



Massimo Majowiecki*

*Osobiste doświadczenia z architekturą strukturalną:
od poszukiwania formy do projektowania „free form”*

*Personal experiences in Structural Architecture:
from form finding to free form design*

Wprowadzenie

Metoda empiryczna w poszukiwaniu formy konstrukcyjnej została powszechnie uznana za skuteczną, w miarę jak masywne formy budownictwa rozwijały się na przestrzeni dziejów. Stosując materiały kamienne, pracujące w jednorodnym stanie naprężenia, projektanci mogli – kierując się „intuicją statyczną” – kształtować skomplikowane konstrukcje, których stateczność zapewniał ciężar własny konstrukcji (il. 1a, b).

Od czasów drugiej rewolucji przemysłowej, kiedy upowszechniło się już stosowanie materiałów umożliwiających przenoszenie naprężeń rozciągających, wciąż poszukiwano form konstrukcyjnych i tworzono je, traktując prawa statyki jako gwarancję uzyskania estetycznego rezultatu. Dla konstrukcji membranowych i ciągnowych, których morfologia musi spełniać warunki równowagi w początkowym stanie naprężenia, poszukiwanie wstępnej formy konstrukcji jest koniecznością i stąd niezbędne jest przeprowadzenie procedury identyfikacji geometrii początkowej¹.

Współcześnie, zarówno architekci, jak i inżynierowie pochłonęli są nowym wyzwaniem: projektowaniem nazywanym „Free Form Design” (FFD) – nową modą podkreślającą przewagę efektu wizualnego nad

Introduction

The empirical method in structural form finding has achieved world-wide efficiency and recognition as massive forms’ building tradition has continued to expand in history. Through direct involvement of lithoid materials, working under unilateral state of stress, designers driven by “static intuitions” have largely succeeded in giving shape to complex constructions, stabilized by gravity acting on the structural dead load mass (Fig. 1a, b).

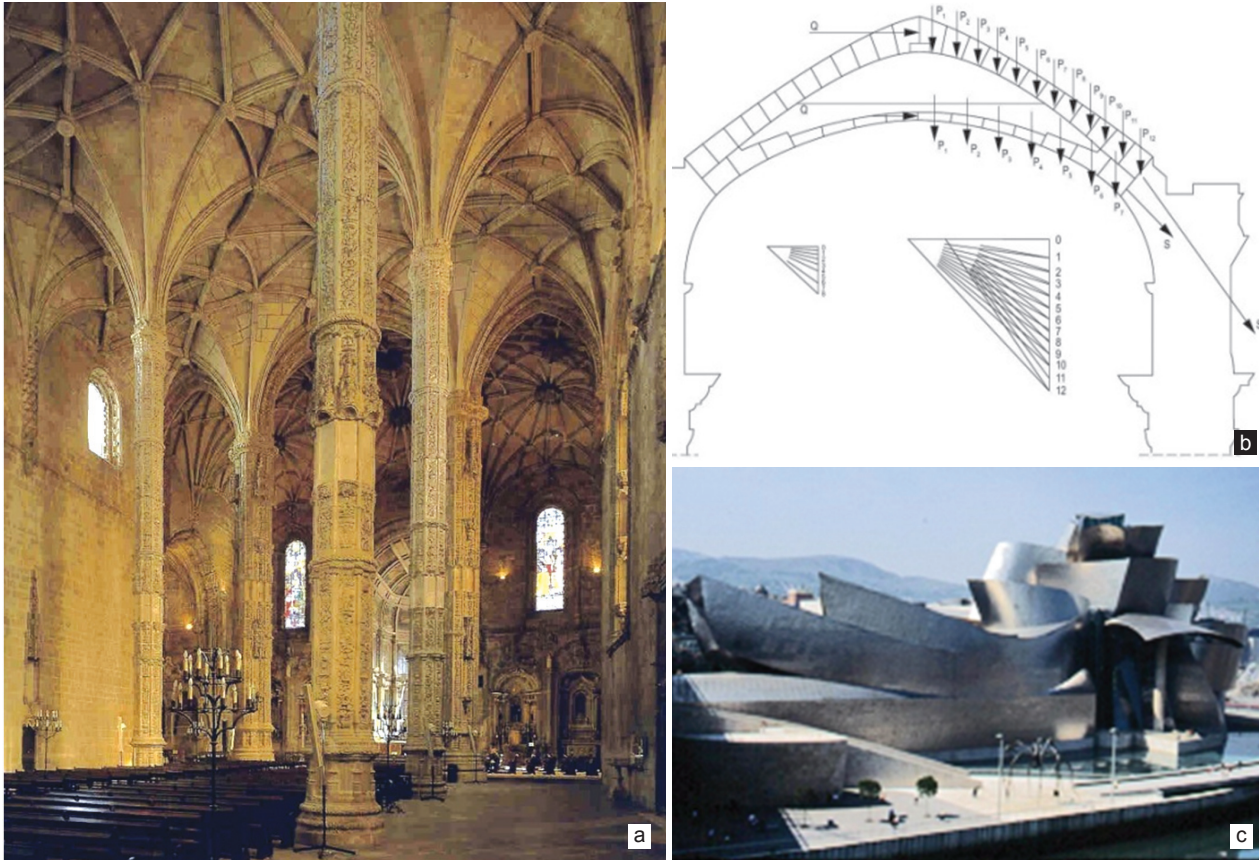
Ever since the second industrial revolution, with the help of materials able to carry tensile stresses, still the form of the structures have nevertheless been conceived and found observing the laws of statics, as a guarantee of an aesthetic result achieved. For membrane and cable structures, where the morphology must satisfy equilibrium conditions under an initial state of stress, finding the form of the structure is a “must” and, hence, a form finding procedure is required to identify the initial geometry.

