



Università  
degli Studi  
di Salerno

Seminario di inaugurazione della mostra

# PONTEGGIANDO



“Strutture da Ponte: Modelli, tecnologie,  
aspetti paesaggistici e territoriali”

*Lunedì 24 Maggio 2010*

*Aula delle Lauree*

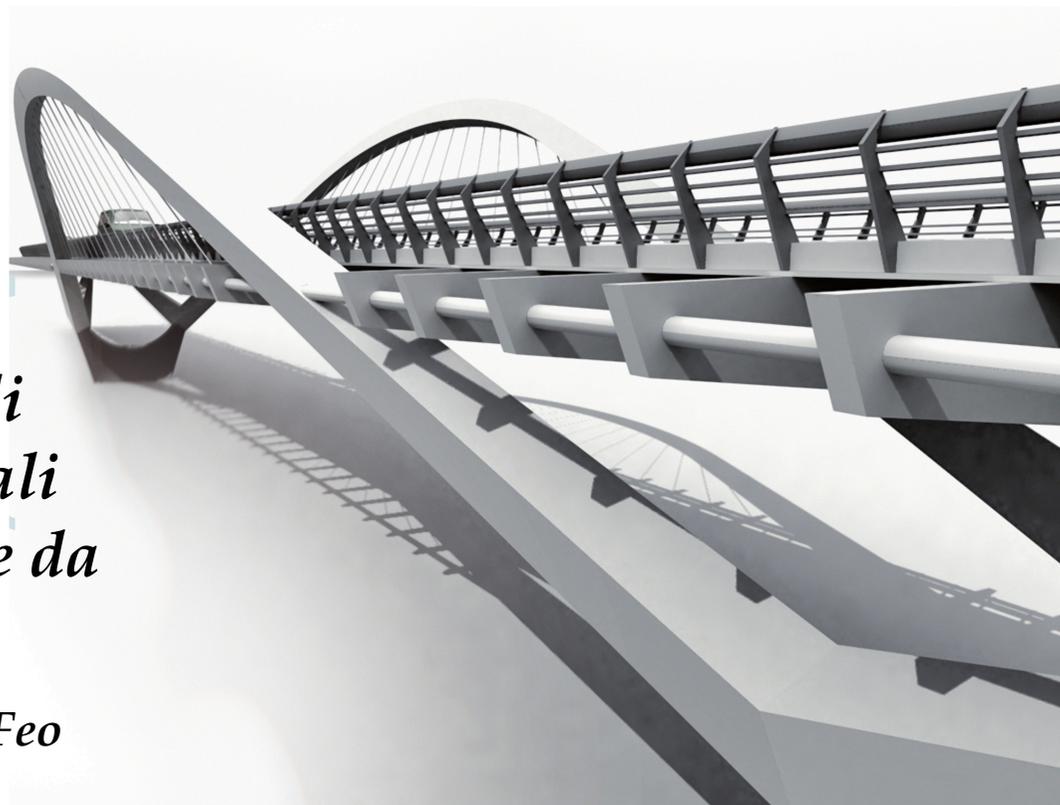
*Facoltà di Ingegneria*

*Università degli Studi*

*di Salerno*

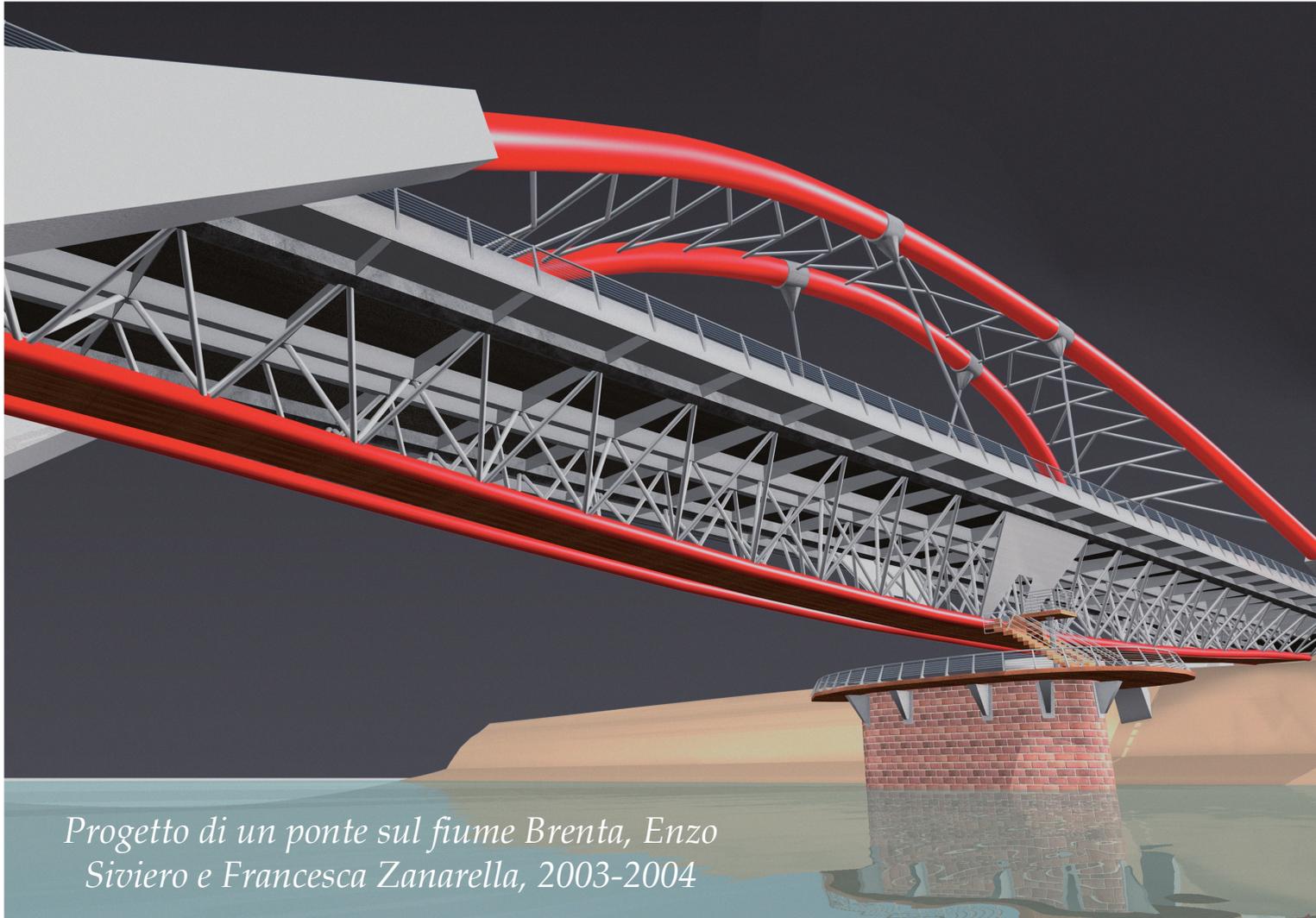
*Sull'ottimizzazione di  
forma e l'uso di materiali  
innovativi nelle strutture da  
ponte*

*Fernando Fraternali e Luciano Feo*



# PARTE I

## SULL'OTTIMIZZAZIONE DI FORMA DELLE STRUTTURE DA PONTE



*Progetto di un ponte sul fiume Brenta, Enzo  
Siviero e Francesca Zanarella, 2003-2004*

