

MODELLAZIONE STRUTTURALE CON TRAVI PREM NATIVE

GIORGIO MONTI, Università La Sapienza Roma
LIVIO IZZO, Assoprem

SUMMARY

Steel truss beams with cast in situ concrete (PREM beams) stand as the crossway among various constructive systems: prefabricated, steel and built on site and yet no actual technical software for structural modelling and analysis fully incorporates them.

The two phases, the first where the beam is a self supporting truss beam simply supported by the columns, as opposed to the frame behaviour in its second phase of life, make a strong difference with all other structural systems.

Assoprem, the national association of PREM beams producers, along with three major Italian Technical Software Houses have reached this goal.

Thus, the perspective of structural modelling has widened and, in the article, possible next steps of this evolution are analyzed.

1. IL FERMENTO ATTUALE E LE PROSPETTIVE DELLA MODELLAZIONE STRUTTURALE

Guardando allo sviluppo che hanno avuto negli ultimi venti anni i programmi per l'analisi strutturale, ci si accorge di come oggi essi non siano più soltanto strumenti per eseguire analisi e verifiche in maniera rapida, ma stiano piuttosto evolvendo verso veri e propri ambienti di modellazione 3D, in cui validare varie ipotesi progettuali ed in cui ottimizzare il comportamento strutturale. Un problema, questo, certamente di non immediata soluzione soprattutto quando si opera in campo non lineare.

I programmi di calcolo più avanzati sono oggi concepiti per gettare un ponte fra il progetto architettonico e la progettazione strutturale vera e propria, istituendo in un certo senso l'"anello mancante" della catena che, muovendo dall'idea, procede all'analisi ed infine perviene alla realizzazione. Essi partono infatti dagli elaborati architettonici, generalmente importandoli in uno dei formati grafici più diffusi, individuano automaticamente le maglie strutturali e le convertono in un modello strutturale agli elementi finiti, pronto per essere analizzato.

A questo punto è compito del progettista eseguire tutta quella serie di passi che va sotto il

nome di ottimizzazione strutturale – e per la quale software adeguati sono ancora lontani da venire – con l'obiettivo di dimensionare correttamente i vari elementi per rispettare i requisiti prestazionali di Normativa e mantenere ovunque la domanda inferiore rispetto alla capacità, sia essa espressa in termini di forza oppure di spostamento.

Nel caso sia previsto l'impiego, all'interno della struttura, di manufatti prefabbricati, l'ambiente di modellazione, oltre ad offrire i vantaggi sopra elencati, dovrebbe tener conto degli aspetti peculiari che riguardano il comportamento meccanico di tali elementi, in particolare quando questi sono costituiti da Travi PREM.

Oggi si sta lavorando, di concerto fra università, produttori e sviluppatori di software, perché il progettista possa arrivare a selezionare gli elementi prefabbricati adatti al proprio progetto, attingendo direttamente da una libreria standard, un po' come si fa per la progettazione delle strutture in acciaio in cui si attinge dal sagomario dei profili. Tale libreria dovrebbe raccogliere tutti gli elementi in produzione, opportunamente parametrizzati in modo da poter consentire una certa flessibilità nella scelta.

Appare infatti naturale pensare che, se in fase costruttiva la struttura viene realizzata assemblando in successione vari elementi prefabbricati, travi, pilastri o solai, altrettanto è possibile fare in fase di modellazione, impiegando per ogni elemento strutturale prefabbricato un elemento finito e che viene inserito nel modello secondo la sequenza costruttiva. In tal modo, è possibile ripercorrere tutte le fasi di realizzazione, anche quelle intermedie, mediante un modello evolutivo che tenga conto della effettiva successione delle varie fasi costruttive, del progressivo cambiamento dei vincoli, dell'applicazione successiva dei carichi, nonché, infine, della risposta sotto le azioni di esercizio, nonché quelle eccezionali indotte dai terremoti.

Per quanto riguarda la formulazione degli elementi finiti che rappresentano le Travi PREM, la ricerca, analogamente a quanto fatto per il cemento armato, si sta sviluppando nella direzione di quelli formulati in forza piuttosto che quelli in spostamento. Con questi ultimi, infatti, quando si entra in campo non lineare, è necessario infittire la mesh, finendo per adoperare 4 o 5 elementi finiti per ogni elemento strutturale. Con i primi si riesce invece ad ottenere una descrizione esatta dello stato di sollecitazione utilizzando un solo elemento finito, coincidente con l'elemento prefabbricato, anche in campo non lineare. Ciò comporta una notevole riduzione del numero complessivo di elementi finiti e, conseguentemente, del numero dei gradi libertà, con susseguente riduzione degli oneri di calcolo e dei tempi di analisi.

