Fig. 1. Travi BB.CC.: sistema costruttivo

Le travi, nel seguito denominate per il tipo di applicazione BB.CC. (acronimo di “Beni Culturali”), sebbene ottenute dalla lavorazione di profili standard, sono caratterizzate da un corrente superiore innovativo che si presenta come profilo alveolare tubolare (Cellular Hollow Sections, C-HS) ottenuto dal taglio di profili RHS e successiva saldatura delle due semi-parti opportunamente sfalsate. Per coprire luci variabili dai 6 ai 30 m ed oltre è stato necessario differenziare l'altezza delle membrature individuando tre famiglie di prodotti caratterizzate rispettivamente da una altezza H pari a 600 mm (travi “basse”), 900 mm (travi “medie”), 1200 mm (travi “alte”).

Definito il tipo di acciaio (S355J2W) è stato possibile, nell'ambito della stessa famiglia di prodotti, modulare le prestazioni delle membrature (serie leggera, media e pesante) modificando la dimensione degli elementi componenti, definiti con una procedura a controllo di capacità [8] in fun-

zione dello spessore t del profilo RHS utilizzato per realizzare il corrente superiore. Ne consegue che il generico prodotto è identificato in modo univoco dalla sigla "BB.CC._ H x t " (Fig. 2).

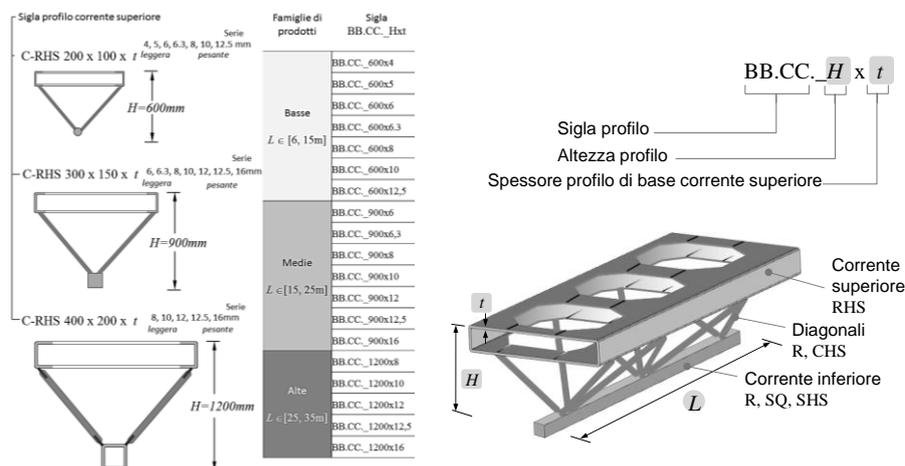


Fig. 2. Travi BB.CC.: famiglie di prodotti

3 ANALISI PARAMETRICHE E VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI STRUTTURALI DELLE TRAVI BB.CC.

La costruzione degli abachi è avvenuta attraverso analisi parametriche lineari finalizzate alla valutazione delle prestazioni delle travi BB. CC., identificate dall'altezza (H) e dallo spessore del corrente superiore (t) come mostrato in Fig. 2, al variare del numero di moduli (n_x) ovvero della lunghezza di progetto delle travi (L_d). In Tabella 1 sono riportati il numero di moduli considerati per ciascuna configurazione esaminata e la conseguente luce di progetto della stessa. Le analisi sono state condotte tenendo conto che le membrature sono realizzate in acciaio S355J2 (1.0577) o S355J2W (1.8965). Il progetto delle travi BB.CC. è stato eseguito a controllo di capacità al fine di evitare l'insorgere di prematuri meccanismi di collasso fragili ovvero a favorire una rottura duttile delle travi in presenza di azioni verticali di natura eccezionale. Nel caso specifico sono considerati duttili i meccanismi prodotti dalla plasticizzazione per trazione del corrente inferiore, fragili quelli, ad esempio, ascrivibili alla crisi per instabilità delle aste di estremità (rottura per taglio globale) o alla crisi per instabilità del corrente compresso che, in assenza di ritegni torsionali, può innescare fenomeni di instabilità flessio-torsionale dell'intero traliccio, compromettendo inoltre l'integrità del solaio in vetro strutturale direttamente poggiato su di esso.

