

QUALIFICAZIONE E PROGETTAZIONE DELLE TRAVI PREFABBRICATE RETICOLARI MISTE

LIVIO IZZO E MARCO MIGLIOLI
Assoprem (Associazione Nazionale Produttori
Travi Reticolari Miste)
FAUSTO MINELLI E GIOVANNI PLIZZARI
Università di Brescia

SUMMARY

Recent ministerial qualification-procedures have classified PREM beams (truss beams completed with in situ concrete) into three categories. Since the classification of single cases as to belong to each category is not easy, this work tries to draw a sort of check list of the concerned matters.

Besides, for category "c", being these beams into the general category of hybrid structures, Assoprem and CIS-E have drawn up Recommendations on design, production and control of PREM beams that can be a very reference document for the professional engineers and construction companies.

1. INTRODUZIONE

Il percorso verso un Documento Tecnico di riferimento per le Travi Prefabbricate Reticolari Miste (PREM), iniziato dal Gruppo di Lavoro Assoprem (Associazione Nazionale Produttori Travi PREM) – CIS-E (Consorzio per le Costruzioni dell'Ingegneria Strutturale in Europa) nel 2006, si è concretizzato con la stesura della prima versione delle *Raccomandazioni per la progettazione e l'esecuzione di travi prefabbricate reticolari miste* approvata dall'apposito Gruppo di Lavoro (GdL) alla fine del 2009. Nel Gruppo di Lavoro hanno partecipato attivamente diverse associazioni culturali e di categoria, istituti di certificazione, rappresentanti dei soci Assoprem e docenti provenienti dalle Università di Bergamo, Bologna, Brescia, Calabria, Ferrara, Firenze, Messina, Palermo, Reggio Calabria, Salento e Trieste e dal Politecnico di Milano e di Torino; complessivamente hanno partecipato più di 40 figure Professionali o Accademiche.

In questi anni è entrata anche definitivamente in vigore la nuova Normativa Tecnica per le Costruzioni (NTC) [1] che, al punto 4.6, fa riferimento alla possibilità di utilizzo delle "travi

tralicciate in acciaio conglobate nel getto di calcestruzzo collaborante", subordinata all'autorizzazione del Servizio Tecnico Centrale su parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLPP). A tal fine il CSLLPP ha nominato una Commissione per la stesura delle specifiche procedure per il rilascio dell'autorizzazione all'impiego di tali manufatti, approvate poi dal CSLLPP stesso nel settembre 2009 [2]. Tali Procedure sono in attesa di pubblicazione ma, data la loro rilevanza nella qualificazione di tali travi, il mondo tecnico e scientifico sta già preparandosi alla loro applicazione ed individuandone gli aspetti da approfondire.

In questa memoria si vuole analizzare la concreta applicazione delle Procedure Ministeriali, già prevedendo l'esigenza di successivi chiarimenti ufficiali in proposito. Nella seconda parte si mettono in evidenza le peculiarità delle Raccomandazioni Assoprem – CIS-E che renderanno questo documento un utile riferimento tecnico per la progettazione e l'esecuzione di travi PREM.

E' bene innanzitutto premettere che l'acronimo PREM sta per Prefabbricata Reticolare Mista, cioè un nome generico per questo genere di travi, a prescindere dalla loro morfologia, tipologia, categoria strutturale e marchio commerciale. Tale acronimo è stato coniato per necessità di comunicazione libera ed efficace all'interno del Gruppo di Lavoro Nazionale Assoprem – CIS-E ed è stato proposto alla comunità tecnica nel Congresso del CTE di Parma del 2006 [3]; chiunque è libero di utilizzare il nome PREM perché esso non è stato volutamente registrato.

Le travi PREM possono essere identificate in base all'appartenenza ad una determinata categoria strutturale, come illustrato nel paragrafo successivo e, all'interno di ciascuna categoria, dalla presenza o meno di un fondello prefabbricato (Figura 1), che può essere realizzato in acciaio (Figura 2) o in c.a. (Figura 3).



Figura 1. Trave PREM senza fondello.



Figura 2. Trave PREM con fondello in acciaio.

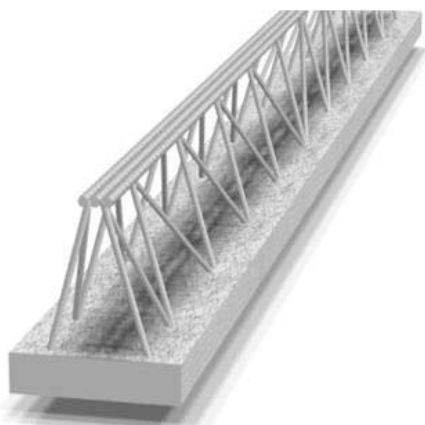


Figura 3. Trave PREM con fondello in calcestruzzo.

2. LE PROCEDURE MINISTERIALI

Le Procedure Ministeriali, in maniera assolutamente indipendente dalla tipologia del fondello del traliccio, individuano tre categorie strutturali che possono rappresentare il comportamento delle travi PREM. In particolare, rifacendosi a quanto già consolidato nella normativa e nella letteratura internazionale, le tre categorie sono le seguenti:

- a) strutture composte acciaio-calcestruzzo;
- b) strutture in c.a. ordinario o c.a.p.;
- c) strutture non riconducibili ai principi, alle definizioni, ai modelli di calcolo e ai materiali delle due categorie sopra elencate.

Tutte le predette categorie sono caratterizzate da due fasi costruttive: una prima fase (quella del getto in opera, in autoportanza totale o parziale) in cui è resistente la parte in acciaio della trave e una seconda fase in cui il calcestruzzo di completamento è indurito e partecipa alla resistenza della trave.

Le tre categorie previste dal Ministero sono descritte nel seguito.