Nowadays, architects and engineers alike are immersed in a new challenge: the Free Form Design (FFD): a new fashion with the prevalence of aesthetics over static rationality where the role played by the structures is merely to support the architectural design. This is a trend whose excellent illustration and one of the first examples is the Guggenheim Museum in Bilbao – hence often referred to as a “Bilbao effect” (Fig. 1c).

Many novel projects attempt to extend the “state of the art” but, according to personal experiences, new structural

* Uniwersytecki Instytut Architektury w Wenecji, Włochy/Venice University Institute of Architecture, Venice, Italy.

¹ Procedura ta nazywana jest w języku angielskim „form-finding process”.



Il. 1. a, b) architektura gotycka (klasztor Hieronimitów, Lizbona, 1517), c) „efekt Bilbao”
 Fig. 1. a, b) Gothic architecture (Jerónimos Monastery, Lisbon, 1517), c) The “Bilbao effect”

statyczną racjonalnością, w której jedyną rolą konstrukcji jest wsparcie projektu architektonicznego. Jest to kierunek, którego doskonałą ilustracją i jednym z pierwszych przykładów jest Muzeum Guggenheima w Bilbao – stąd często zjawisko to określane jest jako „efekt Bilbao” (il. 1c).

Wiele nowatorskich projektów próbuje rozszerzyć dotychczasowy poziom osiągnięć, jednakże zgodnie z moimi osobistymi doświadczeniami, nowe morfologie strukturalne zastosowane w rzeczywistych metodologiach projektowania koncepcyjnego prowadzą do wątpliwości w ocenie niezawodności obiektów [1].

Morfologia i analiza strukturalna

Konstrukcje lekkie miały wielki wpływ na moje badania akademickie i działalność projektową. Byłem pod wrażeniem formy konstrukcji przestrzennych i prowadzących doń badań naukowych od czasu uczestnictwa (jako student) w kongresie IASS (International Association for Shell and Spatial Structures – Międzynarodowego Stowarzyszenia Konstrukcji Powłokowych i Przestrzennych) odbywającym się w Madrycie w 1969 r. W rzeczy samej, poszukiwanie formy i nieliniowa praca cięgien, membran i konstrukcji pneumatycznych stanowiły tematy, na których się skupiałem najpierw jako inżynier, a następnie jako adiunkt na Uniwersytecie w Bolonii. Na początku lat 70. XX w. w ogólnym zarysie opracowane zostało inte-

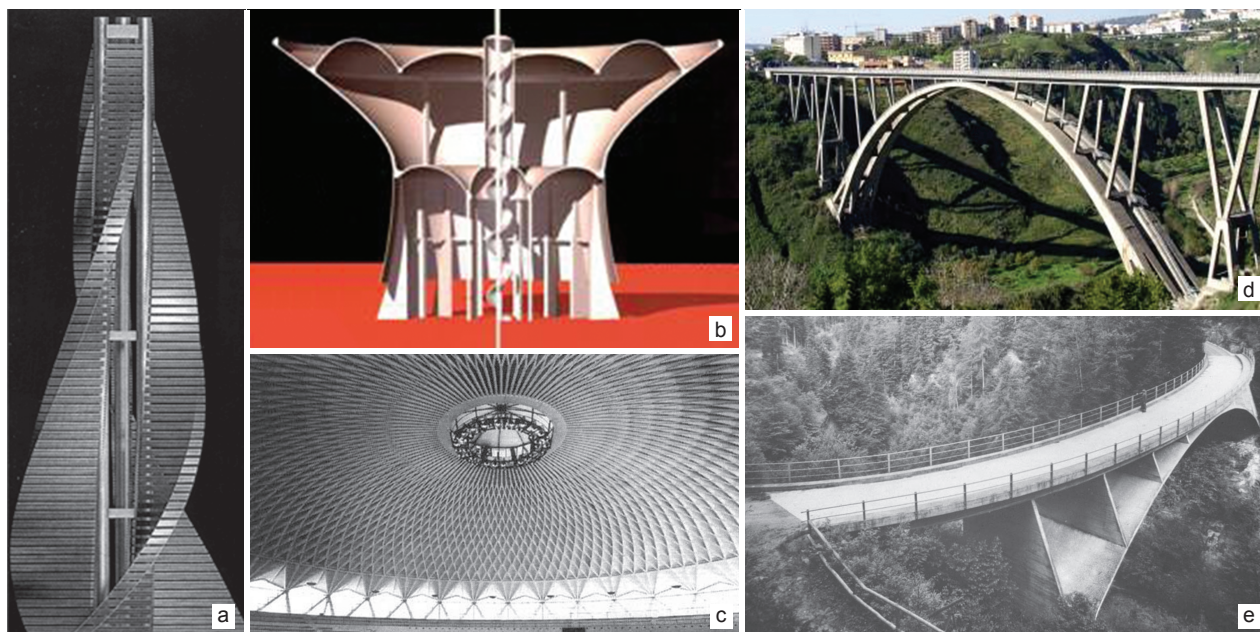
morphologies adopted in actual conceptual design methodology generate uncertainties in reliability assessment [1].