C'è poi da rilevare che è il sistema stesso di montaggio delle Travi PREM che si presta naturalmente ad essere trattato con i metodi dell'analisi non lineare: in questi, infatti, la matrice di rigidezza della struttura viene costantemente aggiornata per riflettere i cambiamenti nelle caratteristiche meccaniche dei materiali e nella geometria (effetti del second'ordine). E' quindi immediato comprendere come, attraverso l'analisi non lineare, si possa tener conto in maniera naturale dei cambiamenti dei vincoli alle estremità degli elementi prefabbricati, prima e dopo la solidarizzazione. Lo schema che ne risulta è perfettamente in linea con quanto generalmente si fa quando si analizzano strutture in campo non lineare, sia con il metodo statico (pushover) che dinamico (accelerogrammi): in entrambi i casi i carichi verticali vengono applicati alla struttura prima di avviare il calcolo sismico. Nel caso delle strutture contenenti Travi PREM c'è chiaramente da prevedere uno sdoppiamento di questa fase preliminare in cui dapprima si opera in regime di travi isostatiche soggette ai carichi di costruzione (I fase) e, successivamente, in regime di funzionamento a telaio sotto i carichi di II fase, in cui si simula la solidarizzazione conseguente al getto di calcestruzzo in opera. Questo aspetto assume particolare importanza nelle analisi sismiche: è necessario infatti che la struttura sia in grado di sviluppare cerniere plastiche in corrispondenza delle sezioni di estremità delle travi in modo da utilizzare le risorse di duttilità e di dissipazione di energia di cui dispone.

Il vantaggio dell'analisi non lineare risiede nel poter memorizzare tutti questi passaggi in maniera automatica all'interno dei singoli elementi strutturali, che quindi conservano "memoria" di tutte le fasi che hanno attraversato, da quella iniziale di montaggio fino a quella in condizioni sismiche. Questo è un aspetto di fondamentale importanza, in quanto, com'è noto, in campo non lineare non è possibile sovrapporre gli effetti.

Un aspetto di ulteriore interesse, legato alla particolare morfologia delle Travi PREM nella loro configurazione finale, merita particolare attenzione, non solo in fase di progettazione ma anche di modellazione. Questo riguarda la diffusione dei carichi ed in particolare i meccanismi di trasferimento degli sforzi tra acciaio e calcestruzzo: infatti, data la conformazione del traliccio, il nodo rigido della trave reticolare richiede una notevole concentrazione di sforzi prima che possa avvenire il trasferimento dei carichi dall'asta tesa del traliccio a quella compressa e al manicotto di calcestruzzo circostante, che funziona da puntone. Anche in questo caso, è importante che il modello di calcolo

sia in grado di prevedere tale meccanismo in maniera adeguata.

Una volta messo a punto, tale modello, comprensivo di tutti gli aspetti sopra trattati, dovrebbe essere in grado di affrancarsi dalle note problematiche che affliggono i modelli agli elementi finiti per il cemento armato ordinario, soprattutto quelle legate alla modellazione dei meccanismi resistenti a taglio e alla loro interazione con i meccanismi resistenti a flessione. E' infatti noto che questa interazione può essere inserita nel modello a livello di: elemento (macro-interazione), sezione (meso-interazione), oppure materiale (micro-interazione). L'elenco precedente è disposto in ordine di crescente complessità, poiché maggiore è il livello di dettaglio dell'interazione, meno sostenibili divengono i costi dell'analisi e più difficoltosa l'interpretazione dei risultati. A tal fine, la ricerca corrente su tale tema mira ad individuare, tramite un'ampia campagna di prove sperimentali attualmente in fase di sviluppo, l'effettivo schema resistente a taglio, con l'obiettivo di rappresentare detta interazione a livello di elemento, così che il modello risultante possa essere facilmente impiegato nelle analisi dinamiche al passo.

Come ultima annotazione c'è da rilevare come l'attuale ribollire di attivismo nel settore delle costruzioni sia principalmente dovuto all'accelerazione normativa avutasi in quest'ultimo lustro, che, a pensarci bene, ha controbilanciato quasi un ventennio di stagnazione, consentendo di lasciare alle spalle metodi di progettazione ormai obsoleti e ponendo nuove sfide per una nuova generazione di costruzioni sostenibili, costruttivamente efficienti e soprattutto strutturalmente sismoresistenti.