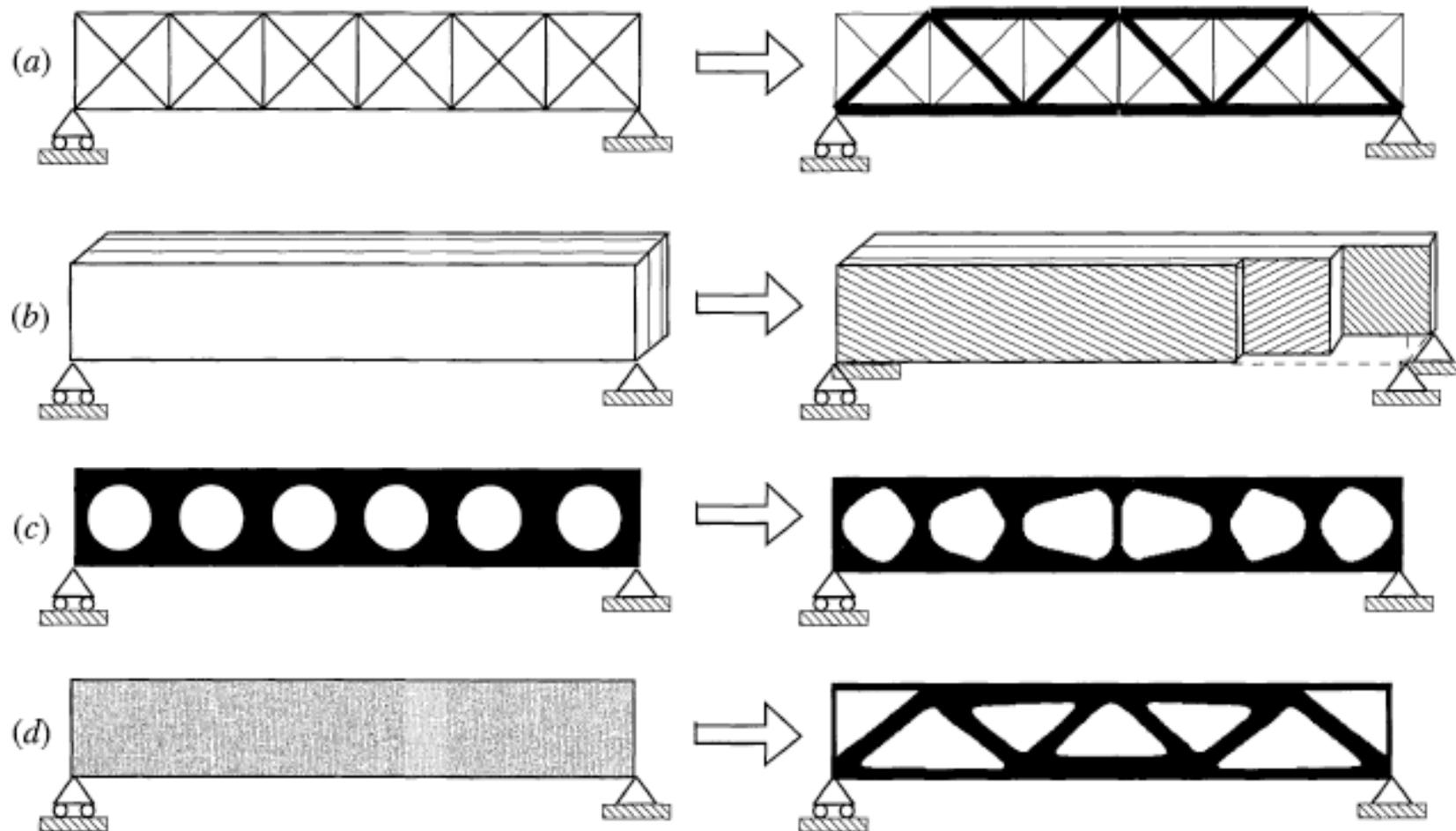


- La ricerca della forma ottimale di una struttura, sulla base di criteri statici, funzionali ed estetici, ha sempre attratto l'attenzione degli ingegneri, degli architetti e dei ricercatori.
- Costruzioni grafiche, modelli in scala ridotta ed analogie fisico-meccaniche sono state utilizzate sin dall'antichità per aiutare la fase creativa del processo di progettazione di una costruzione.
- Mirabili anticipazioni delle tecniche moderne di “*conceptual design*” si ritrovano, com'è ben noto, nelle opere di *Antoni Gaudì* ispirate da modelli funicolari, forme organiche e superfici curve, nonché nelle ricerche di *A.G.M. Michell* sui reticoli curvi di aste tese o compresse e negli studi di *J.C. Maxwell* sulle strutture reticolari in regime di sforzo “pieno”.



- L'ottimizzazione di forma delle strutture da ponte riveste una particolare importanza, coinvolgendo aspetti tecnici e paesaggistici di notevole rilievo.
- Da sempre la costruzione di ponti di grande luce rappresenta infatti una “sfida” architettonica, strutturale e tecnologica lanciata dall'uomo nei confronti dell'ambiente.
- Nella moderna letteratura tecnica il termine ottimizzazione di forma viene impiegato per indicare quella fase della progettazione che si occupa della ricerca della configurazione ottimale di un dominio di progetto.
- Si realizza tipicamente muovendo i “bordi” di una configurazione di primo tentativo, in modo tale da minimizzare (o massimizzare) un'opportuna funzione obiettivo (o “*fitness*”), sotto assegnati vincoli di progetto.
- L'ottimizzazione di forma contempla la ricerca di dimensioni degli elementi strutturali (“*sizing optimization*”), materiali (“*material optimization*”), geometrie (“*shape optimization*”) e topologie ottimali (“*topology optimization*”).

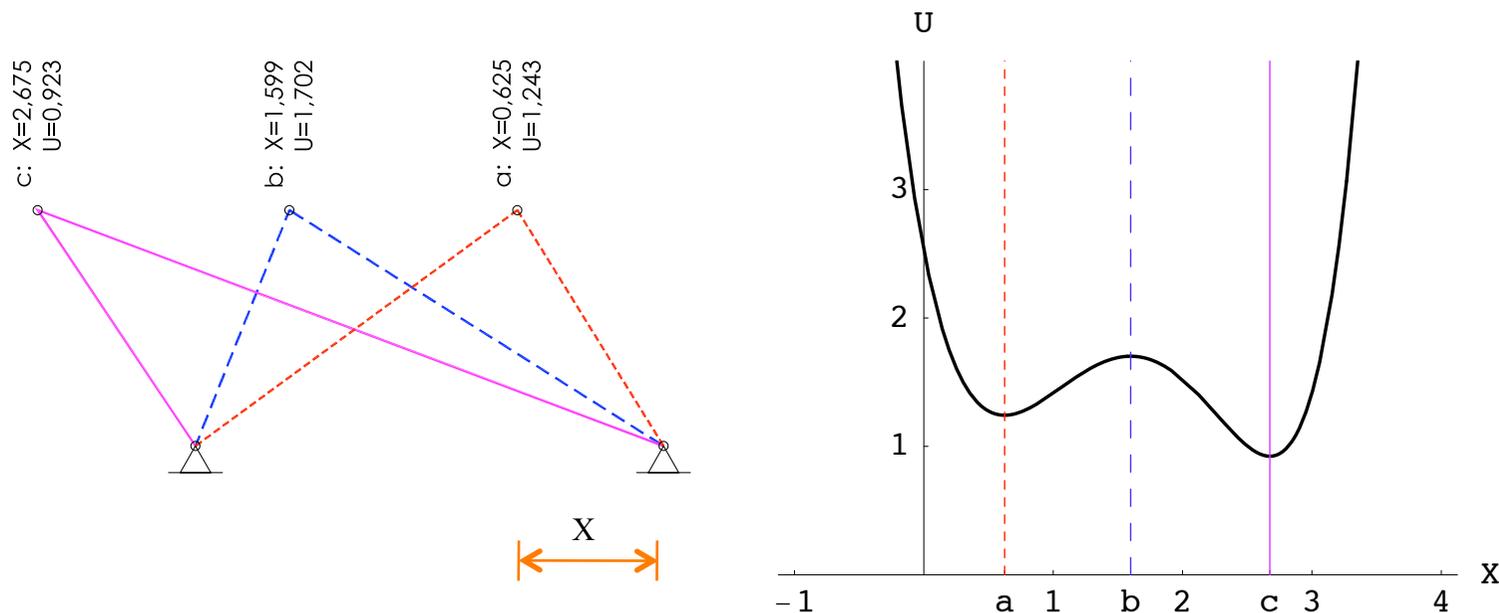




(\*) Four categories of structural optimization: (a) sizing optimization; (b) material optimization; (c) shape optimization; and (d) topology optimization. The initial problems are shown at the left-hand side and the optimal solutions are shown at the right.

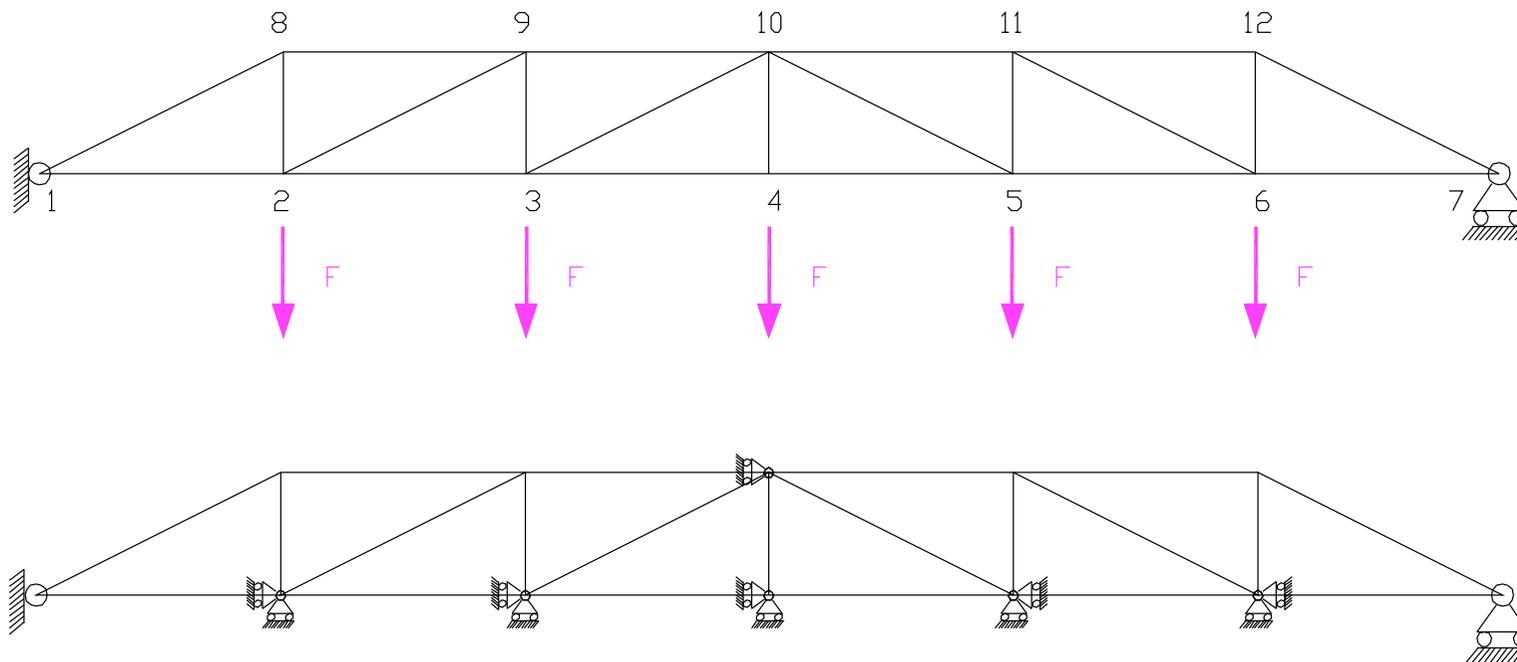
(\*) Da: O Sigmund, "Topology optimization: a tool for the tailoring of structures and materials", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* (2000) 358, 211-227.