2.1. Categoria a)

In particolare, le Travi PREM possono rientrare nella Categoria a) quando il sistema resistente le assimila ad una trave in acciaio resa collaborante con una soletta in c.a. mediante un sistema di connessione appropriatamente dimensionato. Infatti, l'appartenenza alle strutture composte è caratterizzata dalla presenza di connessioni a taglio in grado di impedire lo scorrimento e il distacco tra i due materiali (calcestruzzo e acciaio); ciò con riferimento sia alle NTC 2008, sia all'Eurocodice 4 "Strutture Composte" [4].

L'appartenenza a tale categoria è condizionata all'impiego di solo acciaio da carpenteria (piatti, profilati, tondi ecc.) per la parte che assicura la portanza in prima fase (normalmente prefabbricata) e per i dispositivi di connessione. Il modello di calcolo adottato, in particolare per le verifiche a taglio, deve essere coerente con i modelli previsti nelle NTC e nei relativi Eurocodici. Di conseguenza, poiché si fa riferimento alle strutture composte acciaio-calcestruzzo:

- la resistenza a taglio dovrà essere garantita di regola dalla sola parte in carpenteria metallica (l'EC4 [4] ammette la possibilità di considerare, con modelli consolidati, il contributo parallelo della sola parte in c.a. alla resistenza totale a taglio);
- il sistema di connessione deve conformarsi, per morfologia e criteri di progetto, a quanto previsto dalle NTC o dall'EC4 [4].

Le travi appartenenti a questa categoria, ai fini della loro Identificazione, qualificazione ed accettazione, rientrano nel caso B) del Par. 11.1 delle NTC.

2.2. Categoria b)

Le travi appartenenti alla Categoria b) sono costituite da un traliccio metallico, realizzato con tondi di acciaio per c.a., comprensive di un eventuale fondello prefabbricato in c.a.. Può anche essere presente una parte in acciaio per carpenteria destinata a sostenere i carichi di prima fase (autoportanza) che non sarà però considerata nei modelli resistenti della trave in seconda fase: questi ultimi dovranno comprendere solo l'acciaio da c.a./c.a.p., secondo gli specifici modelli previsti dalle NTC [1] e devono essere verificati per i carichi complessivi, comprensivi pertanto anche dell'aliquota dei pesi propri inizialmente affidata alla parte in acciaio da carpenteria.

Tale manufatto andrà dunque a costituire in opera, a consolidamento avvenuto del getto di calcestruzzo armato integrativo di completamento,

una trave in c.a. o c.a.p. a tutti gli effetti e segue pertanto integralmente e unicamente, per le verifiche in seconda fase, le regole previste per tali elementi strutturali.

Le travi appartenenti a questa categoria, ai fini della loro identificazione, qualificazione ed accettazione, rientrano nel caso A) del par. 11.1 delle NTC se hanno un fondello prefabbricato in calcestruzzo e nel caso B) se non lo hanno, come precisato al par. 3.2 seguente.

2.3. Categoria c)

La Categoria c) comprende quelle tipologie di trave che per principi, modelli di calcolo e materiali non possono essere ricomprese nelle prime due.

Le travi che rientrano in tale categoria sono da considerarsi come strutture ibride e rappresentano un'innovazione nel campo dell'ingegneria strutturale, per le quali le NTC [1] e gli Eurocodici non hanno ancora previsto specifiche regole di progettazione.

Per la Categoria c) le Procedure Ministeriali richiedono che venga documentata l'esistenza di margini di sicurezza, funzionalità, durabilità e robustezza non inferiori a quelli previsti dalle NTC. A tal fine è necessario effettuare una adeguata sperimentazione su campioni e su modelli, sia relativamente alla prima fase sia alla seconda fase, riguardante le condizioni di esercizio ed ultime, con riferimento anche ai principi della progettazione assistita da prove (EN 1990 Appendice D [5]). La sperimentazione deve costituire il supporto alla definizione di modelli di calcolo attendibili.

Le travi appartenenti a questa categoria, ai fini della loro identificazione, qualificazione ed accettazione, rientrano nel caso C) del par. 11.1 delle NTC.

3. ANALISI CRITICA DELLE TRE CATEGORIE

La predetta classificazione, basata su criteri omogenei di calcolo, crea un primo principale spartiacque per quanto riguarda la progettazione e le procedure di qualificazione delle Travi PREM. Le prime due categorie, infatti, in accordo con le Procedure, essendo espressamente disciplinate dalle norme per strutture in c.a./c.a.p. (Categoria b), oppure per strutture composte acciaio-calcestruzzo (Categoria a), seguono le regole previste per la rispettiva tipologia strutturale e non rientrano nell'ambito di applicazione del punto 4.6 delle NTC, al contrario delle travi della Categoria c) che dovranno necessariamente

osservare le specifiche procedure per il rilascio dell'autorizzazione all'impiego.

3.1. Categoria a)

Le modalità di progettazione, produzione e qualificazione delle travi PREM di Categoria a) sono riportate nel presente paragrafo.

Le travi di Categoria a) sono generalmente costituite da un traliccio metallico, realizzato con barre, tonde o quadre, e/o profili angolari o cavi, in cui gli elementi componenti sono resi strutturalmente continui mediante saldatura. Queste travi possono essere dotate di un fondello prefabbricato in acciaio, saldato inferiormente al traliccio e costituente parte integrante dello stesso; tale manufatto dovrà costituire in opera, ad avvenuto indurimento del getto di calcestruzzo di completamento, una trave composta acciaio-calcestruzzo a tutti gli effetti e deve seguire pertanto integralmente e unicamente le regole previste per tali elementi strutturali. Le principali implicazioni di questa classificazione sono elencate nel seguito