Tabella 1. Analisi parametriche: definizione dei casi

Travi basse ($H=600\text{mm}$)			Travi medie ($H=900\text{mm}$)			Travi alte ($H=1200\text{mm}$)		
Id.trave	n_x	L_d [m]	Id.trave	n_x	L_d [m]	Id.trave	n_x	L_d [m]
BB.CC._600x4			BB.CC._900x6			BB.CC._1200x8		
BB.CC._600x5			BB.CC._900x6.3			BB.CC._1200x10		
BB.CC._600x6			BB.CC._900x8			BB.CC._1200x12		
BB.CC._600x6.3	10÷25	6÷15	BB.CC._900x10	6÷28	15÷25	BB.CC._1200x12.5	5÷29	25÷35
BB.CC._600x8			BB.CC._900x12			BB.CC._1200x16		
BB.CC._600x10			BB.CC._900x12.5					
BB.CC._600x12.5			BB.CC._900x16					

La valutazione delle caratteristiche strutturali utilizzate per la costruzione degli abachi di progetto hanno riguardato sia gli Stati Limite Ultimi (SLU), legati alla capacità portante delle travi, sia gli Stati Limite di Esercizio (SLE), connessi al corretto funzionamento delle stesse.

Con riferimento agli SLU, a valle delle indagini sperimentali condotte su prototipi in scala reale si è deciso di escludere le prestazioni valutate, in caso di instabilità flessione-torsionale, con il metodo generale (§ 6.3.4 UNI EN 1993-1-1:2014) [11] non ritenuto adatto ai sistemi oggetti di studio. Inoltre, occorre considerare che, nel caso di tralicci lunghi i possibili fenomeni d'instabilità globale possono essere facilmente neutralizzati inserendo nel sistema elementi rompitratta realizzati con gli stessi profili alveolari tubolari utilizzati per la realizzazione del corrente superiore delle travi BB.CC.. Le prestazioni nei riguardi degli SLE sono state valutate considerando i limiti normativi fissati per gli spostamenti verticali, differenziati a seconda della destinazione d'uso: copertura o solaio praticabile.

Il dimensionamento e/o la valutazione delle caratteristiche strutturali per carichi gravitazionali delle travi BB. CC. può avvenire confrontando, per ciascun stato limite considerato, la domanda in termini di carico trasmesso ($F_{Ed,SL}$) con la capacità (F_{Rd}) ottenuta per via parametrica con analisi FEM lineari. Con riferimento al sistema strutturale appoggiato su una coppia di cavalletti ad interasse costante i_{Ts} , per un semplice ordito di travi BB. CC. la valutazione della domanda può avvenire applicando il metodo delle strisce di influenza.

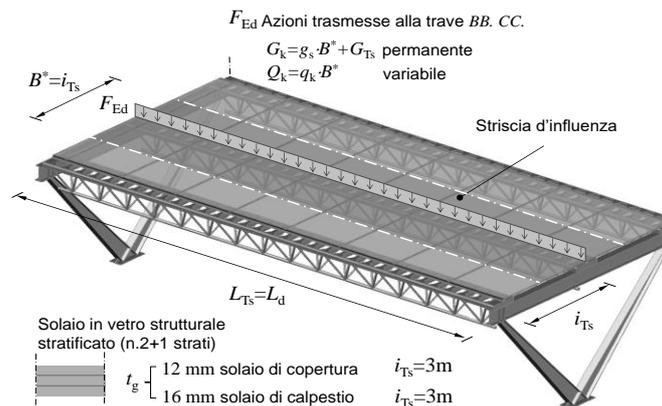


Fig. 3. Valutazione della domanda in termini di carico trasmesso alle travi BB.CC.

Il solaio, realizzato in vetro strutturale stratificato, poggia direttamente su guide parallele poste in asse alle travi per evitare di trasmettere azioni torsionali. Le azioni trasmesse, schematizzate come carichi lineari uniformemente distribuiti (G_k e Q_k), unitamente al peso proprio della trave (G_{Ts}), andranno opportunamente fattorizzate per ottenere i carichi di progetto (F_{Ed}).

Per la generica trave BB. CC. H_{xt} la valutazione della capacità F_{Rd} è invece ottenuta, per ciascuno stato limite descritto in precedenza, elaborando in ambiente Excel i risultati ottenuti dalle analisi parametriche lineari (Fig. 4) in funzione della luce (L_d).

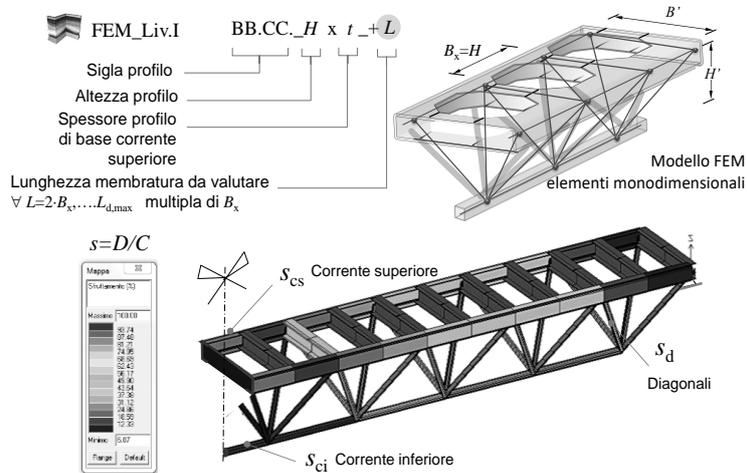


Fig. 4. Valutazione della capacità delle travi BB.CC.