- Tipiche funzioni obiettivo e di vincolo coinvolte nell'ottimizzazione di strutture da ponte riguardano il minimo peso, la minima deformabilità, il controllo delle vibrazioni, la stabilità dell'equilibrio, l'ampiezza delle tensioni locali e la duttilità strutturale.
- A questi obiettivi possono associarsi finalità di carattere estetico, ambientale e paesaggistico, conducendo il progettista ad un formidabile problema di ottimizzazione integrata multi-obiettivo.
- I problemi di ottimizzazione strutturale sono di norma non-convessi e quindi affetti da molteplici ottimi locali, come dimostra il semplice esempio che segue ad una sola variabile  $X$ , relativo alla ricerca della configurazione di minima deformabilità elastica  $U$  di una struttura reticolare ad un nodo "adattivo".



Da: *F. Fraternali et al., "On the structural shape optimization through variational methods and evolutionary algorithms", Mech. Adv. Mat. Struct., in press, 2010.*

- I problemi di ottimizzazione strutturale coinvolgono uno *spazio fisico*, che definisce i vincoli imposti alla deformazione reale della struttura, ed uno *spazio di progetto*, che definisce invece i vincoli imposti alle variabili che definiscono il problema di ottimizzazione (variabili di controllo o “controls”).



Spazio fisico (alto) e spazio di progetto (basso) per l'ottimizzazione di forma di una struttura reticolare.

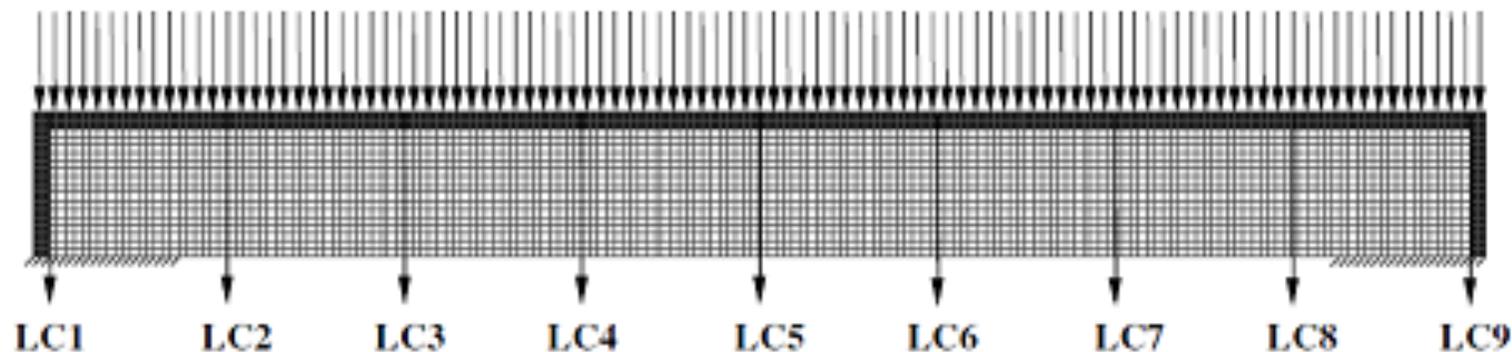


- La non-convessità del problema matematico alla base dell'ottimizzazione di forma richiede l'adozione di tecniche di soluzione che siano capaci di investigare in maniera ampia lo spazio di progetto, muovendosi con agilità tra diversi punti di ottimo locali.
- Negli anni 1960 furono ampiamente utilizzati i metodi della *Programmazione Matematica* (problemi di programmazione lineare, quadratica e sequenziale), mentre in anni più recenti si sono andati diffondendo approcci più adatti a problemi dipendenti da un elevato numero di variabili, quali, ad esempio, i *Criteri di Ottimalità*, la "*Evolutionary Structural Optimization*" (ESO), il "*Simulated Annealing*", gli *Algoritmi Genetici* (GA), la "*Generalized Pattern Search*" ed il "*Surrogate Management Framework*".
- Molti di questi metodi sono "derivative free" e si basano sul calcolo ripetuto della fitness di opportune soluzioni di tentativo, fino a quando un prefissato criterio di terminazione viene raggiunto.
- Particolare successo hanno riscontrato nelle applicazioni strutturali la *Evolutionary Structural Optimization* e gli *Algoritmi Genetici*.

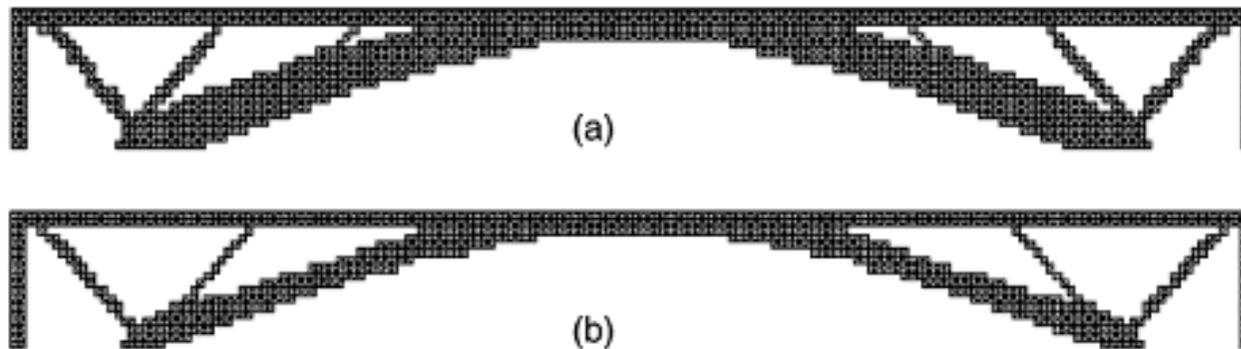


# EVOLUTIONARY STRUCTURAL OPTIMIZATION (ESO)

- La ESO si fonda sulla discretizzazione di un dominio di progetto continuo in celle (o elementi) assimilabili ai pixel di una immagine raster.
- A tale dominio vengono imposte opportune condizioni di vincolo e di carico, che includano sia carichi fissi che carichi mobili.
- La sua risposta meccanica viene analizzata con il metodo degli elementi finiti, inserendo o rimuovendo materiale nei singoli elementi, sulla base del valore locale di una funzione densità vuoto/pieno.
- Pixel “grigi”, corrispondenti ad elementi in materiale poroso, possono essere generati durante il processo di ottimizzazione, ma solo pixel bianchi (vuoti) o neri (pieni) vengono restituiti al termine del processo di “*topology optimization*”