Bisogna riconoscere che, in campo professionale, dopo aver abbandonato a malincuore il sicuro (e un po' datato) rifugio delle tensioni ammissibili, si è giunti oggi, dopo un tempo relativamente breve, a trattare problemi nuovi con maggiore consapevolezza e con tecniche di analisi, quali quella non lineare, fino a qualche anno fa impensabili. L'impressione generale è che il terreno culturale sia ora fertile per un ulteriore salto verso l'analisi dinamica in campo non lineare con accelerogrammi. E' solo questione di tempo.

In questa situazione particolarmente stimolante, sia per la ricerca sia per l'applicazione, il mondo della prefabbricazione non è certamente rimasto al palo, anzi.

E' infatti positivo che, fra i tanti settori del mondo delle costruzioni in cui si registra un notevole attivismo conseguente all'evoluzione normativa, alcune delle proposte più interessanti stiano provenendo proprio da quello della prefabbricazione. Ciò è in larga parte dovuto a

meccanismi di fisiologica competizione che animano i vari attori industriali, in cui però gioca un ruolo altrettanto fondamentale la collaborazione creativa che si sta consolidando fra Università e Industria, dalla cui comunanza di interessi, metodi ed obiettivi, potrà trarre vantaggio tutta la comunità professionale.

2. LO STATO DELL'ARTE E L'INDIVIDUAZIONE DEI PRIMI PASSI

Il nuovo assetto normativo e la ancor più innovativa filosofia di progettazione hanno causato non poco disorientamento nel mondo professionale. E' indubbio che i professionisti sono stati (male) abituati dal precedente corpus normativo ad una progettazione quasi "notarile", derivante dall'imposizione prescrittiva di un insieme di regole semplificate il cui senso teorico raramente veniva esplicitato (basti pensare alla vecchia definizione dello spettro di risposta, in cui il concetto di dissipazione di energia era completamente celato). Nel giro di un lustro essi si sono ritrovati calati in un sistema normativo dai chiari connotati prestazionali, in cui i concetti fondamentali di livelli prestazionali (stati limite), di gerarchia delle resistenze, di duttilità, di comportamento lineare e non lineare, di metodi di analisi statici e dinamici, sono divenuti finalmente espliciti e parte integrante e qualificante della progettazione. Se è vero che un tale sistema rende più complessa la progettazione e meno determinante il ruolo dell'"esperienza", va pur riconosciuto che in tal modo la capacità di "ingegnarsi" dei professionisti è certamente valorizzata da una maggiore consapevolezza e controllo del comportamento della struttura.

Allo stesso tempo, anche a causa dell'altalenante intrico di normative, i software strutturali non sono riusciti a seguire tempestivamente e completamente l'evoluzione normativa o, almeno, non riguardo a tutte le tipologie strutturali.

La progettazione di strutture con Travi PREM, elementi di non immediata catalogazione ed omologazione di comportamento, è diventata dunque difficoltosa, conducendo spesso il professionista lungo strade di modellazione strutturale macchinose e complesse, nel tentativo di coglierne il reale comportamento con strumenti non completamente adeguati, come quelli relativi al cemento armato, che non sono pensati per cogliere e gestire le diverse fasi costruttive.

Spesso dunque, non essendo in grado di gestire tutte le problematiche, il progettista è costretto ad affidarsi completamente alle aziende produttrici che studiano ed affinano continuamente il prodotto. Ciò comporta che il

professionista non è più l'artefice delle scelte progettuali dei propri lavori e non ne riesce a governare completamente i risultati né, tantomeno, ad ottimizzarne le scelte. Questo si traduce, da parte di taluni professionisti, in un disagio ed in una difficoltà di avvicinamento a questi elementi strutturali. Su tale questione il mondo universitario, unito a quello dei produttori, sta cercando di intervenire con l'obiettivo ambizioso di arrivare a dotare i software commerciali più diffusi di metodi e strumenti di modellazione e di calcolo dedicati.

3. I NUOVI STRUMENTI DISPONIBILI AL PROGETTISTA

La scelta dell'utilizzo di Travi PREM, per una struttura, è guidata dalle esigenze più varie. La più frequente, ma non l'unica, è l'esigenza di autoportanza, che comporta vantaggi diretti (ed evidenti) unitamente a vantaggi indiretti (meno evidenti), ma, per il progettista, molto più importanti.