4 ABACHI DI PROGETTO

Definite le prestazioni strutturali delle travi reticolari spaziali, gli abachi di progetto sono ottenuti rappresentando nel piano cartesiano al variare della luce (ascisse $L_d = n_x \cdot B_x$) le capacità portanti (ordinate F_{Rd}) delle singole membrature suddivise per famiglie: travi basse ($H=600$ mm), travi medie ($H=900$ mm) ed alte ($H=1200$ mm). Nell'ambito della generica famiglia sono presenti nel nomogramma più curve, ciascuna delle quali è rappresentativa delle prestazioni del generico prodotto identificato univocamente, oltre che dall'altezza, dallo spessore (t) del profilo tubolare utilizzato per realizzare il corrente superiore. Come mostrato in Fig. 5, il nomogramma può essere utilizzato sia per la valutazione delle prestazioni sia per il dimensionamento delle membrature. Nel primo caso, fissata la curva, si definisce la capacità portante in funzione della lunghezza della membratura. Nel secondo caso noto il carico di progetto e la luce (punto di funzionamento), si individua la curva e quindi il prodotto più prossimo per eccesso al punto considerato.

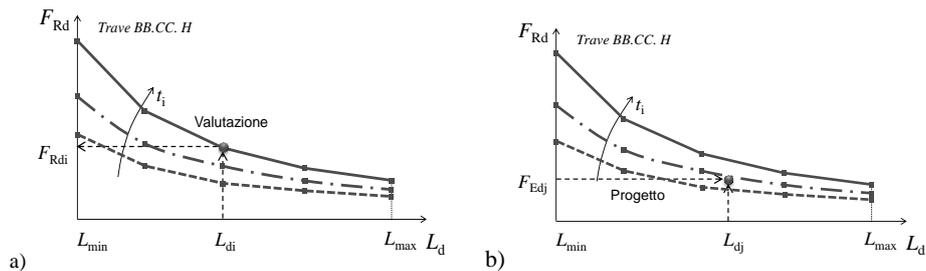


Fig. 5. Descrizione dell'uso del nomogramma: a) valutazione delle prestazioni, b) progetto

A titolo esemplificativo nella figura che segue (Fig. 6) sono riportati gli abachi di progetto allo SLU e allo SLE per le tre famiglie travi BB.CC., relativi al caso di impalcato di semplice copertura. La procedura grafica speditiva proposta è stata, infine, validata mediante i risultati delle indagini sperimentali eseguite sui prototipi di trave in scala reale [9].