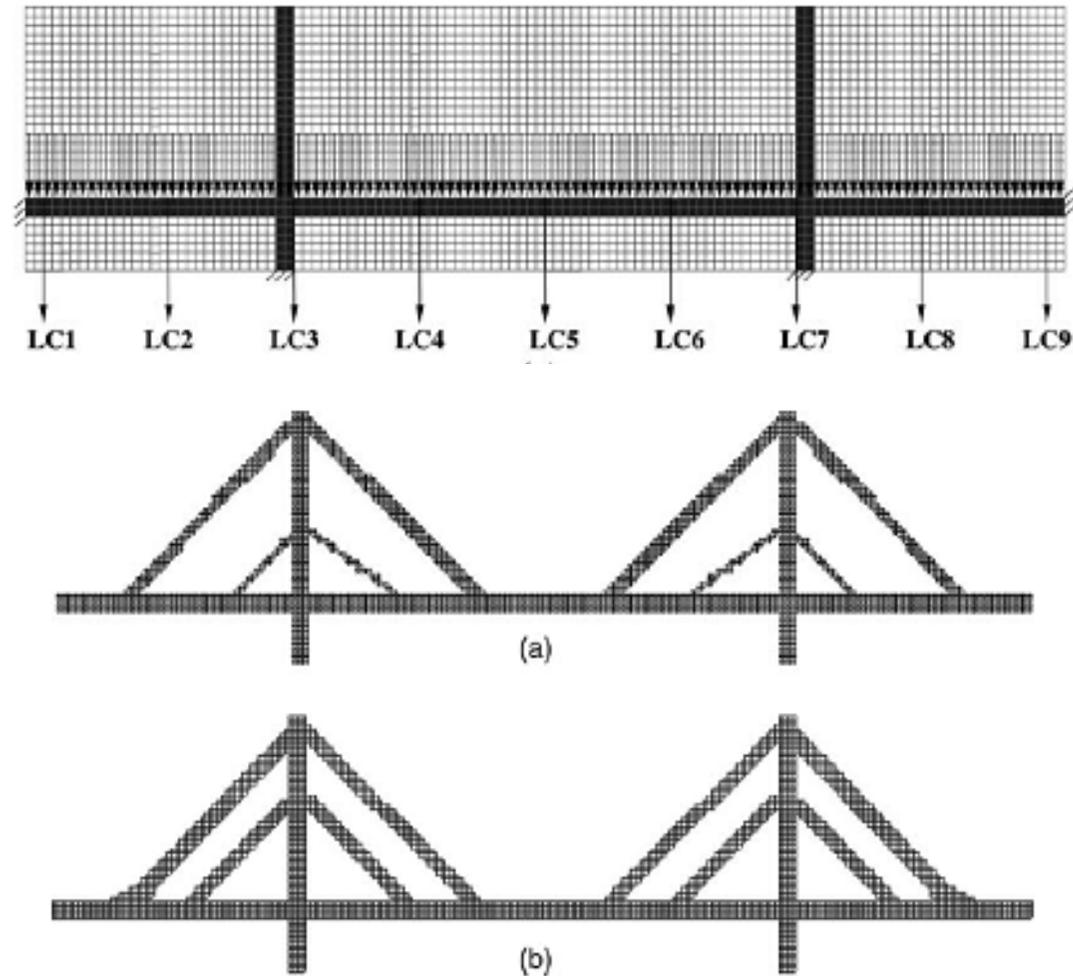
- Uno dei risultati dell'analisi agli elementi finiti è la distribuzione degli sforzi nel dominio di progetto, che porterà ad individuare le parti soggette a concentrazioni di sforzo e quelle sottoposte invece a basse tensioni locali.
- L'idea base della ESO è di rimuovere materiale dalle celle poco sollecitate, sulla base di un'analisi di sensitività, che determini le modificazioni della risposta strutturale indotte da piccole variazioni delle densità di materiale nei diversi “pixel” (variabili di progetto).



Topologie ottimali di un ponte ad arco sotto un carico uniformemente distribuito (a) e l'azione combinata di un carico uniforme e carichi mobili (b).

Da: *H. Guan et al., "Bridge topology optimization with stress, displacement and frequency constraints", Comput. Struct (2003) 81, 131-145.*





Topologie ottimali di un ponte strallato sotto un carico uniformemente distribuito (a) e l'azione combinata di un carico uniforme e carichi mobili (b).

Da: *H. Guan et al., Comput. Struct (2003) 81, 131-145.*

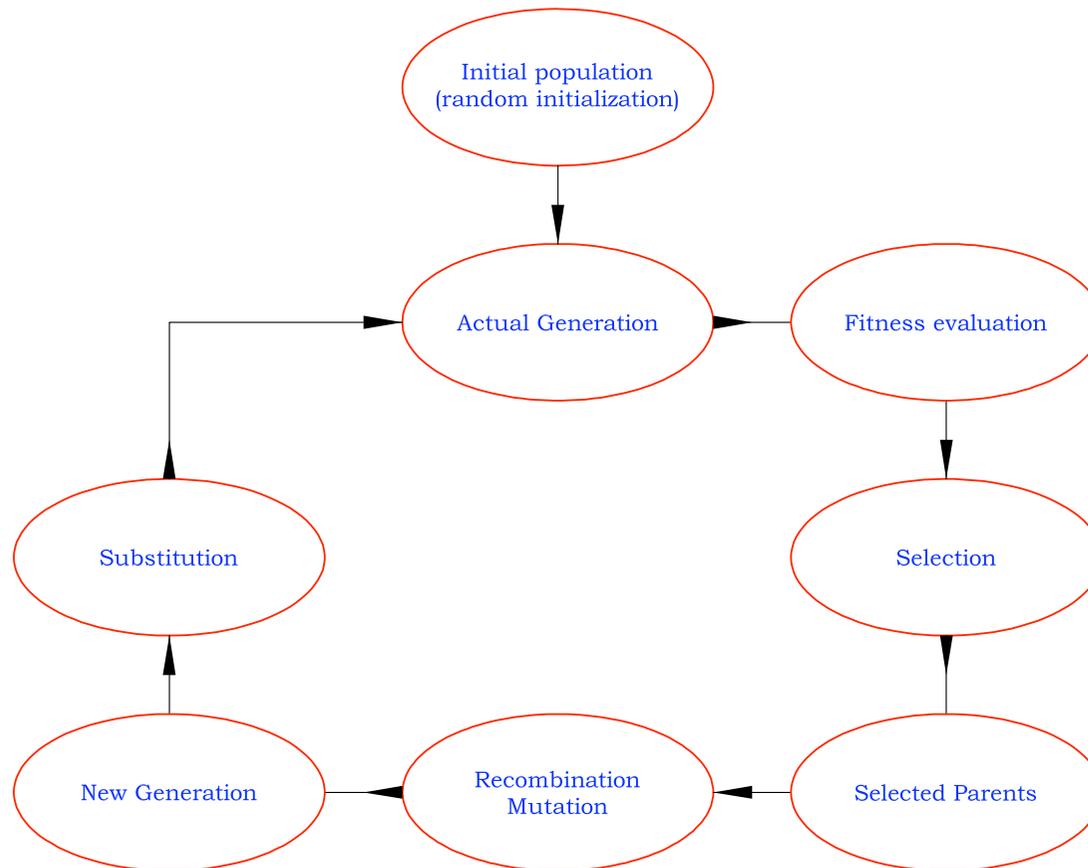
*Studio in collaborazione con Vittorio Armenante, Eduardo Iaquinandi, Carmine Palimento Anna Maria Rosanova, Marcella Toraldo*

# OTTIMIZZAZIONE DI FORMA MEDIANTE ALGORITMI GENETICI (GA)

- I GA formano una classe di metodi di soluzioni di problemi di ottimizzazione ispirati ai principi della teoria Darwiniana della evoluzione delle specie. Sono adatti a problemi caratterizzati da uno spazio di ricerca ampio e complesso, del quale non si conoscano a priori informazioni di dettaglio.
- Essi lavorano su una popolazione di “*individui*” aventi come “*geni*” le variabili di progetto. Una volta generata una popolazione iniziale di  $n$  individui, corrispondenti a soluzioni di primo tentativo, il GA procede con il calcolo della fitness di ciascun individuo (“*fitness evaluation*”).
- In una seconda fase, nuovi individui vengono generati mediante meccanismi di ricombinazione e mutazione (“*recombination*” e “*mutation*”), creando una nuova generazione di  $n+m$  individui che sostituisce quella precedente.
- Da questa popolazione vengono poi estratti  $n$  individui ottimali, sulla base di un opportuno meccanismo di selezione (“*selection*”).
- L'intero processo viene reiterato fino a quando viene raggiunto un prefissato numero massimo di generazioni.



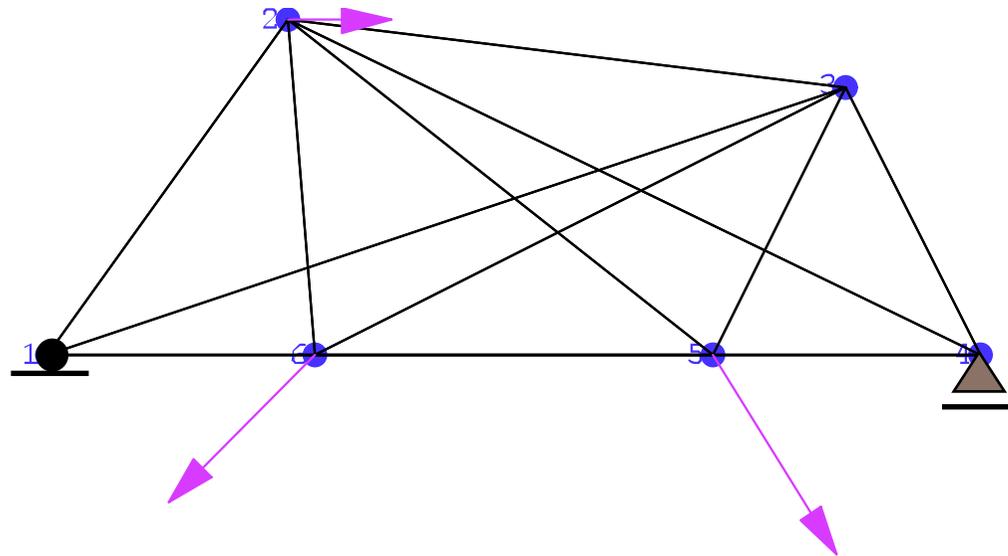
- Il segreto del comprovato successo dei GA in svariati problemi di ottimizzazione risiede essenzialmente nella particolare combinazione che essi offrono di un meccanismo di ricerca di tipo deterministico (“*ricombination*”) con uno puramente stocastico (“*mutation*”). Il primo consente di affinare la ricerca in prossimità di un minimo locale, mentre il secondo permette all’algoritmo di “saltare” da un minimo locale ad un altro.