I vantaggi diretti consistono, naturalmente, in tempi ridotti di costruzione, minori attrezzature di cantiere e, talvolta, in una vera e propria ampliata fattibilità delle soluzioni strutturali.

I vantaggi indiretti derivano dal fatto che tutti i carichi assorbiti in autoportanza (fino al 100% del peso proprio dell'impalcato) incidono essenzialmente sull'armatura della Trave PREM e non sul calcestruzzo gettato in opera che, essendo in uno stato fluido, non può ancora reagire, mentre, una volta indurito, esso ha una funzione strutturale per i carichi che verranno a gravare successivamente sul manufatto. Poiché quelli applicati in prima fase sono carichi di lunga durata, ne consegue che la Trave PREM autoportante subisce nel tempo fenomeni deformativi legati alla viscosità sicuramente molto inferiori rispetto ad un analogo manufatto in c.a., a parità di condizioni di carico compressive.

Ciò comporta che, una volta controbilanciata la freccia iniziale con una appropriata monta, tutti i pesi propri strutturali assorbiti in autoportanza non hanno, né avranno mai, alcun effetto sulle deformazioni, avendo interessato di fatto il solo traliccio in acciaio, che è di fatto privo di fenomeni viscosi.

Un secondo aspetto, altrettanto importante, da considerare nell'utilizzo di Travi PREM autoportanti consiste nel fatto che tutti i carichi che gravano su di essa in prima fase, compreso il peso proprio, non determinano sollecitazioni flessionali agli estremi dell'elemento stesso, salvo casi particolari. Questo deriva dallo schema strutturale che, nella fase iniziale, è quello di trave semplicemente appoggiata e, solo dopo la posa

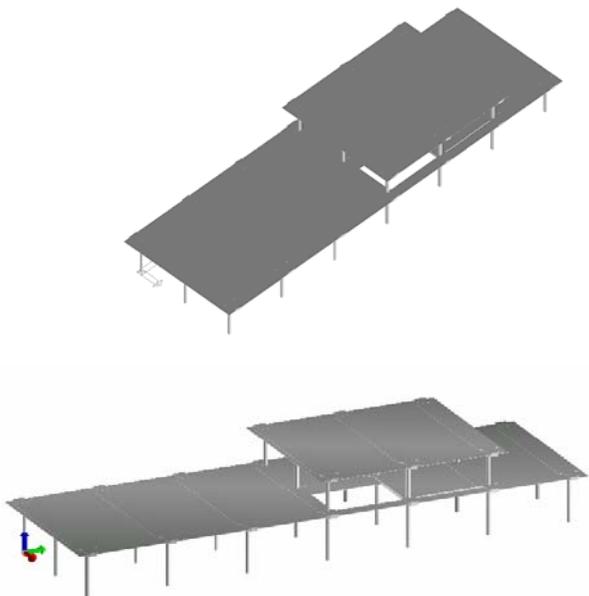


Figura 1. Struttura su due livelli con Travi PREM e solaio in totale autoportanza.

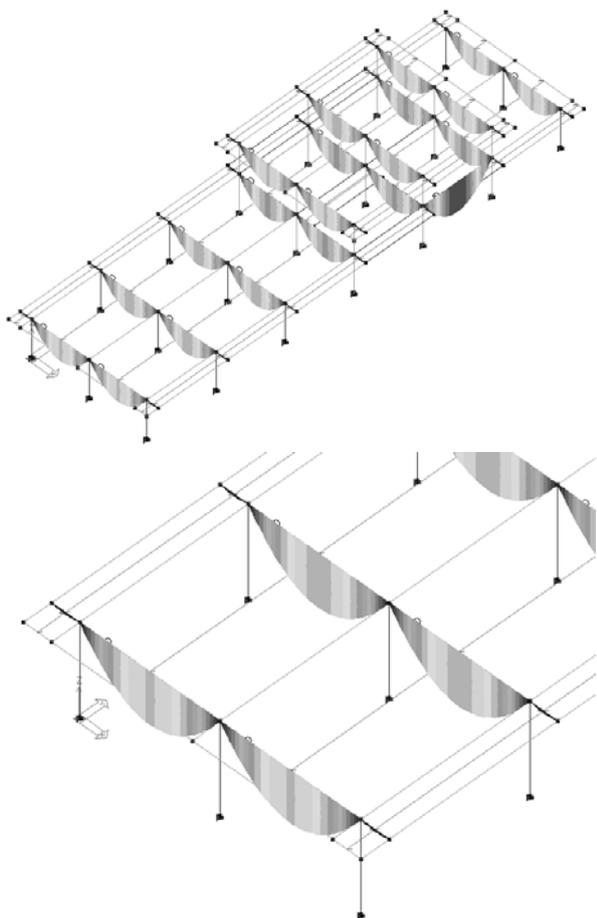


Figura 2. PRIMA FASE: Travi semplicemente appoggiate; sbalzi semplicemente appoggiati sui pilastri e su un puntello all'estremità. Nodi senza momenti indotti dai pesi propri.