Morphology and structural analysis

Lightweight structures strongly influenced my personal academic investigations and design activities. I was truly impressed by spatial structures’ design and the research that led to them since my participation (as a student) in IASS (International Association for Shell and Spatial Structures) Congress, held in Madrid in 1969. As a matter of fact, form finding and nonlinear behaviour of cables, membranes and pneumatic structures were the subjects I focused on, at first, as an engineer and then as an assistant professor at the University of Bologna. An interactive graphic software was developed on main frames in the early 1970s, that was then extended to mini and personal computers, as a natural consequence of those early studies [2].

Of course, the information technology revolution has influenced structural engineering as well. During the 1950s and the 1960s the design methodology of the structural engineer has been remarkably influenced by two major developments: the harmonization of the various theories of structural mechanics and the introduction of electronic processors accompanied by symbolic and matrix languages and finite element methods.

My generation bridged the era between approximated methods of analysis and the advent of FEM (Finite Ele-



Il. 2. Wspólny „język strukturalny”: a) S. Musmeci – spiralny drapacz chmur, b) E. Torroja – zbiornik wodny w Fedala², c) P.L. Nervi – Palazetto dello Sport (Rzym), d) R. Morandi – Most Catanzaro, e) R. Maillart – Schwandbachbrücke
 Fig. 2. Common “structural language”: a) S. Musmeci – Helicoidal Skyscraper, b) E. Torroja – water tank in Fedala¹, c) P.L. Nervi – Palazetto dello Sport (Rome), d) R. Morandi – Catanzaro bridge, e) R. Maillart – Schwandbachbrücke

raktywne oprogramowanie graficzne, początkowo na duże komputery stacjonarne, a następnie na minikomputery i komputery osobiste, jako naturalna konsekwencja wcześniejszych badań [2].

Oczywiście rewolucja technologii informacyjnej miała również wpływ na inżynierię budowlaną. W latach 50. i 60. XX w. na metodologię projektowania inżyniera budowlanego znaczny wpływ wywarły dwa główne trendy: harmonizacja różnych teorii mechaniki konstrukcji i wprowadzenie elektronicznych procesorów wraz z zapisem symbolicznym i macierzowym oraz metodą elementów skończonych (MES).

Moje pokolenie przeszło od epoki przybliżonych metod analizy do pojawienia się automatycznej analizy MES, jednakże z punktu widzenia projektowania koncepcyjnego korzystamy z dziedzictwa takich indywidualności jak Gustave Eiffel, Antoni Gaudí, Eduardo Torroja, Pier Luigi Nervi, Robert Maillart i inni (il. 2), którzy używali wspólnego „języka strukturalnego”, jak to określił Sergio Musmeci: *Poprzez swoją formę, konstrukcja natychmiast ujawnia przepływ wewnętrznych sił przez nią przechodzących, które nie są zamknięte i ukryte w przestrzeni abstrakcyjnie poczętej morfologii, narażonej na estetyczne i statyczne uprzedzenia, w której większość materii i przestrzeni jest zbędna* [3].

Obecnie żyjemy w epoce „metamorfozy języka”, jak zostało to określone przez Edoarda Benvenuto w jego niedawnym dziele *Historia nauki budowlanej (La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico)*, w której język

(Method) automatic analysis but, from the point of view of the conceptual design we get an inheritance from Gustave Eiffel, Antoni Gaudí, Eduardo Torroja, Pier Luigi Nervi, Robert Maillart and others (Fig. 2), all using a common “structural language” as stated by Sergio Musmeci: *Through its form, the structure immediately reveals the flow of internal forces that cross it, which is not enclosed and hidden within the volume of an abstractly conceived morphology, prone to aesthetic and static prejudice, in which most part of matter and space is superfluous* [3].

Now we live in the era of “language metamorphosis”, as it was called by Edoardo Benvenuto in his recent *History of Building Science (La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico)*, in which symbolic language and mathematical formalism have gone beyond the mechanics of structures putting it at the service of automatic calculus. Therefore the “mentality” on which scientific empiricism was based has changed radically.