Rappresentazione schematica di un Algoritmo Genetico.

Da: F. Fraternali et al., “Optimal design of composite granula protectors”, *Mech. Adv. Mat. Struct.* (2010) 17, 1-19.

- L'applicazione dei GA a problemi di ottimizzazione strutturale si ottiene agevolmente quando si abbia a disposizione una struttura di sfondo (*“ground structure”*).
- Di questa struttura si possono ricercare attraverso un GA le posizioni dei nodi (*“shape optimization”*), le dimensioni ed i materiali degli elementi costituenti (*“material and sizing optimization”*) e le connessioni tra gli elementi stessi (*“topology optimization”*), che ottimizzino una data funzione obiettivo sotto vincoli assegnati.



Struttura di sfondo di un problema di ottimizzazione di una struttura reticolare.



- Un problema di ottimizzazione di forma di una struttura reticolare di sfondo si può formulare, ad esempio, ricercando i valori degli sforzi nelle aste  $N_{ij}$ , delle aree delle sezioni trasversali  $A_{ij}$ , dei moduli di Young  $E_{ij}$  e delle posizioni dei nodi  $X_i$  tali che una data funzione obiettivo o “fitness”  $F(N_{ij}, A_{ij}, M_{ij}, X_i)$  sia minimizzata o massimizzata.
- Se in soluzione risulta, in particolare, che uno sforzo  $N_{ij}$  è pari a zero, ne consegue che l’asta corrispondente è stata eliminata dal processo di ottimizzazione.
- Come si è già detto, tipiche funzioni di fitness e di vincolo riguardano il minimo peso, la minima deformabilità, il controllo delle vibrazioni, la stabilità dell’equilibrio, l’ampiezza delle tensioni locali e la duttilità strutturale.
- Nel caso dell’ottimizzazione di minimo peso si potrà porre, ad esempio

$$F = \sum |N_{ij}| L_{ij}$$

essendo  $L_{ij}$  le lunghezze delle aste, mentre in un problema di minimizzazione della deformabilità elastica si porrà:

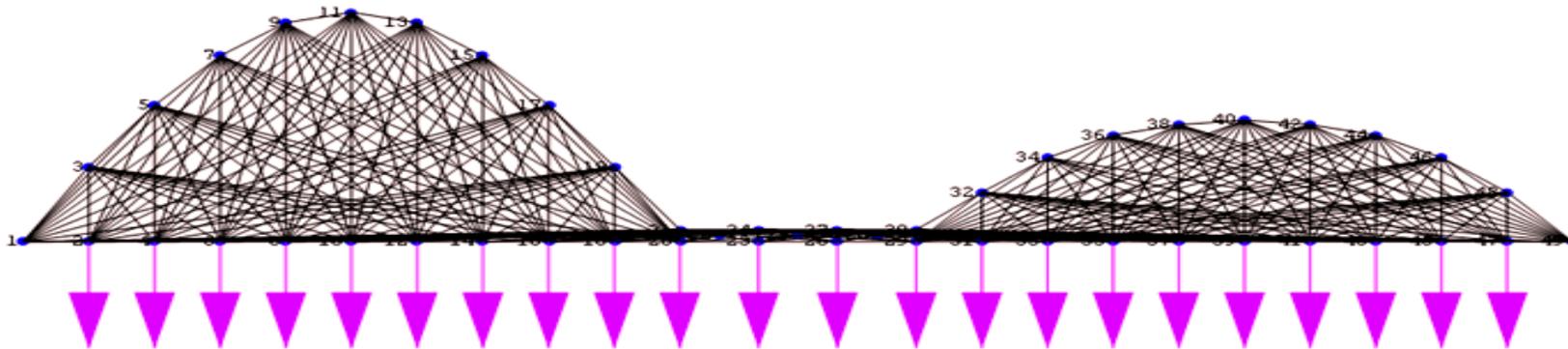
$$F = \frac{1}{2} \sum \frac{N_{ij}^2}{E_{ij} A_{ij}} L_{ij}$$

Tra le equazioni di vincolo andranno incluse ovviamente, in ogni caso, le equazioni di equilibrio dei nodi della travatura.

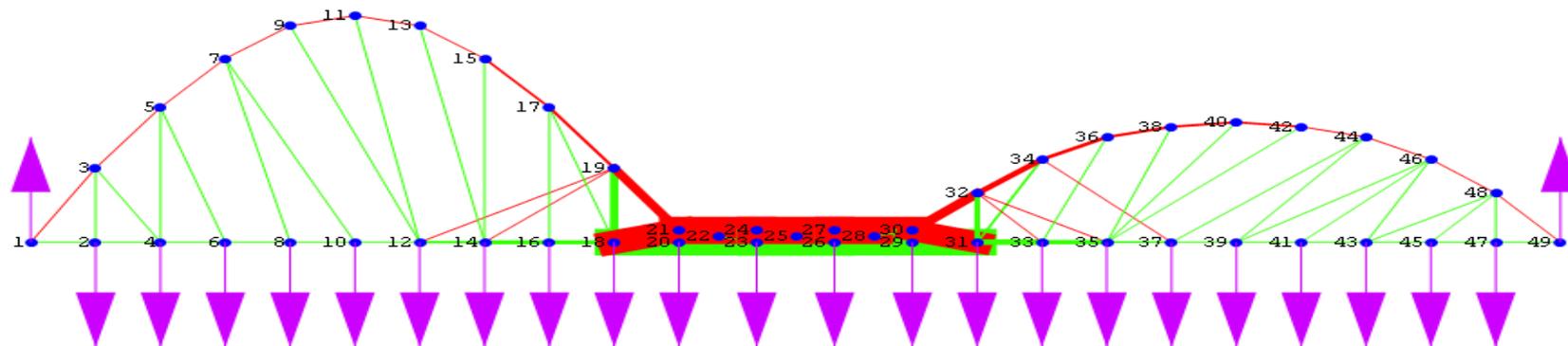


# OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA DI MINIMO PESO DI UNA STRUTTURA RETICOLARE DA PONTE

Struttura di sfondo

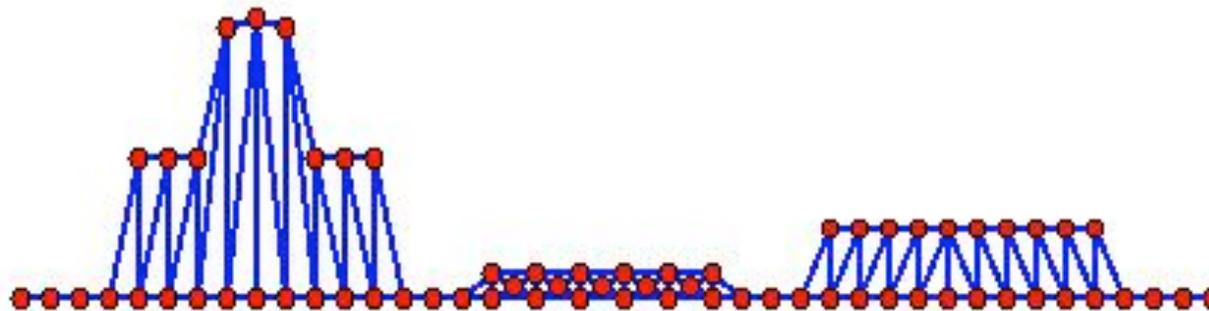
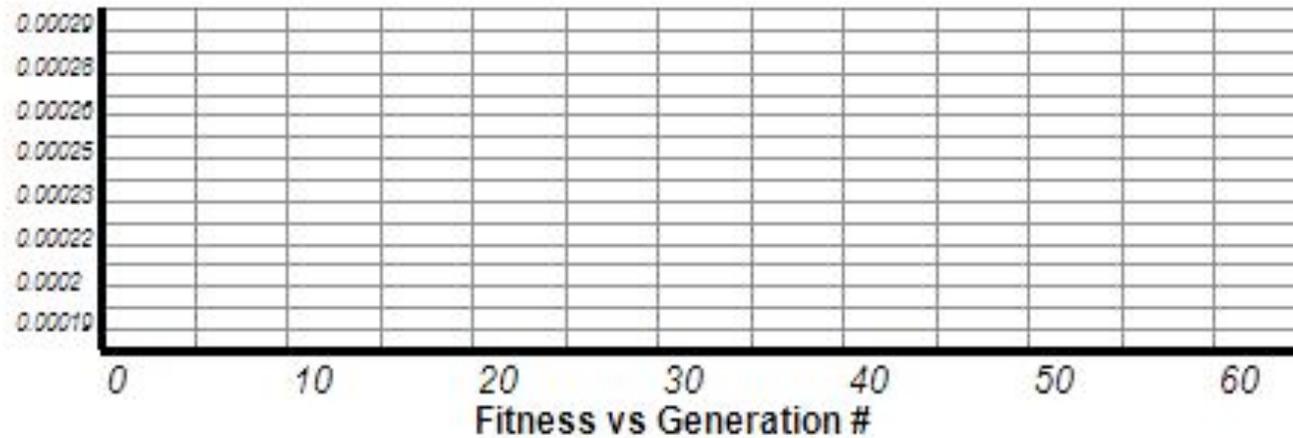