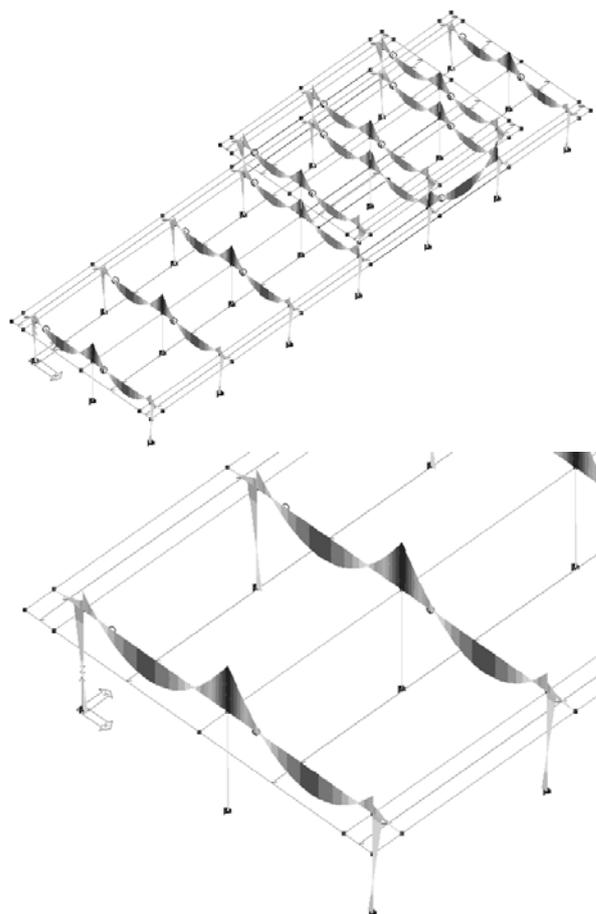


Figura 3. SECONDA FASE: Travi e sbalzi con vincolo di continuità ai nodi; effetti dei soli carichi verticali di seconda fase. Nodi sollecitati unicamente dai carichi di seconda fase.

dell'armatura integrativa al nodo e il consolidamento del getto di completamento in opera, diviene quello di una tipica struttura a telaio in c.a. che resiste alle azioni gravitazionali di seconda fase ed alle azioni orizzontali da sisma o vento, beneficiando inoltre di un impegno flessionale ridotto in corrispondenza dei nodi trave-pilastro. E' poi importante osservare che tutto il taglio di prima fase agisce sulla parte in acciaio e non sulla trave composta.

Un ulteriore beneficio deriva dai correnti superiori in acciaio, i quali, per resistere al momento di prima fase in campata, sono costituiti da armature importanti, che aumentano la percentuale di armatura compressa e riducono

ulteriormente l'effetto viscoso dovuto ai carichi di seconda fase.

Se poi si usa una trave con fondello in acciaio, che ha l'armatura tesa concentrata al lembo inferiore, si riduce anche la freccia indotta dai carichi di seconda fase, sia elastica che viscosa.

Insomma, utilizzando, a seconda dei casi, alcune o tutte le caratteristiche tecniche delle Travi PREM, si ha l'apparente paradosso che una trave di sezione ed armatura inferiore rispetto ad un'analogia in c.a, subisce, a parità di carichi e di vincoli finali, deformazioni minori, necessitando inoltre di una minore esigenza di resistenza flessionale ai nodi. Tutto ciò si traduce in un vantaggio anche per il dimensionamento dei pilastri soggetti al soddisfacimento dei requisiti di gerarchia delle resistenze.

I progettisti hanno quindi a disposizione una tecnologia che consente loro di diminuire gli ingombri strutturali di travi e pilastri, senza nulla perdere in termini di deformabilità strutturale, ed al contempo di contenere i tempi di realizzazione fino a dimezzarli qualora le Travi PREM siano abbinate a pilastri preassemblati o più in generale prefabbricati.

