

Pietro Gambarova  
Carlo Urbano

## I materiali inorganici, compositi, il calcestruzzo

### Advanced materials and composite material structural elements

At the Department of Structural Engineering of the Technical University of Milan many research activities on materials and structure are performed using the equipment of the Material Testing Laboratory.

The researches in the field of advanced materials is based on experimental and numerical activities. Some experimental tests on simple specimens are reported fig.4 and fig.5 while fig.7 and fig.8 represent the numerical models of a fabric and of an underwater vehicle. The fibre reinforced materials are also used in civil application as strengthening of damaged structures.

An example of a concrete beam reinforced with carbon-fibre composite lamina is reported in fig.9. The aim of these activities is to provide efficient tools for the design and development of advanced material and structural elements.

### Steel structures under dynamic loading

Research studies on Steel Structures, carried out within the Structural

Engineering Department, are related to the following two main topics:

- Seismic behaviour of steel and composite steel-concrete structures
- Seismic behaviour of large framed systems made of thin walled, cold formed profiles.

On the first topic a number of theoretical as well as experimental studies have been carried out, which led to a better understanding of some phenomena typical of the structural response and of the damage accumulation process. Some specific rules adopted in Eurocodes resulted from these studies.

Steel storage pallet racks are a very peculiar type of structure because their dead load is only a small portion of the serviceability live load. Furthermore, for operative reasons, bracings are eccentric with ▶

## Acciaio nelle strutture soggette a carichi dinamici

Le ricerche condotte nell'ambito del Dipartimento di Ingegneria Strutturale sul tema delle Strutture Metalliche possono essere inquadrare nei seguenti filoni principali:

- comportamento di strutture di acciaio e miste di acciaio e calcestruzzo in zona sismica;
- comportamento di grandi strutture intelaiate costituite da profili leggeri formati a freddo, in presenza di azioni sismiche.

Sul primo argomento sono stati condotti una serie di studi sia teorici sia sperimentali che hanno consentito non solo una miglior comprensione di alcuni fenomeni tipici del comportamento delle strutture di acciaio e miste di acciaio e calcestruzzo soggette ad azioni sismiche, ma anche la messa a punto di alcune clausole specifiche adottate nelle normative europee di calcolo e verifica.

In particolare, si citano i numerosi studi effettuati nell'ambito di vari progetti di ricerca (condotti a livello nazionale ed internazionale) sul comportamento ciclico di travi, colonne e/o dei collegamenti trave-colonna [Figura 1' e Figura 2'], che hanno portato alla messa a punto sia di modelli di accumulazione del danno e di criteri di collasso, sia di metodi progettuali che sono attualmente accettati a livello internazionale.

Le strutture intelaiate costituite da profili formati a freddo, sottoposte ad azioni sismiche costituiscono una tipologia molto particolare, in quanto, al contrario di quanto avviene usualmente, a fronte di un carico permanente estremamente ridotto risultano soggette ad un elevatissimo carico accidentale.

Inoltre, per esigenze operative, i controventi sono, usualmente, realizzati in posizione eccentrica rispetto al posizionamento dei carichi sulla struttura.

Questo fatto, unito alla grande flessibilità degli elementi strutturali e dei collegamenti rende particolarmente complessa la risposta di queste strutture ad azioni di tipo sismico. È stato avviato, in collaborazione sia con l'Associazione Europea (F.E.M.) sia con l'Associazione Italiana (ACAI) dei Produttori di Scaffalature uno studio mirato sia alla caratterizzazione del comportamento dei singoli componenti delle strutture, sia allo studio del comportamento dinamico di strutture complete soggette ad azioni sismiche. Grazie al contributo della UE, che ha garantito l'accesso gratuito alla tavola vibrante del Laboratorio di Ingegneria Sismica della National Technical University di Atene (Grecia), sono state

1. Particolare di nodo trave-colonna in acciaio sottoposto a storie di carico di tipo sismico



2. Lesione sull'ala più lontana dalla soletta in un giunto trave-colonna di struttura mista di acciaio e calcestruzzo



3. Scaffalatura sottoposta a prova dinamica presso il Laboratorio di Ingegneria Sismica della National Technical University di Atene