Con riferimento al comportamento a taglio, il calcestruzzo non deve prendere parte al modello taglio-resistente, per cui occorre immaginare la trave come se il calcestruzzo sotto l'asse neutro non esistesse. Ciò significa che il traliccio in acciaio deve essere dimensionato per assorbire integralmente, con il meccanismo puntone tirante, tutto il taglio che passa dal corrente teso a quello compresso. Naturalmente si possono anche avere, in questa categoria, delle parti in cemento armato rese solidali al traliccio mediante connettori, secondo la definizione riportata al par. 4.3 delle NTC, purché siano presenti opportune gabbie di armatura giustapposte al traliccio e connesse a questo mediante connettori normalizzati, come rappresentato nella Figura 4, tratta dall'EC4 [4]. Un aspetto meritevole di considerazione riguarda la possibilità di considerare il calcestruzzo come vincolo per il puntone compresso. Sembra ragionevole pensarlo, ma va tenuto sotto controllo con opportuni algoritmi o presidi; infatti se gli elementi d'anima, ad esempio, sono dei quadri del 60 alti 200 cm e la nervatura di calcestruzzo è larga 30 cm ed è collocata tutta sotto il solaio, sicuramente tale vincolo non è garantito dal solo calcestruzzo.

Per quanto riguarda la necessità di provvedere la trave di un idoneo sistema di connessione fra traliccio e getto in opera collaborante, in alternativa a pioli certificati si può dotare il traliccio stesso di ferri trasversali saldati ai correnti superiori o affidare tale funzione agli elementi d'anima, purché ne sia garantita la duttilità per favorire la redistribuzione delle forze di scorrimento. La scelta del traliccio-connettore

comporta inoltre una penalizzazione nel dimensionamento del traliccio in quanto quest'ultimo è già soggetto alle sollecitazioni conseguenti al comportamento a trave reticolare in acciaio, alla quale di regola è affidato già tutto il taglio. Naturalmente, ambedue le soluzioni, non essendo previste dalle norme, vanno supportate con adeguata sperimentazione.

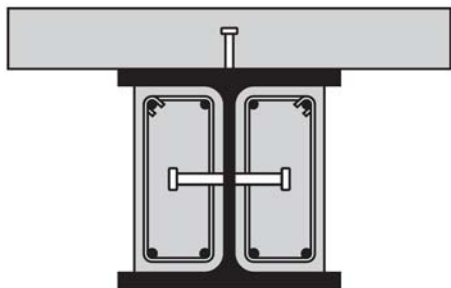


Figura 4. Esempio di trave composta parzialmente rivestita [4].

Sembra ragionevole aspettarsi, poi, che la resistenza a compressione dovuta ai momenti negativi di continuità in seconda fase, in corrispondenza dei nodi, debba essere garantita dalla sola parte in carpenteria metallica solidale al traliccio; si deve però considerare che le morfologie usualmente utilizzate prevedono monconi di continuità da cemento armato o un traliccio in carpenteria metallica connesso al traliccio di campata solo attraverso il calcestruzzo (ipotizzando una sorta di "giunzione per sovrapposizione"). Infine per la trasmissione del taglio all'appoggio, non potendo tener conto delle bielle di calcestruzzo, occorre prevedere un meccanismo di trasferimento solo in acciaio.

Occorre chiedersi, poi, in quali condizioni un fondello prefabbricato in calcestruzzo possa essere ricompreso nella categoria delle strutture miste; la risposta potrebbe essere positiva a patto di armarlo con una gabbia da c.a. e di connetterlo al corrente inferiore tramite connettori normalizzati o, per quanto detto sopra, supportati da adeguata sperimentazione.

Inoltre, per rientrare nella Categoria a), le travi PREM devono rispettare le limitazioni normative, sulla classe di resistenza del calcestruzzo, previste per le strutture composte; in particolare le NTC, nella progettazione delle stesse, non consentono l'impiego di calcestruzzi di classe superiore a C40/50 o C60/75, a seconda che siano soggette o meno alle azioni sismiche.

Occorre anche chiedersi, per questa categoria di travi, come tenere sotto controllo la fessurazione, sia a taglio che a flessione. Per il taglio, nel meccanismo taglio resistente del c.a., la fessurazione è tenuta sotto controllo solo

indirettamente mentre per la flessione tale controllo è eseguito con algoritmi perfettamente coperti dalle norme. Nelle strutture miste, questo controllo non è previsto, salvo presidiare con gabbie da c.a. tutto il getto di calcestruzzo, dal corrente superiore al corrente inferiore. Si porrebbe comunque il problema del loro dimensionamento e della loro verifica. Inevitabilmente, quindi, occorre mutuare i criteri di progetto dalla teoria del c.a., salvo supportare con adeguata sperimentazione gli algoritmi di calcolo adottati.

Infine, le NTC sembrano escludere la possibilità di attribuire ai telai sismo-resistenti costituiti da travi PREM di Categoria a) un comportamento dissipativi, quindi di assegnare all'edificio di cui fanno parte i valori del fattore di struttura che competono alle "strutture intelaiate". Al Paragrafo 7.5.2, a cui rimandano anche per le costruzioni composte, le stesse norme precisano, infatti, che in tale tipologia strutturale "le zone dissipative sono principalmente collocate alle estremità delle travi in prossimità dei collegamenti trave-colonna, dove si possono formare le cerniere plastiche e l'energia viene dissipata per mezzo della flessione ciclica plastica". Inoltre, al punto 7.6.4.1 (riguardante i criteri di progetto per strutture composte dissipative), si stabilisce che "la capacità di dissipazione può essere attribuita solamente alle membrature" e non ai loro collegamenti, che devono essere dotati di adeguata sovraresistenza. Ma al successivo Paragrafo 7.6.6, concernente appunto le regole specifiche per strutture composte intelaiate (precisamente al punto 7.6.6.2), le NTC affermano categoricamente che "i tralicci composti non possono essere usati come elementi dissipativi". Consideriamone allora le possibili implicazioni, ipotizzando alcuni scenari alternativi:

- si progettano le strutture come "non dissipative", oppure si prevede di localizzare le zone dissipative alla base dei telai ("strutture a mensola o a pendolo inverso");
- si dotano le strutture di controventi (concentrici od eccentrici) costituiti da membrature in acciaio strutturale;
- si affida integralmente la resistenza all'azione sismica a pareti o nuclei in c.a. .