J.T. Oden and K.J. Bathe see in this change the beginning of a new era of “computational empiricism”. One of their interesting articles reads as follows:

The engineers’ community of 40 years ago was aware that the use of classical analytic methods offered limited tools for the study of mechanical behaviour and, as a consequence, the engineer had to enrich his analysis with a great deal of judgment and intuition achieved after many years of expertise. Empiricism played a crucial role in design: despite some general theories that were available, the methods to apply them were still under development and using

² Ilustracja jest fragmentem okładki pozycji: Levi F., Chiorino M.A., Bertolini Cestari C. (eds.), *Eduardo Torroja – From the philosophy of structures to the art and science of building: International Seminar*, Politecnico di Torino, Franco Angeli, Turin 2003.

¹ Illustration is a fragment of the cover of: Levi F., Chiorino M.A., Bertolini Cestari C. (eds.), *Eduardo Torroja – From the philosophy of structures to the art and science of building: International Seminar*, Politecnico di Torino, Franco Angeli, Turin 2003.

symboliczny i formalizm matematyczny wyszły poza mechanikę konstrukcji, umieszczając ją w służbie obliczeń automatycznych. Dlatego też „mentalność”, na której bazował empiryzm naukowy, uległa radykalnej zmianie.

J.T. Oden i K.J. Bathe widzą w tej zmianie początek nowej ery „empiryzmu obliczeniowego”. W jednym z ich ciekawych artykułów czytamy:

Spoleczność inżynierów żyjących 40 lat temu zdawała sobie sprawę, że użycie metod analizy klasycznej oferowało ograniczone narzędzia do badania mechanicznych zachowań i w konsekwencji inżynier musiał wzbogacać swoją analizę za pomocą wielu opinii i intuicji, które uzyskiwał po wielu latach doświadczeń. Empiryzm odgrywał kluczową rolę w projektowaniu: pomimo pewnych ogólnych teorii, które były dostępne, metody ich zastosowania znajdowały się wciąż w fazie rozwoju, stąd korzystanie z przybliżonych schematów i uciekanie się do wskazań pozyskanych z licznych prób i potwierdzeń było nieuchronne.

Obecnie powszechnie uważa się, że rachunek automatyczny położył kres temu pół-empirycznemu okresowi inżynierii: w dzisiejszych czasach zaawansowane modele matematyczne mogą być budowane dla najbardziej skomplikowanych zjawisk fizycznych, a jeżeli procesor jest wystarczająco skuteczny, w oparciu o odpowiedź badanego systemu można otrzymać wiarygodne wyniki liczbowe.

Jednocześnie korzyści płynące z zastosowania elektronicznych procesorów powodują niekontrolowaną gloryfikację automatycznej analizy i dają fałszywe wrażenie, że maszyny mogą prześcignąć człowieka, a logika musi ustąpić automatyzacji [4].

Korzyści oferowane przez informatykę i automatyzację były bardzo ważne dla projektowania konstrukcyjnego w ogóle, a szczególnie istotne w przypadku specjalnych systemów konstrukcyjnych. Możliwe stało się analizowanie znacznie bardziej złożonych modeli teoretycznych, unikając, z jednej strony, nadmiernych uproszczeń, które ogałają model teoretyczny, takich jak schematyczna redukcja wszelkich istotnych aspektów rzeczywistości, a z drugiej strony, zagubienia w wyczerpujących obliczeniach faktów naprawdę istotnych, a przez to zniechęcenia projektantów do rozpatrywania różnych rozwiązań konstrukcyjnych.

W takich pozornie sprzyjających okolicznościach wykryto i udokumentowano wiele awarii konstrukcji, w których błędy dotyczące niewłaściwego rozpoznania pracy konstrukcji były spowodowane zawodną interakcją człowiek–maszyna oraz iluzją, że komputery, te potężne narzędzia analizy, są w stanie zastąpić projekt koncepcyjny i ekspercką syntetyczną ocenę wyników.

Udokumentowane błędy modelowania metodą elementów skończonych (MES) zostały zilustrowane w materiałach wydanych po I Międzynarodowej Konferencji na temat Technologii Obliczeniowych Konstrukcji [5].

Wnioski z teoretycznej i eksperymentalnej analizy konstrukcji przestrzennych

Podczas pracy nad projektami, w których projektowanie i analizę systemów konstrukcyjnych byłem bezpośrednio zaangażowany, zgromadzono wiele doświadczeń,

approximate schemes and resorting to indications derived from numerous tests and confirmations was inevitable.

Today the common belief is that automatic calculus has put an end to this semi-empirical age of engineering: by now sophisticated mathematical models can be built on some of the most complicated physical phenomena and if the processor is sufficiently powerful, reliable numerical results can be obtained based on the response of the examined system.

The advantages brought by electronic processors may, on the other hand, create an uncontrollable exaltation of the automatic calculus and give the false impression that man can be outshined by machines and the logic by the automation [4].

The advantage offered by informatics and automation has been very important in the field of structural design in general and particularly significant in the case of special structural systems. It was possible to examine more rigorous theoretical models avoiding, on the one hand, excessive simplifications that deprive the theoretical model, like a schematic reduction of the reality, of all significance and, on the other hand, that exhausting calculations lead to the loss of facts with a true influence, thus discouraging designers from trying out different structural solutions.