A tutt'oggi, però, ai vantaggi sopra elencati derivanti dall'impiego di Travi PREM, corrispondono ancora per i progettisti alcune complicazioni nell'analisi strutturale globale dell'edificio, in quanto la modellazione deve prevedere almeno le due fasi principali. Attualmente i software di modellazione strutturale disponibili sul mercato non hanno al loro interno l'elemento Trave PREM come nativo e non sono quindi in grado di gestire le implicazioni nella risoluzione del modello per fasi.

Per far sì che la progettazione degli edifici con elementi prefabbricati di tipo PREM potesse essere finalmente una scelta ed una opportunità per il mondo professionale, Assoprem si è fatta promotrice di una iniziativa molto innovativa presso alcune Software House, che vi hanno aderito accettando di dotare il proprio modellatore di un nuovo elemento: la Trave PREM.

La grande novità di questo progetto è che esso è nato e si è sviluppato a beneficio dell'intera comunità scientifica e professionale e non, come è avvenuto alcune volte nel passato, ad uso esclusivo del singolo produttore.

Una volta individuati i partner, Assoprem ha designato un Gruppo di Lavoro, denominato TdS (Team di Sviluppo), che ha individuato le questioni tecniche specifiche che il software deve implementare e che, per sommi capi, possono essere così riassunte:

1) riconoscere e discriminare travi PREM con fondello in acciaio, con fondello in c.a. o senza fondello,

2) riconoscere e discriminare Travi PREM di categoria strutturale in c.a., miste o "ibride",

3) acquisire automaticamente, in un nuovo caso di carico "speciale", la parte dei pesi propri dei solai prefabbricati in funzione della distanza del primo puntello dalla trave, cioè graduare l'autoportanza richiesta,

4) costruire automaticamente un modello strutturale di prima fase, derivato da quello finale (seconda fase) inserito dal progettista, in cui le travi siano svincolate all'appoggio, salvo combinare le sollecitazioni derivanti dai due modelli precedenti,

5) combinare diversamente le sollecitazioni dei due modelli a seconda che si tratti di SLU o di SLE; i primi, infatti, vanno combinati direttamente, mentre nei secondi le sollecitazioni di prima fase non agiscono sulla sezione mista ma solo su quella in acciaio,

6) differenziare i coefficienti parziali per le azioni relativi ai pesi propri fra prima fase, in cui il getto integrativo di calcestruzzo in opera si configura come un carico variabile, e seconda fase, in cui tale getto è effettivamente assimilabile ad un peso proprio strutturale,

7) differenziare i momenti d'inerzia a seconda della categoria strutturale della Trave PREM ed in funzione di due diversi calcestruzzi: quello prefabbricato e quello del getto integrativo.

Il progetto ha una valenza del tutto generale in quanto non privilegia né trascurava alcuna specifica tipologia o marca di Trave PREM, ma prevede anzi tutte le tipologie e marche esistenti sul mercato e permette al professionista, una volta messo a punto il modello, di affidare i dati necessari al dimensionamento finale delle travi a qualunque Produttore di Travi PREM.

A tale fine, all'interno del progetto è stato definito un formato standard ed aperto per il file di interfaccia, generato dal modellatore (pre-processor), che contiene i risultati dell'analisi strutturale necessari al programma di verifica esterno (post-processor) sviluppato a cura del singolo Produttore, consentendo così di separare l'ambito della modellazione da quello della verifica e del progetto costruttivo dei manufatti prefabbricati. Tale formato non è proprietario, bensì pubblico e qualsiasi Software House in futuro potrà adottarlo in piena autonomia, non soltanto all'interno di un proprio modellatore strutturale, ma anche nell'implementazione di un eventuale post-processor di dimensionamento e verifica di Travi PREM. In pratica si è perseguito l'intento di istituire un formato per lo scambio di dati tra ambienti software eterogenei, analogamente a quanto avviene con il formato dxf per lo scambio di elaborati grafici.

Completato il lavoro del TdS, è stato quindi il turno delle Software House, che hanno portato a termine il compito loro affidato, sviluppando le prime versioni del software che viene presentato in anteprima nazionale alla Comunità Scientifica e Professionale in occasione del SAIE 2010.

Contatti con gli autori:

Giorgio Monti: giorgio.monti@uniroma1.it

Livio Izzo: info@assoprem.it