L'intento di assegnare invece alle travi PREM composte acciaio-calcestruzzo un comportamento dissipativo conduce inevitabilmente verso la Categoria c).

Come si vede, per poter essere catalogate come travi miste canoniche, e quindi rientrare nella Categoria a), occorre ritenere non significativi molti aspetti delle travi PREM di produzione corrente, oppure modificare in maniera importante le morfologie usualmente

prodotte, oppure ancora ignorare le capacità dissipative di queste travi con evidenti aggravii di costi. Tutti questi aspetti sono tenuti da sempre sotto controllo dai singoli produttori ma, alla luce delle Procedure Ministeriali, rendono più naturale, per la maggior parte delle travi siffatte, il configurarsi come appartenenti alla Categoria c) piuttosto che alla a), al fine di poter utilizzare al meglio le loro proprietà intrinseche. Ma di questo aspetto, a valle delle scelte morfologiche fatte dal singolo Produttore, deve occuparsi il Servizio Tecnico Centrale del Ministero delle Infrastrutture, analizzando ciascuna tipologia ricevuta ed inquadrandola in una delle tre categorie previste ai fini, appunto, della loro qualificazione.

3.2 Categoria b)

Le travi candidate per questa categoria presentano minori problematiche in quanto nel modello taglio resistente si può considerare a tutti gli effetti la presenza del calcestruzzo. Sono quindi automaticamente coperte le tematiche del taglio, del momento negativo, del fondello, dello scarico all'appoggio e della fessurazione. Naturalmente occorre rispettare le prescrizioni relative agli interferri ed ai copriferri del c.a. e non possono realizzarsi nodi saldati con barre piegate perché il mandrino prescritto per le barre da c.a. è incompatibile con l'eccentricità che si avrebbe nel singolo nodo del traliccio in prima fase.

Si rileva che le travi di Categoria b) dotate di fondello prefabbricato in c.a. sono soggette a Marcatura CE in quanto ricadenti all'interno delle tipologie previste dalla norma armonizzata *EN 13225 "Prodotti prefabbricati di calcestruzzo - Elementi strutturali lineari"*, di cui pertanto dovranno osservare tutte le prescrizioni.

Per il dimensionamento del traliccio metallico resistente in prima fase, costituito da acciaio per c.a. o da carpenteria (in quest'ultimo caso non considerato nella sezione resistente finale complessiva), appare ragionevole riferirsi ai metodi di verifica relativi alle strutture in acciaio, esattamente come avviene per i tralici elettrosaldati delle lastre tipo "predalles". Il fatto che i tralici siano "normati", infatti, attiene unicamente alla loro composizione ed alle procedure di controllo mentre è stato sempre pacificamente convenuto che la verifica di prima fase degli stessi, per esempio nelle "predalles", debba essere eseguita riferendosi alle regole delle strutture in acciaio.

3.3 Categoria c)

Occorre anzitutto premettere che questa categoria è residuale, nel senso che qui confluiscono tutte le travi che non si inquadrano perfettamente né nella

a) né nella b). Qui rientrano, quindi, le travi PREM che, pur avendo una composizione materica omogenea nel senso di essere composte o tutte in acciaio da carpenteria o tutte in acciaio da c.a., non presentino uno o più dei requisiti progettuali descritti nei due precedenti paragrafi. Naturalmente, qui rientrano anche tutte le travi PREM realizzate con una combinazione di acciaio da carpenteria ed acciaio da c.a.

Si capisce bene, quindi, che appartengono a questa categoria di travi un'ampia percentuale di tutte le travi PREM prodotte in Italia poiché è proprio l'idea originaria di questa trave che coinvolge l'utilizzo ottimale dell'abbinamento acciaio-calcestruzzo in una forma che ha molte più risorse effettive di quelle note solo per travi miste ad anima piena.

Per queste travi, le Procedure Ministeriali prevedono che gli algoritmi e gli approcci di progettazione siano basati su modelli condivisi e prove di laboratorio. E' proprio qui che possono costituire un utile riferimento le Raccomandazioni Assoprem – CIS-E.

4. RACCOMANDAZIONI PER LA PROGETTAZIONE E L'ESECUZIONE DI TRAVI PREFABBRICATE RETICOLARI MISTE

Al fine di offrire un documento operativo a supporto delle Procedure Ministeriali, il Gruppo di Lavoro Assoprem – CIS-E ha prodotto le Raccomandazioni per la progettazione e l'esecuzione delle travi reticolari miste [6]. Tali Raccomandazioni propongono un approccio progettuale ragionevole, ragionato, condiviso e suffragato da un considerevole numero di prove di laboratorio. Le Raccomandazioni sono state prodotte al fine di fornire un documento tecnico attuativo dei principi riportati nelle Procedure Ministeriali, nel pieno rispetto delle normative tecniche vigenti, alle quali fanno ampio riferimento.

Uno degli obiettivi principali delle Raccomandazioni riguarda la definizione di regole di progettazione che garantiscano i livelli di sicurezza previsti dalle NTC [1], nelle diverse fasi di vita delle travi PREM.

Le Raccomandazioni contemplano tutte le tipologie di travi PREM (a, b e c); in particolare, per le tipologie a) e b) forniscono delle regole di esecuzione e di controllo mentre per la tipologia c) forniscono anche le regole di progettazione che attualmente non sono incluse nella normativa tecnica vigente, nazionale o internazionale. Nelle Raccomandazioni sono presenti diverse regole per i particolari costruttivi che riguardano, per

esempio, le saldature dei nodi del traliccio, gli ancoraggi delle armature, l'instabilità degli elementi compressi del traliccio, etc.