Under such apparently favourable circumstances, many documented structural failures have been detected in which mistakes regarding the inadequate evaluation of structural behaviour were caused by unreliable man/machine interaction and the illusion that computers, those powerful instruments of analysis, could replace conceptual design and the expert synthetic criticism of results.

Documented FEM modelling errors are illustrated in the proceedings of the First International Conference on Computational Structures Technology [5].

Conclusions from theoretical and experimental analysis of spatial structures

While working on the projects in which the author was directly involved in design and analysis of structural systems, accumulated were some experiences that today may be part of the knowledge base. Considering the statistical results of the – in service – observed behaviour, the unusual typologies, the new materials and, specially, the “scale effect” of long span structures, several special design aspects arise. Uncertainties, in reliability assessment, principally due to loading experimental identification and analytical modelling simulation of structural response, have been identified:

A. The nonlinear geometric and material behaviour under internal volume restraint fluid interaction and follower loading. The wind induced response of the cable-membrane original supported stadium roof was analysed by a nonlinear model and a field of multi correlated artificial generated wind loading time histories. Wind tunnel tests have been carried out at the BLWT Lab. of UWO on a model of 1:200.

B. The snow distribution and accumulations on large covering areas in function of statistically correlated wind direction and intensity. During the design of a new cable stayed roof for the Montreal Olympic Stadium, a special analysis was made considering three roof geometries

obecnie mogących stanowić część podstawowej wiedzy projektanta. Na podstawie wyników statystycznych obserwacji – w trakcie eksploatacji – pracy niezwyklej typologii, nowych materiałów, a zwłaszcza „efektu skali” konstrukcji o dużej rozpiętości, ustalono kilka szczególnych aspektów projektowania. Zidentyfikowano następujące niejasności przy ocenie niezawodności, głównie z powodu eksperymentalnej identyfikacji działających obciążeń i analitycznego modelowania odpowiedzi konstrukcji:

A. Nieliniowe geometrycznie i materiałowo zachowanie przy oddziaływaniu cieczy o ograniczonej objętości przy obciążeniu śledzącym. Analizowano odpowiedź dachu stadionu o konstrukcji membranowo-ciężnowej na działanie wiatru za pomocą modelu nieliniowego i pola wielokrotnie skorelowanych sztucznie wytworzonych historii obciążenia wiatrem w czasie. Testy w tunelu aerodynamicznym zostały przeprowadzone w BLWT Lab. w UW O na modelu w skali 1:200.

B. Rozkład i nagromadzenie śniegu na dużych obszarach pokrycia w funkcji statystycznie skorelowanego kierunku i intensywności wiatru. Podczas projektowania nowego podwieszono do cięgien dachu Stadionu Olimpijskiego w Montrealu przeprowadzono specjalną analizę, rozpatrując trzy różne warianty geometrii ugięcia dachu w zakresie 10 m, 11,5 m i 13 m, w celu ustalenia minimalnego nagromadzenia śniegu przy interakcji wiatru. Badanie eksperymentalne przeprowadzono w RWDI [6], aby określić obciążenie śniegiem zgodnie z metodą FAE (elementów o skończonej powierzchni) z wykorzystaniem najnowszych osiągnięć techniki w tym zakresie.

C. Wrażliwość parametryczna systemu konstrukcyjnego w zależności od typu i stopnia niewyznaczalności statycznej i hybrydowej współpracy pomiędzy poszczególnymi podkonstrukcjami – sztywnymi i podatnymi. Przeanalizowano niezwykle wiszący dach stadionu w Montrealu, biorąc pod uwagę wrażliwość na tolerancję długości systemu podwieszono do cięgien.

D. Rozkład ciśnienia wiatru na dużych obszarach w odniesieniu do teoretycznych i eksperymentalnych skorelowanych widm gęstości mocy lub historii czasowych [7]. Uzyskano następujące wyniki i dane techniczne:

- 1) współczynniki ciśnienia (maksymalne, minimalne i średnie) dla każdego 10° kierunku wiatru,
- 2) ciśnienia szczytowe i siły całkowite są podane jako „ostateczna” wartość obliczeniowa,
- 3) historie czasowe ciśnień lokalnych dla każdego 10° kierunku przepływu wiatru; wyznaczono maksymalne, minimalne i średnie wartości ciśnienia wiatru, jak również średnią kwadratową jego części zmiennej,
- 4) aerodynamiczne pomiary ciśnienia,
- 5) pomiary sił całkowitych za pomocą miernika dynamometrycznego,
- 6) wyznaczenie ciśnienia i przepływu w obrębie podwójnej fasady.

Wykryto także pewne problemy podczas pomiarów sił całkowitych:

- 1) część zmienna była całkowicie różna,
- 2) wyniki bilansu pomiarów miernikiem dynamometrycznym zdają się „rozmyte”,

varying the sag of the roof from 10 m, 11.5 m and 13 m, in order to find a minimization of snow accumulation by wind interaction. The experimental investigation was carried out by RWDI [6] to provide design snow according to FAE (Finite Area Element) method, representing up to day a state of the art on the matter.

C. The parametric sensibility of the structural system depending on the type and degree of static indeterminacy and hybrid collaboration between hardening and softening behaviour of substructures. The unusual suspended roof of the Montreal Stadium has been analysed being sensitive to the tolerances in length of the cable stayed system.