4. prova di trazione strumentata con estensimetro biassiale



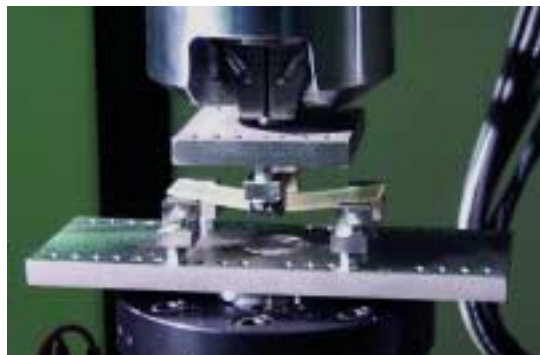
eseguite una serie di prove dinamiche su modelli di scaffalature di dimensioni reali, di due campate (2 x 1.8 m) in larghezza e tre piani (3 x 2.0 m) in altezza [Figura 3'].

## Materiali innovativi ed elementi strutturali in materiale composito

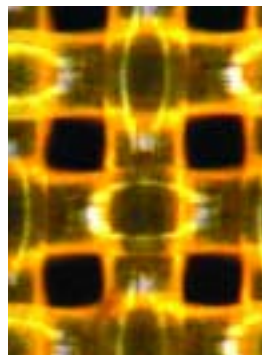
Presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano vengono svolte numerose attività di ricerca su materiali e strutture avvalendosi delle attrezzature del Laboratorio Prove Materiali. La metodologia di ricerca si basa sullo sviluppo parallelo di attività sperimentali e di modellazione numerica. Accanto all'attività di caratterizzazione meccanica dei materiali comunemente utilizzati nel campo dell'ingegneria civile (acciaio e calcestruzzi armati), vi è un'intensa attività di ricerca nel campo dei materiali innovativi e delle strutture con essi realizzate. Alcuni esempi di prove meccaniche utilizzate per la caratterizzazione dei materiali innovativi sono riportati in Figura 4' e Figura 5'. Le immagini mostrano una prova di trazione monoassiale e una di flessione su tre punti effettuate su provini in materiale composito.

L'attività di modellazione è volta alla simulazione

5. prova di flessione su tre punti



6.A. Tessuto monofilamento: immagine da microscopio di un campione



6.B. Tessuto monofilamento: modello ad elementi finiti



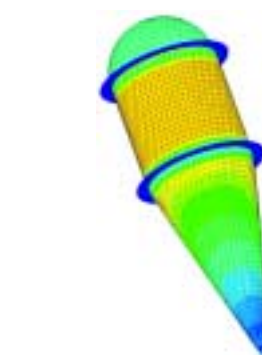
7.A. Modellazione ad elementi finiti: composito unidirezionale



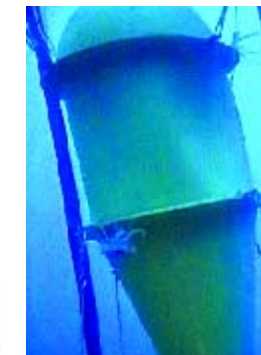
7.B. Modellazione ad elementi finiti: tessuto di rinforzo



8.A. Veicolo sottomarino: modello ad elementi finiti



8.B. Veicolo sottomarino: prova sperimentale in mare



▶ respect to the centre of gravity of the applied masses. This fact, together with the large flexibility of these structures makes very complex the seismic response of this structural typology. An extensive research program has been activated, in co-operation with both the European (FEM) and Italian (ACAI) Association of Manufacturers, for the study of the seismic response of the structural members and connections as well as of the global structure. With the contribution of the EU (within the ECOLEADER Research Program) a number of full scale models (2 bays of 1.8 m each and 3 levels of 2.0 m each) were dynamically tested on the shaking table facility of the N.T.U.A. (Greece). High-performance and

ultra high-performance cementitious composites belong to the frontier of the structural materials, and as such are required to provide increasing levels of strength, ductility and durability, for more economical, ecological, architecturally-valuable and daring structures. In cooperation with several Italian and foreign research institutions, much effort has been lately devoted to these materials in Milan, from microstructural modelling to fire strength, from reinforcement corrosion to innovative structural shapes, with the aim of providing the industry a full system of services in the money-attracting domain of reinforced-concrete infrastructures.