Le Raccomandazioni hanno una struttura simile a quella degli Eurocodici e sono basate su tredici Capitoli e due Annessi Informativi. Le problematiche affrontate dalle Raccomandazioni riguardano:

- la classificazione delle diverse morfologie di Travi Reticolari Miste;
- la definizione dei principi di progettazione per la prima e la seconda fase, inclusa la verifica a instabilità del corrente compresso del traliccio in Fase 1 e la durabilità;
- le caratteristiche che devono avere i materiali, che dovranno appartenere a quelli previsti dalle NTC;
- i metodi di analisi strutturale, per la prima e la seconda fase;
- i criteri di verifica agli stati limite ultimi e di esercizio;
- le verifiche di resistenza al fuoco;
- i numerosi dettagli costruttivi, inclusi i controventi delle anime del traliccio;
- le prescrizioni relative ai nodi strutturali;
- le prescrizioni particolari in presenza di sollecitazioni sismiche, incluse le tipologie strutturali, i fattori di struttura ed i criteri di progetto;
- le saldature e la loro qualificazione;
- i criteri di fabbricazione, esecuzione, montaggio e collaudo.

Le Raccomandazioni sono il risultato del lavoro di circa quattro anni del Gruppo di Lavoro Assoprem - CIS-E. Quest'ultimo ha operato a partire dallo Stato dell'Arte sulle travi PREM e dai risultati di studi sperimentali e/o numerici disponibili nella letteratura tecnica del settore.

Le Raccomandazioni, in questa prima versione, intendono fornire indicazioni per un utilizzo appropriato delle Procedure Ministeriali, al fine di regolamentare un settore che ha operato per diversi anni senza precise indicazioni normative. Il documento è particolarmente rivolto ai progettisti, ai direttori dei lavori, ai collaudatori e ai produttori di travi PREM.

Naturalmente le Raccomandazioni non costituiscono ancora un riferimento consolidato ma una sicura base su cui costruire con ragionamenti, dimostrazioni ed altra ricerca, un riferimento sufficiente a garantire la sicurezza richiesta alle strutture dalle Norme Tecniche. Per quanto attiene la produzione e l'esecuzione, poi, esse costituiscono già oggi un sicuro riferimento tecnico per tutte le categorie e tipologie di travi PREM.

L'utilizzo attento delle Procedure Ministeriali e delle Raccomandazioni Assoprem - CIS-E

consentirà di migliorare ulteriormente il contenuto nel tempo, in modo da poter produrre versioni successive del documento ancora più complete. Ciò sarà possibile anche grazie alla disponibilità di ulteriori risultati di ricerche finanziate da Assoprem a centri di ricerca con fine di approfondire sui modelli resistenti locali e globali delle diverse tipologie di travi PREM.

5. RICERCA

Nel 2007 Assoprem, l'Associazione Nazionale Produttori Travi Prefabbricate Reticolari Miste, ha dato vita al Primo Progetto Nazionale Coordinato di Ricerca, sulle Travi PREM, cui hanno partecipato ben nove Centri Universitari di Ricerca (Bergamo, Bologna, Brescia, Calabria, Ferrara, Lecce, Palermo, Torino e Trieste) più un Centro di Ricerca privato (Ferriere Nord di Osoppo) [6].

L'obiettivo era di verificare il comportamento di queste travi rispetto alle attese, basate su algoritmi messi a punto nel tempo dai produttori associati ad Assoprem partendo dalle norme sull'acciaio e sul cemento armato.

Per finanziare tale Ricerca, Assoprem ha dato vita ad un fondo di scopo cui hanno aderito la totalità degli Associati di quel periodo e cioè: CSP Prefabbricati S.p.A., Tubisider S.p.A., Engroup Engineering S.r.L., Fornace Calandra S.r.L., I.T.O. S.r.L., Laterizi Reato S.r.L., S.C.A.V. Prefabbricati S.r.L., SD S.r.L., Sicilferro Torrenovese S.r.L., Tecnobau S.r.L., Manini Prefabbricati S.p.A., Studio d'Ingegneria Suraci, VE. CAM. S.r.L.

Per coordinare il Progetto è stato creato un Gruppo di Ricerca Nazionale (GdR), composto dai Centri di Ricerca e dai Tecnici delle Aziende finanziatrici e Coordinato dal CIS-E.

Nel corso degli anni 2007, 2008 e 2009, le dieci unità di ricerca hanno sviluppato e portato a termine le attività concordate e monitorate durante le numerose riunioni del GdR.

Nel seguito vengono presentati i risultati completi di ciascuna unità di ricerca; ulteriori informazioni sono riportate in [6].

5.1 Ferriere Nord

Le ferriere Nord (Gruppo Pittini) hanno studiato il "Comportamento delle unioni saldate nelle travi PREM".

Gli acciai con cui possono essere realizzate le travi presentano caratteristiche diverse, associate alle diverse lavorazioni e trattamenti subiti: nel caso dell'acciaio da c.a. (B450C), il trattamento di bonifica (tempra e rinvenimento) fa sì che le caratteristiche meccaniche siano una combinazione fra quelle della corona esterna

temprata e rinvenuta e quelle fornite dal nocciolo non temprato, perciò più duttile; nel caso dell'acciaio da carpenteria, nelle classi previste dal nuovo D.M. 14.01.2008 (S 235, S 275, S 355 ed S 450) le caratteristiche meccaniche sono invece costanti sulla sezione. Questa diversità, associata alle diverse tipologie dei giunti, richiede perciò una verifica delle caratteristiche meccaniche degli elementi così realizzati.

Le Travi PREM presentano dei giunti saldati che devono essere in grado di trasferire adeguati sforzi. A tal fine, è fondamentale che le saldature non alterino in modo sensibile le caratteristiche degli acciai dei diversi elementi. È necessario pertanto effettuare prove a rottura per valutare sia il comportamento dei nodi, che devono essere in grado di trasferire le azioni progettate evitando la rottura nel nodo stesso, sia le caratteristiche meccaniche dei componenti. Le barre interessate da un nodo saldato non devono rompersi in corrispondenza della saldatura e soprattutto devono mantenere le caratteristiche meccaniche conformi alla classe d'acciaio utilizzata.