D. The wind pressure distribution on large areas considering theoretical and experimental correlated power spectral densities or time histories [7]. Results and specifications obtained:

- 1) pressure coefficients (maxima, minima and average) for every 10° of incoming direction,
- 2) peak pressures and global forces are given as a “final” design value,
- 3) time histories of the local pressures for every 10° of incoming flow direction; the maximum, minimum and average values of the wind pressure have then been evaluated, as well as the root mean square of its fluctuating part,
- 4) aerodynamic pressure measurements,
- 5) measurement of global forces by dynamometric balance,
- 6) evaluation of pressures and flow within the double skin facade.

And some problems detected during global forces measurements:

- 1) the fluctuating part was completely different,
 - 2) the balance results seem to be “fuzzy”,
- as it appeared from the correlation loci between the force F_x (in the global structure reference system) and the corresponding base moment M_z .

The aerodynamic behaviour shows a clear shedding phenomenon. The external border of the structure, constituted of the trussed compression ring with triangular section and tubular elements and by the roofing of the upper part of the stands, disturbs the incoming horizontal flow in such a way so that vortex shedding is built up. This causes the roofing structure to be subjected to a set of vortices with a characteristic frequency. This is confirmed by the resulting Power Spectra Density Function of the fluctuating pressures, which shows a peak at about 0.15 Hz even if the values rapidly decrease with increasing distance.

E. Rigid and aeroelastic response of large structures under the action of cross-correlated random wind action considering static, quasi-static and resonant contributions. This allows defining and changing a-priori the (mean) angle of attack; it also allows a large reproducibility of the tests. On the other hand, the inverse method consists in measuring the forces on the deck during a free motion. This procedure allows investigating the vortex shedding mechanism and flutter derivatives.

F. Reliability and safety factors of new hi-tech composite materials.

G. The necessity to avoid and short-circuit progressive collapse of the structural system due to local secondary structural element and detail accidental failure. A fluid-

jak wynika z korelacji *loci* pomiędzy siłą F_x (w globalnym strukturalnym systemie odniesienia) a odpowiadającym momentem bazowym M_z .

Zachowanie aerodynamiczne wykazuje wyraźne zjawisko odrywania się wirów. Zewnętrzna granica konstrukcji, którą stanowi wsparty kratownicowy pierścień ściskany o przekroju trójkątnym i elementach rurowych, poprzez zadanie górnej części trybun zakłóca przychodzący przepływ poziomy w taki sposób, że tworzą się ścieżki wirów. Powoduje to, że konstrukcja dachu jest poddana działaniu serii wirów z charakterystyczną częstotliwością. Potwierdza to wynikowa widmowa funkcja gęstości mocy zmieniającego się ciśnienia, wykazująca wartość szczytową przy około 0,15 Hz, nawet jeśli wartości gwałtownie spadają w miarę wzrostu odległości.

E. Sztywna i aeroelastyczna odpowiedź dużych konstrukcji pod losowym obciążeniem wzajemnie skorelowanymi oddziaływaniami wiatru, biorąc pod uwagę składowe statyczne, quasi-statyczne i rezonansowe. Pozwala to na zdefiniowanie i zmianę przyjętego *a priori* (średniego) kąta natarcia; umożliwia to także wysoką powtarzalność prób. Jednocześnie metoda odwrotna polega na pomiarze sił na pomoście podczas ruchu wolnego. Procedura ta umożliwia badanie mechanizmu powstawania ścieżki wirów i pochodnych trzepotania (flutter).

F. Niezawodność i czynniki bezpieczeństwa najnowocześniejszych materiałów kompozytowych.

G. Konieczność unikania progresywnej awarii systemu konstrukcyjnego z powodu wad lokalnych drugorzędnych elementów konstrukcyjnych i przypadkowych awarii. Nieliniowa analiza oddziaływania cieczy w dziedzinie czasu, wykonana przy sprawdzaniu projektu stadionu w La Placie [5] w warunkach symulowanej awarii progresywnej wykazuje większą zgodność między modelem teoretycznym a wartościami eksperymentalnymi.

H. Kompatybilność wewnętrznych i zewnętrznych ograniczeń i szczegółów projektowych wraz z hipotezą modelującą i reakcją rzeczywistego systemu konstrukcyjnego. Szczególną uwagę poświęcono analizie głównego węzła podwieszenia nowego stadionu Juventus w Turynie (il. 3a, b). Zastosowano dedykowany model matematyczny 3D FEM do analizy rozkładu naprężeń i ich miejscowych koncentracji (il. 3c).

I. W przypadku konstrukcji ruchomych wiedza podstawowa obejmuje głównie ruchome dźwigi, a odpowiedni proces projektowania koncepcyjnego musi brać pod uwagę istniejące obserwacje, testy i specyfikacje opisujące zachowanie podobnych systemów konstrukcyjnych. W celu wypełnienia tej luki, Grupa Robocza IASS Nr 16 przygotowała najnowszy raport o rozkładanych konstrukcjach dachowych [8], zawierający zalecenia dla projektowania konstrukcyjnego oparte na obserwacjach usterek i awarii.