Topologia ottimale



Studio di ottimizzazione svolto in collaborazione con *Bernardino D'Ambrosio*

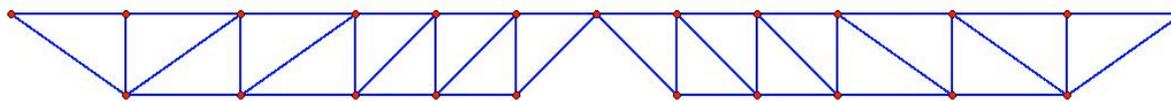
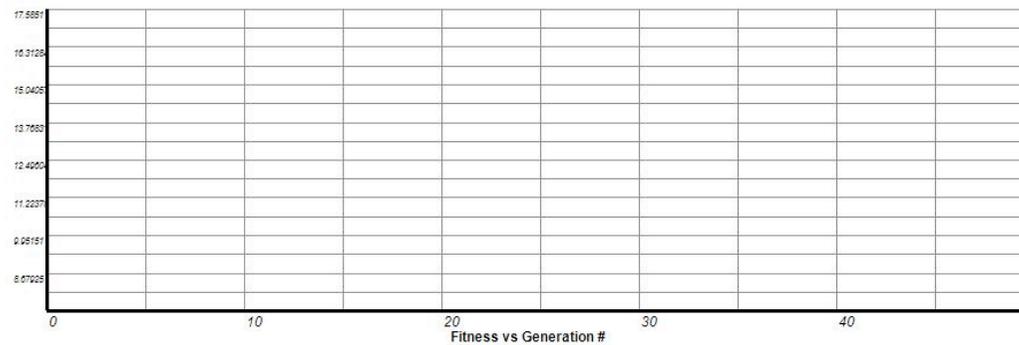
# OTTIMIZZAZIONE GEOMETRICA DI MINIMA DEFORMABILITA' DI UNA STRUTTURA RETICOLARE DA PONTE



Studio di ottimizzazione svolto in collaborazione con *Rino Conte e Giuseppe Rocchetta*

# OTTIMIZZAZIONE DI UN PONTE AD ARCATE

*Progetto di un ponte sul fiume Adige, Enzo Siviero e Anna Pozza, 1996-1997*



Studio di ottimizzazione svolto in collaborazione con *Rino Conte e Giuseppe Rocchetta*

# OTTIMIZZAZIONE DI FORMA DELLE TRAVATE DI UN PONTE IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO

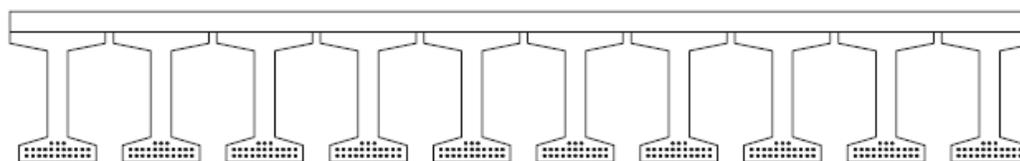
**Table 2** Design variable values sets for example 1

Design variable	Number of value	Values
Number of prestressed beam ( $n_b$ )	8	7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14
Height of beam ( $h_b$ )	16	70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 150
Bottom flange width ( $b_b$ )	16	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105
Web thickness ( $b_w$ )	8	15, 17, 20, 22, 25, 30, 35, 40
Top flange thickness ( $t_t$ )	8	8, 10, 12, 15, 18, 20, 22, 25
Bottom flange thickness ( $t_b$ )	8	15, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 35
Top sloped thickness ( $p_t$ )	8	5, 8, 10, 12, 15, 17, 20, 25
Bottom slope thickness ( $p_b$ )	8	5, 8, 10, 12, 15, 17, 20, 25
Number of prestressing steel ( $n_{ps}$ )	16	6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36

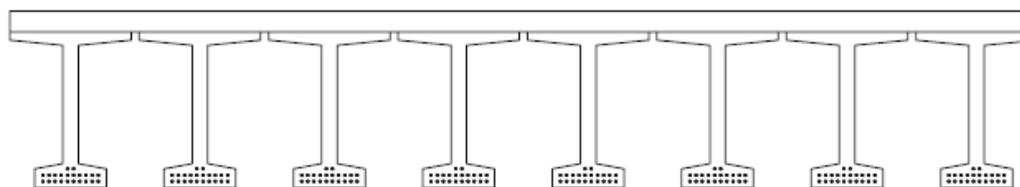
**Table 4** Values of design variables and cost function for the real life project and for the solution of this study

Design	$n_b$	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$	$C$
Real life project	10	125	75	20	10.7	16	7.3	8	25	158,215
This study	8	150	70	15	8	18	5	5	22	117,560

**Fig. 5** Cross-section of bridge superstructure for **a** the real life project and for **b** the best solution obtained in this study



(a) The real life project



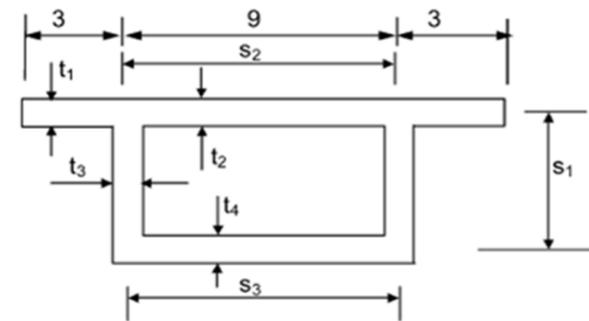
(b) The best solution obtained in this study

Da: Z. Aydin e Y. Ayvaz, "Optimum topology and shape design of prestressed concrete bridge girders using a genetic algorithm", *Struct. Multidisc. Optim.* (2010) 41, 151-161. Ricerca svolta in collaborazione con Vittorio Armenante

# OTTIMIZZAZIONE DI FORMA CON CONTROLLO DELLE VIBRAZIONI DI UN PONTE CON TRAVI A SEZIONE SCATOLARE

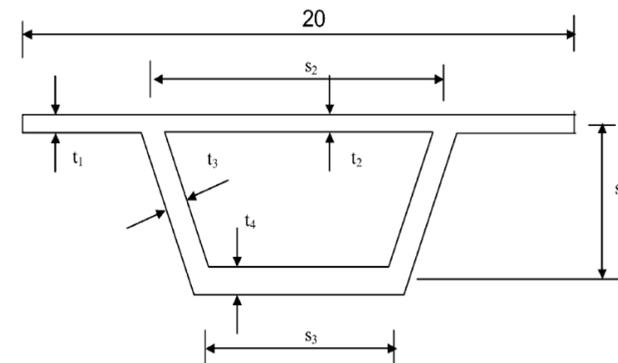
## FORMA 1

Rispetto ad una soluzione iniziale, l'ottimizzazione con massimizzazione delle frequenze di vibrazione e vincoli sul volume ha condotto ad incrementare la frequenza fondamentale dell' 87%, mentre l'ottimizzazione con minimizzazione del volume e vincoli sulle frequenze di vibrazione ha portato a ridurre il volume del materiale impiegato del 56%.



## FORMA 2

L'ottimizzazione con massimizzazione delle frequenze di vibrazione e vincoli sul volume ha condotto ad incrementare la frequenza fondamentale dell' 90.6%, mentre l'ottimizzazione con minimizzazione del volume e vincoli sulle frequenze di vibrazione ha portato a ridurre il volume del materiale impiegato del 54.2%.



Da: N. Taysi e M. Ozacka, "Free vibration analysis and shape optimization of box-girder bridges in straight and curved planform", *Engng. Struct.* (2002) 24, 625-637. Ricerca svolta in collaborazione con Stefano Alfano.

## PARTE II

# PONTI IN MATERIALI INNOVATIVI

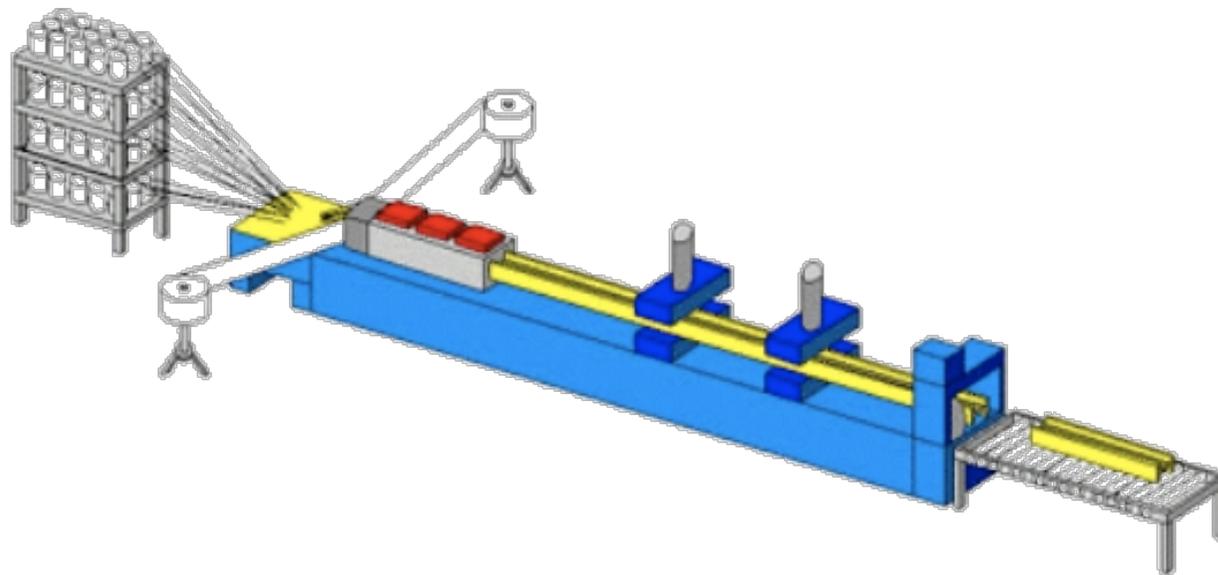


*Ponte strallato con struttura in profili pultrusi di fibre di vetro, Kolding, Danimarca.*