La determinazione della resistenza della saldatura viene effettuata sottoponendo a trazione lungo il proprio asse l'elemento collegato, predisponendo il campione con alcuni elementi accessori, costituiti da piatti e tondi, che permettano di sottoporre a trazione l'elemento ed il nodo da provare riportando il tutto ad una macchina che sa solo "tirare". Naturalmente, gli elementi accessori non debbono avere alcuna influenza sul nodo e sulla barra soggetta a prova.

5.2 Università di Bologna

L'Università di Bologna ha studiato la "Stabilità in fase 1 del traliccio metallico delle travi reticolati miste", con particolare riferimento ai criteri di progettazione per la prima fase, nella quale sia il corrente superiore che i diagonali sono soggetti a importanti sforzi di compressione.

Lo studio è stato affrontato, con riferimento ad alcune tipologie strutturali ricorrenti, valutando il comportamento sia di travi caricate su entrambi i lati (caricamento simmetrico) che da un solo lato (caricamento asimmetrico o eccentrico), determinando i valori dei carichi che provocano l'instabilità dei singoli elementi del traliccio o, in taluni casi, l'instaurarsi di un fenomeno di instabilità flessione-torsionale dell'intera trave.

Lo studio è stato effettuato, in una prima fase, mediante modelli agli Elementi Finiti nel quale si è considerata la non linearità geometrica e meccanica. Sono state svolte sia analisi per valutare le differenze di comportamento per le diverse tipologie, sia analisi parametriche per le tipologie più diffuse, variando l'altezza della trave reticolare o l'entità del carico su un solo lato.

Successivamente, relativamente al corrente superiore, sono stati elaborati criteri progettuali basati sulle verifiche nei riguardi dell'instabilità di un'asta singola su vincoli fissi o, in alternativa, vincoli cedevoli. I valori previsti da tali criteri progettuali sono stati poi confrontati con i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche.

Si è mostrato come, in funzione della tipologia di traliccio e di caricamento, siano possibili differenti tipi di instabilità: instabilità del corrente superiore su più appoggi costituiti dai ritegni diagonali, instabilità complessiva del corrente o instabilità flessione-torsionale dell'intera trave. Negli ultimi due casi, il carico ultimo può essere sensibilmente inferiore a quello ottenibile con i criteri usuali di verifica.

5.3 Università del Salento

L'Università del Salento ha studiato la "Connessione Acciaio-Calcestruzzo" L'obiettivo dell'indagine svolta riguarda l'efficacia del sistema di trasferimento degli sforzi in termini di resistenza, rigidità e duttilità.

Dai risultati sperimentali si è osservato un danneggiamento graduale del calcestruzzo, con fessurazione nella direzione trasversale e, successivamente, anche in quella longitudinale, senza mai verificarsi il completo distacco del piatto d'acciaio dall'elemento in calcestruzzo. Inoltre, l'analisi dei campioni svuotati del calcestruzzo dopo il test, ha evidenziato la presenza di rilevanti deformazioni plastiche nel traliccio, soprattutto in prossimità delle saldature con il piatto d'anima.

L'indagine sperimentale condotta consente di fare alcune considerazioni sul comportamento della connessione fra traliccio in acciaio e calcestruzzo nelle travi PREM:

- La prova di push-out, suggerita per le strutture miste acciaio - calcestruzzo di tipo tradizionale dall'EC4 [4], appare adeguata a caratterizzare il sistema di connessione in termini di rigidità, resistenza e duttilità, al fine di condurre le necessarie verifiche sia allo SLU sia allo SLE.
- Il verificarsi di crisi premature della connessione, per rottura del nodo o delle aste in acciaio, compromette l'efficacia del sistema strutturale. Pertanto, si evidenzia la necessità di controlli accurati in fase di produzione sia in relazione ai procedimenti di piegatura che di saldatura. In assenza di rotture premature, la connessione ha evidenziato un comportamento duttile.
- La tipologia di acciaio impiegato (liscio o nervato) ed il diametro delle aste diagonali influenza la risposta della connessione, sia in termini di resistenza sia in termini di scorrimento. Il confronto con prove analoghe, condotte da altri

ricercatori, evidenzia inoltre l'influenza della tipologia di calcestruzzo, soprattutto sulla duttilità della connessione.

5.5 Università di Ferrara

L'Università di Ferrara si è occupata della "Valutazione dello scorrimento richiesto dalle connessioni di travi prefabbricate reticolari miste". Partendo dalla teoria alla base dello studio delle travi con struttura mista di tipo tradizionale, si è analizzato il comportamento di travi PREM in campo lineare e non lineare.

Lo studio ha messo in evidenza la necessità di metodi di progetto in grado di determinare il massimo scorrimento richiesto alle connessioni. Una più accurata valutazione numerica dello scorrimento richiesto può essere effettuata utilizzando modelli agli elementi finiti originariamente impiegati in travi miste tradizionali con connessioni deformabili.

La capacità predittiva di alcuni metodi semplificati di progetto, che assumono un andamento ora cubico ora lineare dello scorrimento, viene verificata per tipologie di travi PREM disponibili in commercio mediante il confronto con la modellazione numerica. Si indica infine un metodo conservativo di progetto da utilizzare nel caso di connessioni con comportamento non duttile.

È stata infine riscontrata una significativa influenza del passo delle saldature tra piatto e traliccio sull'andamento dello scorrimento, e quindi sul momento resistente nel caso di travi tozze. Per valori del passo delle saldature dell'ordine del 20-25% della luce della trave, l'analisi non lineare agli elementi finiti ha infatti evidenziato la necessità di abbandonare l'ipotesi di connessioni uniformemente distribuite a vantaggio di quella, più realistica, di connessioni localizzate.