del comportamento meccanico dei materiali e delle strutture con essi realizzate. In Figura 6\* è riportato il modello numerico utilizzato per la simulazione del comportamento meccanico di un tessuto tecnico per applicazioni serigrafiche e di filtraggio. In Figura 7\* sono rappresentati due modelli ad elementi finiti utilizzati per lo studio di compositi rinforzati con fibre unidirezionali e tessuti.

La Figura 8\* riporta un esempio di struttura per veicoli sottomarini realizzata in materiale composito ed il relativo modello numerico. I materiali fibrorinforzati sono ampiamente utilizzati anche per le applicazioni civili quali elementi di rinforzo di strutture danneggiate o da consolidare. In Figura 9\* è raffigurata una trave in legno rinforzata mediante fibre di carbonio e sottoposta a prova di flessione. Lo scopo principale delle suddette attività è quello di fornire efficienti strumenti di progettazione e di sviluppo ai produttori di materiali innovativi e di elementi strutturali.

#### I materiali per le costruzioni: il calcestruzzo

L'enorme sviluppo delle costruzioni e delle infrastrutture nella seconda metà del XX secolo, sia nei

paesi sviluppati, che in quelli emergenti, ha richiesto la messa a punto di conglomerati cementizi più resistenti e più durevoli, per garantire ottime caratteristiche strutturali ad opere sempre più audaci per altezza, lunghezza e snellezza, e spesso destinate a lavorare in condizioni ambientali estreme. Pertanto, nelle nazioni più evolute cospicui finanziamenti sono stati dedicati nel passato ventennio ai conglomerati cementizi *ad alte prestazioni*, con esperienze e realizzazioni che in Francia, Germania, Paesi Nordici, Giappone e Stati Uniti hanno riguardato edifici alti, ponti, tunnel, piattaforme marine e gusci di contenimento. Tali esempi mostrano però che il potenziale innovativo dei calcestruzzi ad alte prestazioni può essere sfruttato solo attraverso una ben coordinata collaborazione fra ricercatori, progettisti, produttori, costruttori ed enti normatori. Al Politecnico di Milano, l'interesse per i conglomerati cementizi ad alte ed altissime prestazioni (HPC e UHPC) si è sviluppato attraverso progetti sia universitari, che misti Università-Industria (1994-96, "Materiali speciali per le costruzioni", CNR; 1997-99 e 2000-01, "Sicurezza e durabilità delle strutture", cofinanziati dal MURST; 1995-99, HITECO su HPC e UHPC, cofinanziato dalla Comunità Europea ed

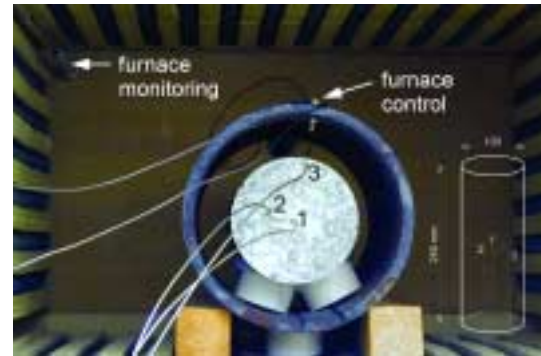
in collaborazione con l'ENEA; 2000, ULISSE finanziato dai produttori italiani di calcestruzzo). Tali progetti sono stati un'eccellente occasione di collaborazione con l'Industria e con i ricercatori di più di venti università, fra cui si possono citare Torino Politecnico, Brescia, Parma, Padova, Udine, Perugia, Roma I, L'Aquila, Napoli I, Lecce e Palermo.