Ricerca svolta in collaborazione con *Paola Amendola e Giusy Oliva.*

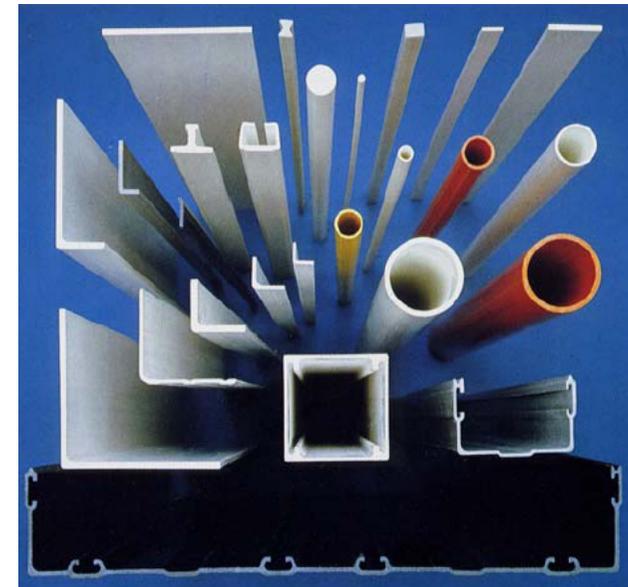
# STRUTTURE IN MATERIALE COMPOSITO FIBRO-RINFORZATO REALIZZATE MEDIANTE PROFILI PULTRUSI

I pultrusi sono manufatti in polimero fibrorinforzato che vengono prodotti industrialmente attraverso un processo completamente automatizzato chiamato pultrusione. La pultrusione deriva il suo nome dal termine inglese *pultrusion* il quale, a sua volta, nasce dalla contrazione di due parole: *pull* (tirare) ed *extrusion* (estrusione).



# VANTAGGI LEGATI ALL'USO DEI PROFILI PULTRUSI

- **Leggerezza e facilità di trasporto**
- **Rapidità e facilità di installazione**
- **Resistenza alla corrosione**
- **Manutenzione e sicurezza**
- **Isolamento elettrico**
- **Trasparenza alle onde elettromagnetiche**
- **Varietà di colori**
- **Risparmi in termini di finiture**

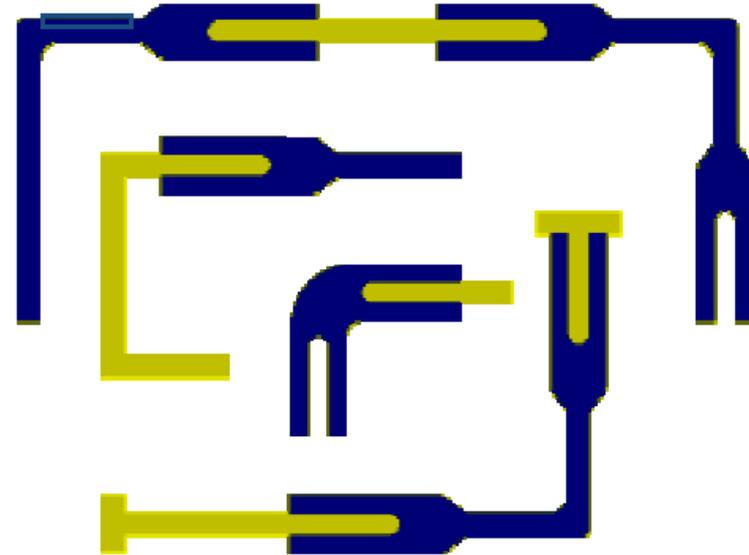


# COLLEGAMENTI DEI PROFILI PULTRUSI 1/2

## Conessioni integrate meccaniche e a base di adesivi

Le giunzioni possono essere fatte anche con sostanze adesive; nel caso di collegamenti molto importanti, o fortemente cementati, si può usare una giunzione integrata meccanica ed a base di adesivi.

Sono state brevettate una serie di forme dette “Combi profiles”, che risultano utili per la combinazione dei diversi profili.



# COLLEGAMENTI DEI PROFILI PULTRUSI 2/2

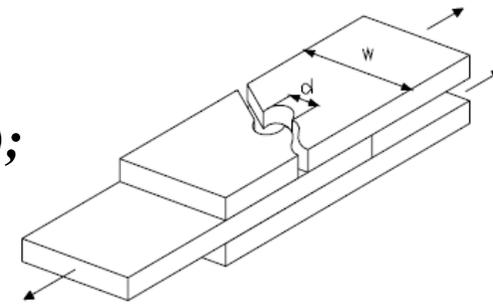
## Conessioni bullonate

Le connessioni bullonate nei compositi presentano delle specificità dovute all'ortotropia del materiale. Alcuni ricercatori ne hanno analizzato le tipiche modalità di rottura al variare del diametro dei bulloni, dell'interasse tra i fori, delle distanze dei fori dai bordi, nonché della struttura del pacchetto di laminazione e dell'orientamento delle fibre rispetto alla direzione del carico.

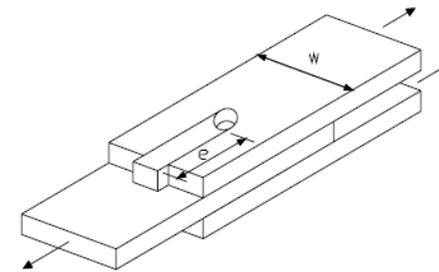


# MODALITA' DI CRISI DELLE GIUNZIONI BULLONATE

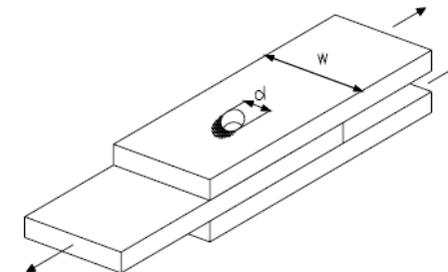
*a) rottura per strappo del piatto (net-section failure);*



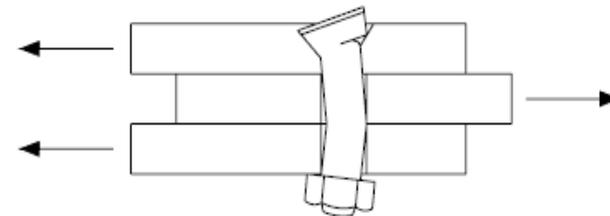
*b) rottura per strappo del bullone (shear-out failure);*



*c) rottura per rifollamento del foro (bearing failure);*



*d) rottura del bullone per taglio (fastener shear failure).*



# ATTIVITA' SPERIMENTALE PRESSO L'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

Allo scopo di studiare il comportamento di connessioni bullonate in strutture di FRP per applicazioni nel settore dell'ingegneria civile, presso il *Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture* del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno si sta svolgendo un'articolata campagna di prove sperimentali.