5.6 Università di Bergamo

L'Università di Bergamo si è occupata del "Comportamento a taglio di travi prefabbricate reticolari miste", in quanto esso risulta fra le problematiche strutturali più interessanti e bisognose di un'approfondita ricerca scientifica. Il comportamento a taglio di dette travi è infatti peculiare e caratterizzato da meccanismi resistenti che si discostano sostanzialmente da quelli classici di una trave con fenomeno fessurativo a taglio di tipo taglio flessione o taglio-trazione. Il diverso ruolo dell'aderenza e le percentuali elevate di armatura longitudinale costituiscono aspetti da valutare attentamente e quindi da investigare.

Dalle analisi è emerso come le travi reticolari miste non possano essere considerate come delle

travi in c.a.; possono invece essere considerate come strutture ibride aventi specifici meccanismi di rottura per taglio, che le differenziano dalle normali tipologie di travi in cemento armato.

All'aumentare del diametro del traliccio d'anima aumenta la capacità portante della trave; tale incremento, tuttavia, non è proporzionale all'aumento di area del traliccio, visto che la rottura si è sempre verificata lato calcestruzzo compresso (meccanismo taglio-compressione).

Si è riscontrata infine la formazione di regioni fessurate nel calcestruzzo, concentrate attorno ai nodi del traliccio d'acciaio. Questo è legato al fatto che sussistono elevate concentrazioni di sforzo nei nodi del traliccio, in quanto essi devono garantire il trasferimento degli sforzi fra acciaio e calcestruzzo. Nella realtà questa trasmissione di sforzi deve essere garantita dalle saldature.

5.7 Università della Calabria

L'Università della Calabria si è occupata del "Comportamento flessionale di travi reticolari miste: analisi dello stato limite di fessurazione".

L'analisi del comportamento flessionale di travi PREM ha messo in evidenza particolari aspetti prestazionali non prevedibili con le usuali modellazioni della teoria statica del c.a., che confermano la necessità di predisporre apposite procedure e metodologie di analisi.

Dal confronto tra travi in c.a. e travi PREM aventi le stesse armature longitudinali superiori ed inferiori e realizzate con gli stessi materiali (calcestruzzo ed acciaio), emerge che:

- per bassi valori della percentuale meccanica di armatura tesa, le travi PREM presentano un comportamento pressoché identico a quello delle travi in c.a.; si sono manifestate identiche modalità di rottura (cedimento del calcestruzzo compresso, con armatura tesa snervata), valori dei momenti ultimi quasi coincidenti (variazioni percentuali insignificanti), analogo quadro fessurativo e valori delle ampiezze di fessura;
- al crescere della percentuale meccanica di armatura tesa, il comportamento delle travi PREM è stato sensibilmente diverso da quello delle travi in c.a.; in esercizio le travi PREM sono risultate più rigide (come evidenzia la minore pendenza delle curva carico-frecce) mentre i valori dei momenti ultimi sono risultati superiori di circa il 12÷15% dei valori ottenuti per le travi in c.a.

Tenendo conto che le travi PREM sono caratterizzate da elevati quantitativi di armatura sia in trazione che in compressione, alla luce dei risultati della ricerca appare indispensabile formulare appropriate modellazioni del comportamento flessionale delle travi PREM basate su meccanismi resistenti non tradizionali.

5.8 Università di Palermo

L'Università di Palermo si è occupata dell' "Analisi teorico-sperimentale del comportamento ciclico delle connessioni tra travi prefabbricate reticolari miste e pilastri in cemento armato". Gli argomenti trattati riguardano i seguenti temi:

- il meccanismo di trasmissione degli sforzi tra il calcestruzzo e il traliccio metallico e tra gli elementi del traliccio metallico;
- la valutazione dei momenti di snervamento ed ultimi, della capacità rotazionale e delle risorse di duttilità delle sezioni di estremità delle travi;
- le modalità di trasmissione degli sforzi al nodo trave-pilastro.

In tale ambito, con la finalità di studiare il comportamento delle saldature, da cui dipende il comportamento della trave nella Fase 1 di autoportanza, sono state eseguite preliminarmente prove monotone di push-out su campioni rappresentativi di un tratto di travatura reticolare, in assenza di getto di calcestruzzo. Successivamente, al fine di indagare sul meccanismo di trasmissione degli sforzi tra acciaio e calcestruzzo, sono state eseguite prove di push-out su campioni, costituiti da due tronchi di trave reticolare mista accoppiati attraverso un piatto metallico e completati dal getto di calcestruzzo. Per la determinazione delle caratteristiche di resistenza e duttilità a flessione della sezione sono state condotte prove cicliche, senza inversione di segno, a momento positivo su trave continua.

Le prove sperimentali eseguite su travi ed elementi di travi tralicciate miste con piatto metallico in acciaio da carpenteria e traliccio reticolare in acciaio da c.a. saldabile, hanno evidenziato che:

- le saldature fra diagonali del traliccio e i correnti superiori e inferiori sono in grado di sopportare sforzi maggiori di quelli nominali di calcolo;
- in Fase 1 i fenomeni di instabilità delle aste del traliccio precedono la rottura delle saldature;
- la rottura per taglio in prove di push-out è da attribuirsi al superamento della resistenza a trazione del calcestruzzo;
- in assenza di idonei collegamenti del piatto inferiore alla zona di nodo, la resistenza delle sezioni di estremità a momento positivo può essere valutata trascurandone la presenza;
- la trave presenta un'adeguata capacità di rotazione plastica per carichi monotoni ma il danneggiamento del calcestruzzo compresso, dovuto ad una mancanza di adeguato confinamento lascia prevedere un rapido degrado di resistenza per carichi ciclici.