Niektóre doświadczenia w koncepcyjnym projektowaniu konstrukcji oraz realizacjach

Synergia panująca pomiędzy badaniami naukowymi a projektowaniem została syntetycznie wyrażona przez Davida I. Blockleya następująco: „Aby zrobić, musisz

interaction nonlinear analysis in time domain, made for the checking of La Plata stadium design [5] under simulated progressive collapse, shows a better agreement between theoretical model and experimental values.

H. The compatibility of internal and external restrains and detail design, with the modelling hypothesis and real structural system response. Special attention was dedicated to the analysis of main suspending joint of the new Juventus Stadium in Turin (Fig. 3a, b). A dedicated 3D FEM mathematical model was implemented to analyse the stress distribution and peak concentrations (Fig. 3c).

I. In the case of movable structures, the knowledge base concerns mainly the moving cranes and the related conceptual design process has to consider existing observations, tests and specifications regarding the behaviour of similar structural systems. In order to fill the gap, the IASS Working Group No. 16 prepared a state of the art report on retractable roof structures [8] including recommendations for structural design based on observations of malfunction and failure.

Some experiences in conceptual design of structures and realizations

The synergy between research and design was synthetically expressed by David I. Blockley as: “To do you must know, and to know you must do”. From this synergy resulted several designs of structural architecture in the field of spatial structures. They can be grouped according to the typologies of the IASS tradition:

1. Space structures:
 - a) single layer grids,
 - b) double and multi-layer grids (Fig. 4),
 - c) single and double curvature space frames.
2. Cable structures (Fig. 5):
 - a) cable stayed roofs,
 - b) suspended roofs,
 - c) cable trusses,
 - d) single and multilayer nets.
3. Membrane structures (Fig. 6).
4. Hybrid structures:
 - a) tensegrity systems,
 - b) beam-cable systems (Fig. 7).
5. Convertible roofs:
 - a) overlapping sliding system (Fig. 8),
 - b) pivoted system,
 - c) folding system.

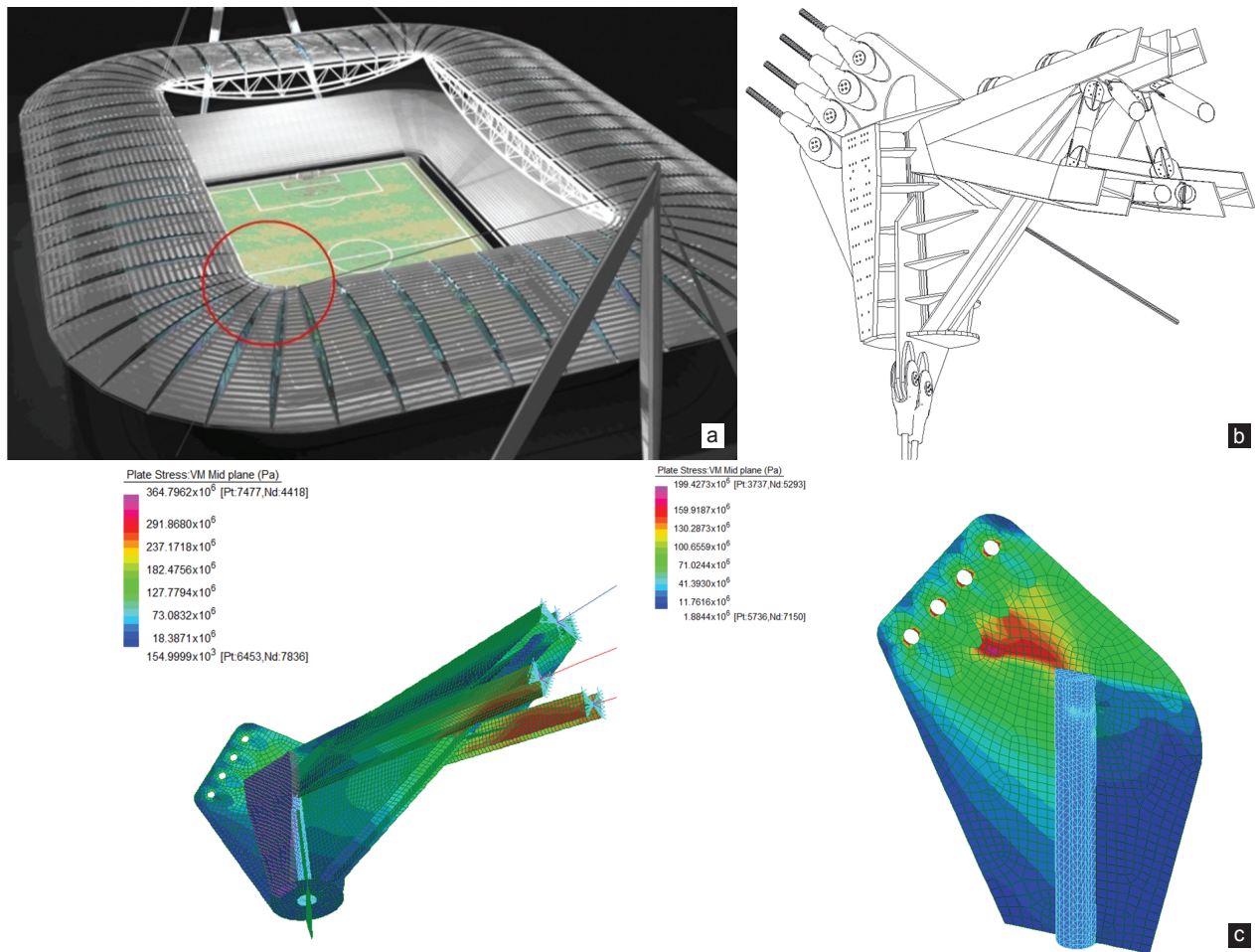
Actual trends in structural architecture: the free form design