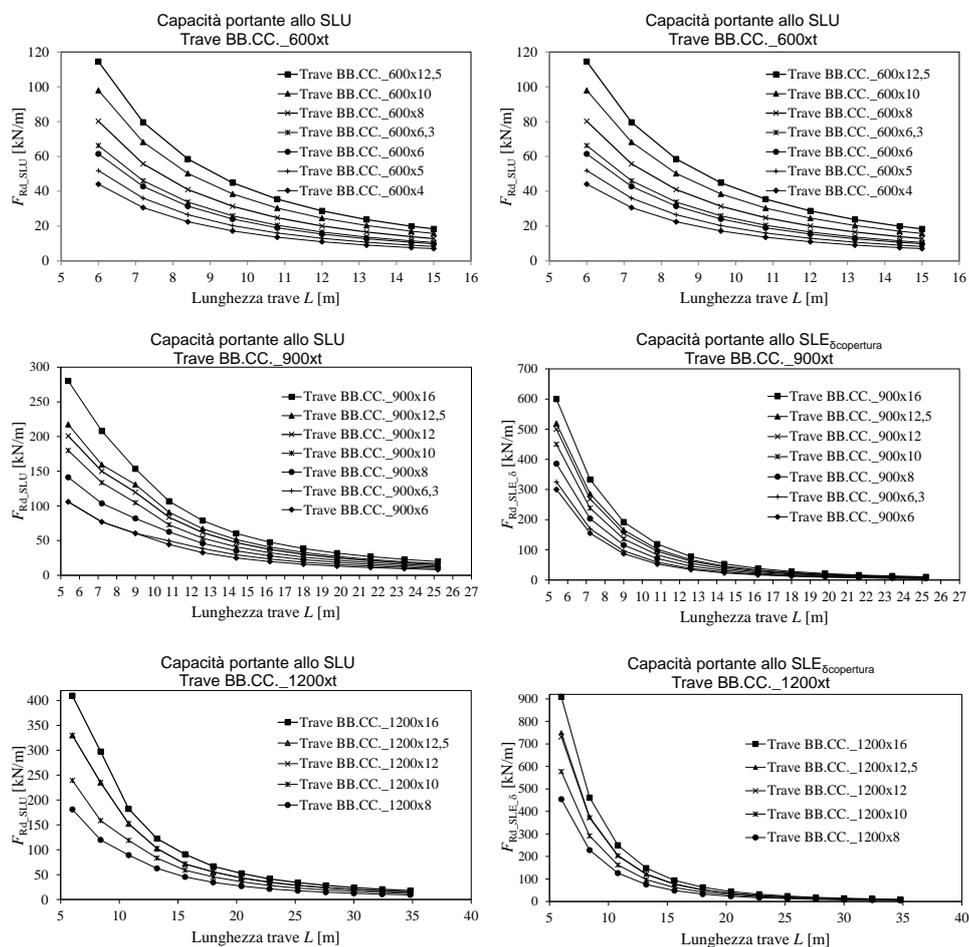


Fig. 6. Abachi di progetto allo SLU e allo SLE relativi al caso di solaio di copertura

5 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata indagata la possibilità di utilizzare travi reticolari spaziali in acciaio con resistenza migliorata alla corrosione atmosferica S355J2W, in combinazione con il vetro strutturale, per realizzare impalcati di copertura per la protezione di beni monumentali e siti archeologici. Gli studi descritti sono parte di attività svolte nell'ambito di un progetto di ricerca finalizzato allo sviluppo ed industrializzazione di sistemi innovativi di travi di acciaio in composizione saldata per solai e coperture leggere, per applicazioni in edifici monumentali e siti archeologici, nel corso del quale sono stati condotti studi di ottimizzazione numerica e sperimentale. La presente memoria fornisce una descrizione delle attività svolte nelle ultime fasi del progetto dedicate allo sviluppo di abachi di progetto come strumenti speditivi per la progettazione dei sistemi innovativi oggetti di studio. Occorre infine osservare che il criterio di progetto, a controllo di ca-

pacità e le procedure proposte per la valutazione delle prestazioni utilizzate per la costruzione degli abachi di dimensionamento sono state validate attraverso una vasta campagna di indagini sperimentali condotta su prototipi di trave in scala reale.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano Sideredil S.a.s., per il supporto tecnico offerto per lo svolgimento delle attività di progettazione e prototipazione delle travi oggetto di studio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Chlinton J., "Space grid structures", Architectural Press, Oxford, 1999
- [2] Schodek D. and Bechthold M., "Structures" Seventh Edition, Pearson Education, Harlow (U.K.), 2014
- [3] Makowski Z.S., "Steel space structures" (1st ed. in English), Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1964
- [4] Landolfo R., Di Lorenzo G., Iuorio O. e Terracciano M.T., "Prestazioni e potenzialità strutturali del mattone MPN: il mattone d'acciaio tra passato e futuro", Atti del XIII Congresso C.T.A. XXIII Le Giornate Italiane della Costruzione in Acciaio, Ischia 9-12 Ottobre, 2011
- [5] Formisano A., De Matteis G., Mazzolani F.M., "Experimental and numerical researches on aluminium alloy systems for structural applications in civil engineering fields", Key Engineering Materials, Vol. 710, pp. 256-261, 2016.
- [6] Mazzolani F.M., "The New Space Structure of Malpensa 2000: Test and Design", IASS Symposium - Spatial Structures: Heritage, Present and Future, Vol.1, pp. 707-714, Milan, 5-9 June 1995
- [7] Aslan Z., "Protective structures for the conservation and preservation of archeological sites", Journal of Conservation and Museum Studies, Vol.3, pp.16-20, 1997
- [8] Di Lorenzo G., Babilio E., Formisano A., Landolfo R. "Criteri di progetto a controllo di capacità per travi reticolari spaziali soggette a carichi verticali: un caso studio per la conservazione dei siti archeologici" Atti del XXVI Congresso C.T.A. Le Giornate Italiane della Costruzione in Acciaio, Venezia 28-30 Settembre, 2017
- [9] Di Lorenzo G., Babilio E., Formisano A., Landolfo R. "Travi reticolari spaziali di acciaio innovative per la tutela dei siti archeologici: indagini sperimentali", Atti del XXVII Congresso C.T.A. XXII Le Giornate Italiane della Costruzione in Acciaio, Bologna 3-5 Ottobre, 2019
- [10] Di Lorenzo G., Babilio E., Formisano A., Landolfo R. "Innovative steel 3D trusses for preserving archaeological sites: Design and preliminary results", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 154, pp. 250-262, 2019.
- [11] UNI EN 1993-1-1, "Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings", European Committee for Standardization, Bruxelles, 2014

PAROLE CHIAVE

Travi reticolari spaziali, beni monumentali, siti archeologici, analisi numeriche, metodi semplificati, abachi di progetto, strumenti per la progettazione.