5.9 Università di Trieste

L'Università di Trieste si è occupata del "Comportamento ciclico del nodo trave-colonna per sistemi reticolari misti". La ricerca ha riguardato l'interpretazione dei risultati sperimentali su elementi tralicciati misti acciaio-calcestruzzo di nuova concezione, appositamente pensati per un utilizzo sismico, assieme all'individuazione di idonee procedure di progetto. Il sistema costruttivo analizzato consente la realizzazione di una struttura parzialmente prefabbricata ad ossatura portante intelaiata, atta ad assorbire sia i carichi verticali che quelli orizzontali con le stesse prerogative di quelli in calcestruzzo armato. Particolarmente importante per il funzionamento d'insieme risulta il comportamento del nodo trave colonna e della trave in prima e seconda fase.

Per meglio comprendere i risultati delle prove sperimentali ed individuare degli adeguati criteri di progetto, si è analizzato il comportamento di due travi provate sperimentalmente, assieme a quello del nodo, mediante il programma Abaqus.

La prova ciclica effettuata sul nodo trave-colonna ha evidenziato una buona duttilità del sistema, anche se si sono riscontrate carenze di armatura a taglio in prossimità del nodo che hanno comportato un prematuro collasso. Per il nodo sono stati individuati i meccanismi di base di trasferimento del taglio e le verifiche più significative da effettuarsi.

5.10 Università di Brescia

L'Università di Brescia ha eseguito una "Indagine sperimentale sul ritiro di travi prefabbricate reticolari miste con base in calcestruzzo".

L'indagine ha riguardato le travi PREM con fondello in calcestruzzo, dove spesso si manifestano prematuri fenomeni fessurativi. La presenza nel fondello prefabbricato di importanti armature metalliche (barre di grosso diametro) necessarie per garantire la capacità resistente del traliccio nella fase di autoportanza (Fase 1), determina un rapporto geometrico di armatura elevato che rappresenta un vincolo di elevata rigidità per le deformazioni di ritiro e può causare una prematura fessurazione. Infatti, la libera deformazione da ritiro che si sviluppa nel calcestruzzo è contrastata dall'armatura (che risulta compressa) e genera nel calcestruzzo stati tensionali di trazione preesistenti all'applicazione dei carichi. In tal modo, la resistenza apparente a trazione del calcestruzzo risulta ridotta e, in presenza di sollecitazioni di tipo statico, la fessurazione può manifestarsi prematuramente.

Per contrastare (o almeno limitare) i fenomeni fessurativi nei fondelli delle travi reticolari miste, non potendo modificare i carichi di esercizio o le percentuali di armatura, si può intervenire sul ritiro del fondello attraverso un'appropriata scelta del calcestruzzo da utilizzare.

I risultati delle campagne sperimentali hanno evidenziato che è il naturale ritiro del calcestruzzo il principale responsabile delle fessurazioni e non l'autoportanza delle travi. La soluzione più attendibile è stata quindi individuata nell'aggiunta di una forte componente di additivi chimici antiritiro ed espansivi e di speciali fibre strutturali sintetiche nei nuovi fondelli in calcestruzzo.

Una ulteriore osservazione riguarda il ruolo delle fibre strutturali, il quale è invece risultato essere solo marginale. In alcuni casi, infatti, il calcestruzzo con l'aggiunta di fibre ha dato addirittura esiti peggiori rispetto al corrispettivo senza fibre, anche se la ripetibilità dei risultati sperimentali è comunque limitata.

5.11 Politecnico di Torino

Il Politecnico di Torino ha studiato gli "Effetti delle deformazioni differite del calcestruzzo sulle travi reticolari miste", con particolare riferimento alla viscosità ed in generale alle deformazioni differite sul comportamento a lungo termine delle travi reticolari miste e degli organismi strutturali realizzati con queste travi.

Gli effetti della viscosità e del ritiro non si riducono ad un incremento della deformazione a lungo termine, ma possono introdurre ridistribuzioni di sforzi fra le diverse membrature, fra il calcestruzzo e le armature e fra i tralicci e le armature di completamento.

A tale indagine di tipo numerico è stata fatta seguire una campagna di ricerca sperimentale basata su provini in scala reale soggetti a carichi costanti e/o variabili nel tempo, prevedendo la misurazione sul lungo periodo.

La presenza di alte percentuali di armatura, ha un effetto benefico nella riduzione delle deformazioni viscosi che può essere predetto con un notevole grado di affidabilità.

6. BIBLIOGRAFIA

[01] **D.M. 14 Gennaio 2008**, "Norme tecniche per le costruzioni".

[02] **SERVIZIO TECNICO CENTRALE DEL C.S.LL.PP.**, "Procedure per il rilascio dell'autorizzazione all'impiego di travi tralicciate in acciaio conglobate nel getto di calcestruzzo collaborante".

[03] **Izzo, L., Minelli, F., Plizzari, G.**, "Linee Guida per le travi reticolari miste PREM", Atti del 17° Congresso CTE, Parma, 2008, pp. 781-790.

[04] **UNI EN 1994-1-1** "Eurocodice 4: Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici", 2005.

[05] **UNI EN 1990** "Criteri generali di progettazione strutturale", 2006.

[06] **Assoprem** "Progettare con le travi Prefabbricate Reticolari Miste PREM", Tecniche Nuove, 2010.

7. RINGRAZIAMENTI

Gli Autori desiderano esprimere il loro ringraziamento a tutti i partecipanti del Gruppo di Lavoro e del Gruppo di Ricerca nato in ambito CIS-E/Assoprem per il loro contributo e per le positive sollecitazioni e fruttuose discussioni.

Un doveroso e sentito apprezzamento va infine ad Assoprem che ha individuato come missione primaria quella di dotare le travi PREM di una regolamentazione che ha messo in conto anche i risultati di un vasto progetto di ricerca coordinato su scala nazionale.

Contatti con gli Autori:

Livio Izzo: info@assoprem.it

Marco Miglioli: info@assoprem.it

Fausto Minelli: minelli@ing.unibs.it

Giovanni Plizzari: plizzari@ing.unibs.it