I conglomerati *ad alte prestazioni* presentano una molteplicità di caratteristiche positive, fra le quali l'alta resistenza meccanica in compressione (da 2 a 6 volte superiore a quella del calcestruzzo ordinario), la maggiore compattezza ed omogeneità, la rapidità di indurimento, l'esteso comportamento elastico-lineare, e – con l'aggiunta di fibre metalliche – l'elevata resistenza a trazione, cui si accompagna grande duttilità. Si comprende allora come tali materiali rappresentino un reale passo in avanti, essendo particolarmente adatti per costruzioni che richiedono elevati livelli qualitativi in termini di resistenza, de-formabilità e durabilità. Inoltre i calcestruzzi ad alte prestazioni sono "ecologici" in quanto fra i loro componenti rientrano alcuni sotto-prodotti industriali di difficile smaltimento (come la microsilice e le ceneri volanti).

9. prove di flessione su trave in legno rinforzata con fibre di carbonio



10. provino in calcestruzzo cilindrico con termocoppie, all'interno di un forno adatto anche a piccole strutture



Con specifico riferimento agli studi sperimentali e teorici condotti presso il Politecnico di Milano, l'attività ha riguardato i seguenti campi:

- La caratterizzazione meccanica dei calcestruzzi (normali, fibrorinforzati, ad alte prestazioni, ad altissima resistenza e ad aggregato leggero) a temperatura ambiente e ad alta temperatura [Figura 10<sup>\*</sup>, T<sub>max</sub> = 1100°C].

- La modellazione del comportamento termo-igrometrico e microstrutturale dei conglomerati cementizi, con sviluppo di appositi programmi di calcolo per valutare gli effetti di frattura, ritiro e viscosità [Figura 11<sup>\*</sup>].

- Lo studio sperimentale e la modellazione matematica dell'interazione fra armatura e calcestruzzo, e fra infissaggi metallici e calcestruzzo, per valutare la capacità di ancoraggio anche in condizioni ambientali estreme (incendio e corrosione).

- Lo studio sperimentale e teorico dell'uso di materiali innovativi (calcestruzzo fibrorinforzato ed armatura non metallica) nella precompressione degli elementi prismatici in parete sottile [tegoli, Figura 12<sup>\*</sup>].

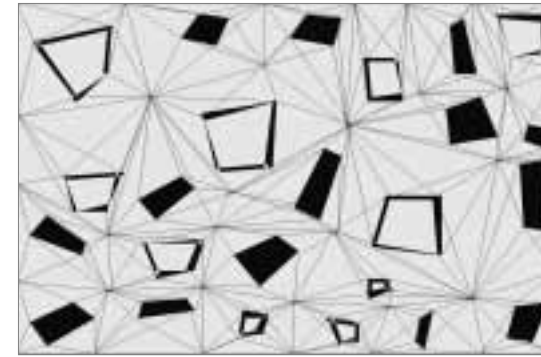
- La caratterizzazione meccanica delle armature ordinarie e da precompressione dopo esposizione

all'incendio.

La completa serie di apparecchiature disponibili presso il Laboratorio Prove Materiali (Campus Leonardo) permette di eseguire prove molto sofisticate, in controllo di spostamento o di deformazione (capacità delle presse da 10 a 500t), e ciò grazie anche ai notevoli investimenti fatti negli ultimi anni per l'aggiornamento dell'elettronica di controllo e per la strumentazione. Sono inoltre in fase di realizzazione un banco per l'estrazione degli infissi metallici dal calcestruzzo (anche per le certificazioni richieste dall'industria) ed un complesso pressa-forno per la prova a caldo di provini di qualsivoglia materiale, ed in particolare, di materiali cementizi e lapidei.

Queste attrezzature saranno completate entro pochi anni da quelle della nascente sezione del laboratorio del Polo di Lecco, ove saranno possibili prove su grandi elementi strutturali. Si delinea così un sistema di competenze aperto alle Imprese ed alla Pubblica Amministrazione, per la fornitura di servizi indirizzati alla sicurezza ed alla durabilità dei materiali cementizi e delle costruzioni.

11. modellazione ad elementi finiti della microstruttura della pasta di cemento



□ cemento anidro  
 ■ poro  
 — silicato di calcio idrato

12. prova di carico di un tegolo prefabbricato e precompresso in calcestruzzo fibrorinforzato