Gruppo di Ricerca coordinato dai  
Proff. Luigi Ascione e Luciano Feo



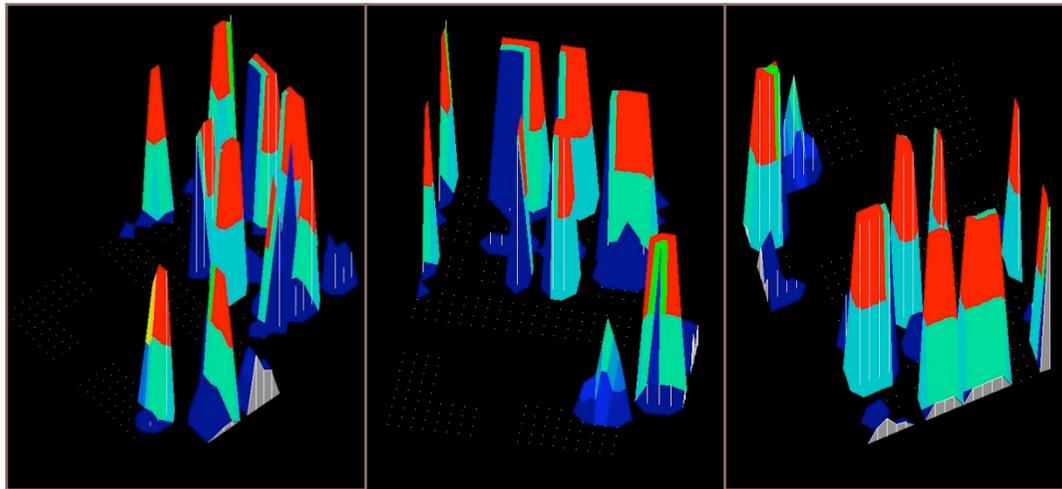
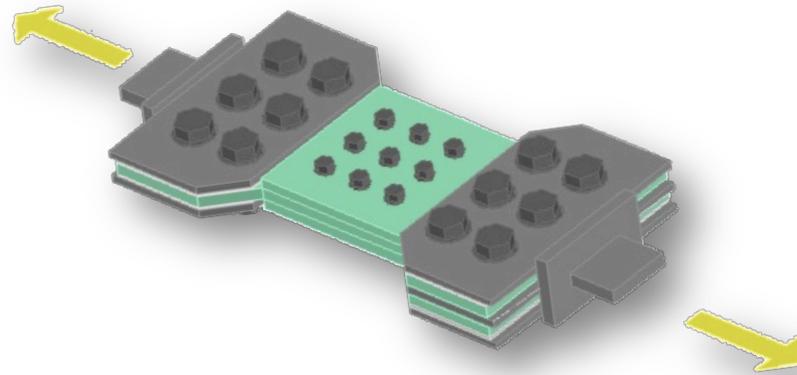
# OBIETTIVI DELLE PROVE:

- a) Valutazione della *ripartizione degli sforzi di taglio* tra i differenti bulloni al variare del numero di file di bulloni e dal numero di bulloni per fila;
- b) Definizione della *distanza di estinzione* delle tensioni da rifollamento trasmesse dai bulloni agli elementi collegati.



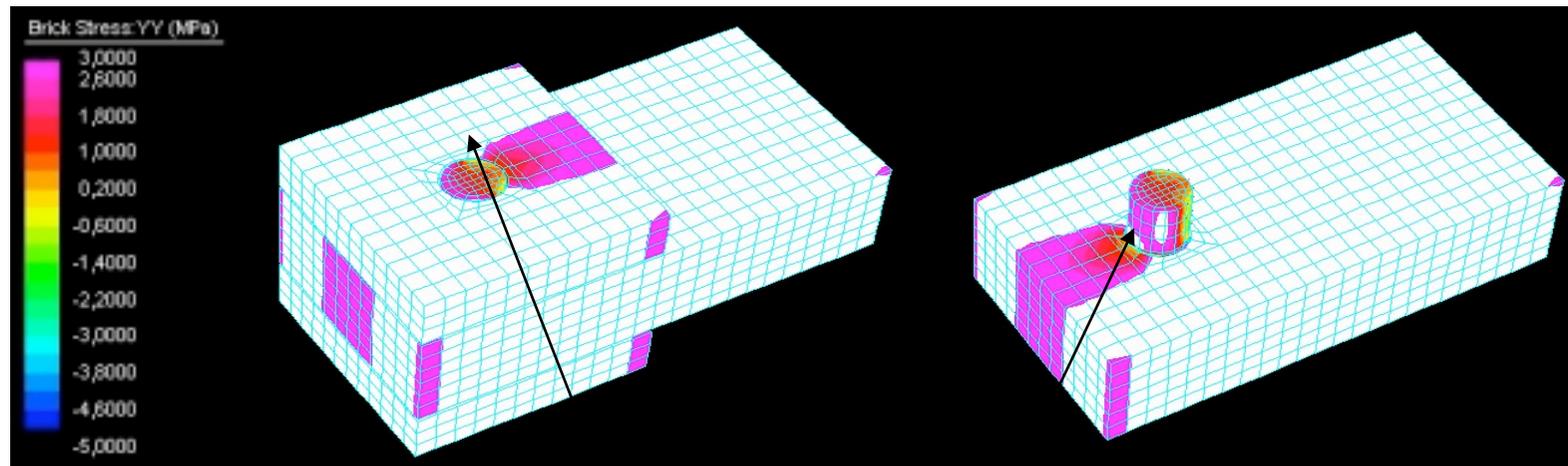
# RIPARTIZIONE DEGLI SFORZI DI TAGLIO

Una tipologia di connessione bullonata che merita particolare interesse da un punto di vista dell'analisi della *ripartizione degli sforzi taglienti tra i bulloni* è quella caratterizzata da tre file di bulloni e tre bulloni per fila.



# DISTANZA DI ESTINZIONE

Si è visto che ad una distanza pari a *cinque volte* il diametro del bullone, misurata a partire dal foro di alloggiamento del bullone stesso, le tensioni trasmesse dal bullone al piatto si smorzano rapidamente.



Zone di rifollamento





La Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni (**CNR** - Prof. Ing. Franco Maceri, Presidente) ha istituito un documento normativo *“Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture realizzate con Profili Pultrusi di Materiale Composito Fibrorinforzato (FRP)”*, (**DT 205/2007**), che ha come scopo principale la divulgazione delle conoscenze necessarie per l'uso dei materiali compositi fibrorinforzati a fibre continue nel progetto di nuove costruzioni..

Gruppo di studio:

ASCIONE Prof. Luigi

ASCIONE Ing. Francesco

DICUONZO Ing. Adriano

FEO Prof. Luciano

GRIMALDI Prof. Antonio

LAUDIERO Prof. Ferdinando

MINGHINI Ing. Fabio

PECCE Prof. Marisa

RUSSO Prof. Salvatore

SAVOIA Prof. Marco

TULLINI Prof. Nerio

- Università di Salerno

- Università “Tor Vergata” - Roma

- Università di Ferrara

- Università di Salerno

- Università “Tor Vergata” - Roma

- Università di Ferrara

- Università di Ferrara

- Università del Sannio – Benevento

- Università IUAV - Venezia

- Università di Bologna

- Università di Ferrara



# RASSEGNA DI STRUTTURE DA PONTE IN PROFILI PULTRUSI

Le esperienze finora maturate in questo campo hanno riguardato soprattutto la realizzazione ponti strutture assemblabili e passerelle pedonali.



# FIBERLINE FOOTBRIDGE KOLDING , DANIMARCA



## Caratteristiche strutturali

- Ponte strallato con profili standard bullonati in GFRP
- Stralli con profili cavi in GFRP
- Altezza pilone: 18,5 m
- Altezza della trave: 1,5 m
- Lunghezza: 40,30 m
- Campata: 27 e 13 m
- Larghezza: 3,2 m
- Tempo di costruzione: 18 ore



# ABERFELDY FOOTBRIDGE ABERFELDY, SCOZIA, UK



## Caratteristiche strutturali

- Ponte strallato: ponte e piloni di elementi di ACCS-FRP incollati, altezza del pilone 17,5 m
- 2 piani, ciascuno di 20 cavi Parafil di 13-31 m di lunghezza
- Lunghezza: 113 m
- Campata: 63 m (centro campata)
- Larghezza: 2,2 m
- Tempo di costruzione: 10 settimane



# ROUTE 418 OVER THE SCHROON RIVER

WARRENSBURG, NY



## Caratteristiche strutturali

- Ponte con travi reticolari di acciaio: sostituzione della piattaforma in calcestruzzo con pannelli DuraSpan 766 in GFRP
- Giunzione: collegamenti bullonati tra pannelli e travi di acciaio
- Lunghezza: 49,17 m
- Larghezza: 7,67 m
- Tempo di costruzione: 10 settimane



# BIRDIE BRIDGE

IBARAKI PREFECTURE, GIAPPONE



## Caratteristiche strutturali

- Passerella con soletta tesa
- Elementi a conchiglia in CFCC precompressi, 16 cavi di Arapree, coni guida come bulloni da ancoraggio, fibre di Vinalon in calcestruzzo
- Lunghezza: 54,5 m
- Larghezza: 2,1 m
- Campata: 46,5 m



# MD 24 OVER DEER CREEK

CONTEA DI HARFORD, MARYLAND, USA



## Caratteristiche strutturali

- Ponte con travi reticolari di acciaio del 1934: sostituzione della piattaforma in calcestruzzo con pannelli sandwich in GFRP
- Giunzione: collegamenti bullonati fra pannelli e travi di acciaio
- Lunghezza: 38,16 m
- Larghezza: 9,60 m
- Tempo di costruzione: 2 settimane



# E.T. TECHTONICS BRIDGES

NATIONAL PARKS, USA, CANADA



## Caratteristiche strutturali

- Ponticelli a travatura reticolare con profili in GFRP bullonati
- Costruita all'inizio degli anni '80
- Circa 80 ponticelli fino ad oggi
- Campata: fino a 25 m



## COLLABORAZIONI

- *Paola Amendola, Stefano Alfano, Vittorio Armenante, Silvia Concilio, Rino Conte, Sabatino De Vita, Bernardino D'Ambrosio, Alessandro Graziano, Eduardo Iaquinandi, Mirka Mobilia, Giusy Oliva, Flora Rocco, Carmine Palimento, Giuseppe Rocchetta, Anna Maria Rosanova, Lucia Senatore, Marcella Toraldo*

## RINGRAZIAMENTI

- *Silvia Concilio*