As written in the *Divina Comedia*:

*Halfway through the journey we are living
I found myself deep in a darkened forest,
For I had lost all trace of the straight path².*

At this time, more than half way through my journey, I find myself in the “Wave Fashion” Comedy, with no ac-

² Dante Alighieri, *The Divine Comedy, Inferno, Canto I.*



Il. 3. Nowy stadion Juventus w Turynie:

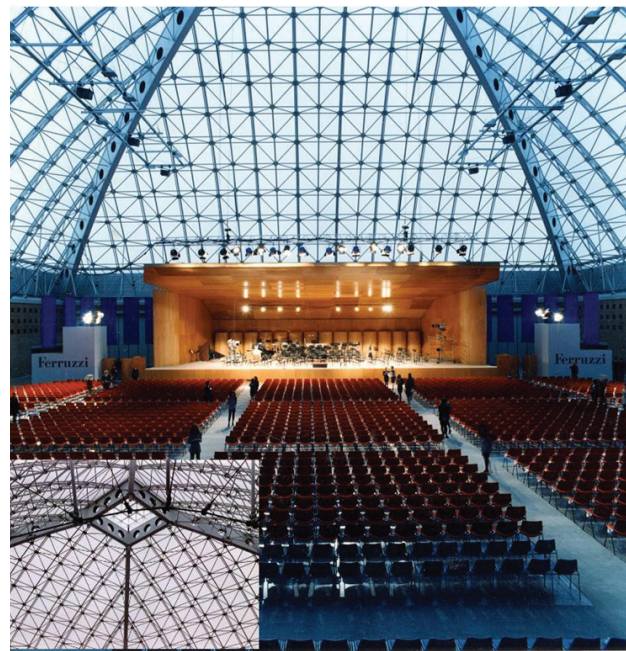
a) dach, b) model bryłowy głównego węzła podwieszenia, c) graficzne przedstawienie rozkładu naprężeń

Fig. 3. New Juventus Stadium in Turin:

a) roof, b) solid view drawing of main suspension joint, c) graphic representation of stresses

wiedzieć, aby wiedzieć, musisz zrobić”. W wyniku tej synergii powstało kilkanaście projektów architektury strukturalnej w dziedzinie konstrukcji przestrzennych. Można je pogrupować zgodnie z typologiami według tradycji IASS:

1. Konstrukcje przestrzenne:
 - a) ruszty jednowarstwowe,
 - b) ruszty dwu- i wielowarstwowe (il. 4),
 - c) ramy przestrzenne o pojedynczej i podwójnej krzywiznie.
2. Konstrukcje cięgnowe (il. 5):
 - a) dachy podwieszane do cięgien,
 - b) dachy wiszące,
 - c) kratownice cięgnowe,
 - d) siatki jedno- i wielowarstwowe.
3. Konstrukcje membranowe (il. 6).
4. Konstrukcje hybrydowe:
 - a) systemy tensegrity,
 - b) systemy belkowo-cięgnowe (il. 7).
5. Dachy rozkładane:
 - a) system przesuwany nakładkowy (il. 8),
 - b) system obracany,
 - c) system składany harmonijkowo.



Il. 4. Przestrzenna muszla Pala D'Andrè w Rawennie

Fig. 4. Space shell of Pala D'Andrè in Ravenna

Aktualne trendy w architekturze strukturalnej: projektowanie „free form”

Jak napisano w *Boskiej komedii*:

*W życia wędrowce, na połowie czasu,
Straciwszy z oczu szlak niemylnej drogi,
W głębi ciemnego znalazłem się lasu*³.

W obecnym czasie, dalej niż na połowie czasu w mojej życia wędrowce, odnajduję się w Komedii „Fala Mody” bez godnych zaufania przewodników. Prawdziwie wątpię, aby FFD mogło pokazać nam drogę, jak wznieść się do Nieba. Pomocnicze w zamyśle zasoby IT (technologii informacyjnej) wydają się pokonywać ludzki rozum, w miarę jak „nowoczesne tendencje” zbaczają z prostej drogi [9] z:

³ Dante Alighieri, *Boska komedia, Piekło, Pieśń pierwsza*, w. 1–3, przeł. E. Porębowicz, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1986, s. 3.

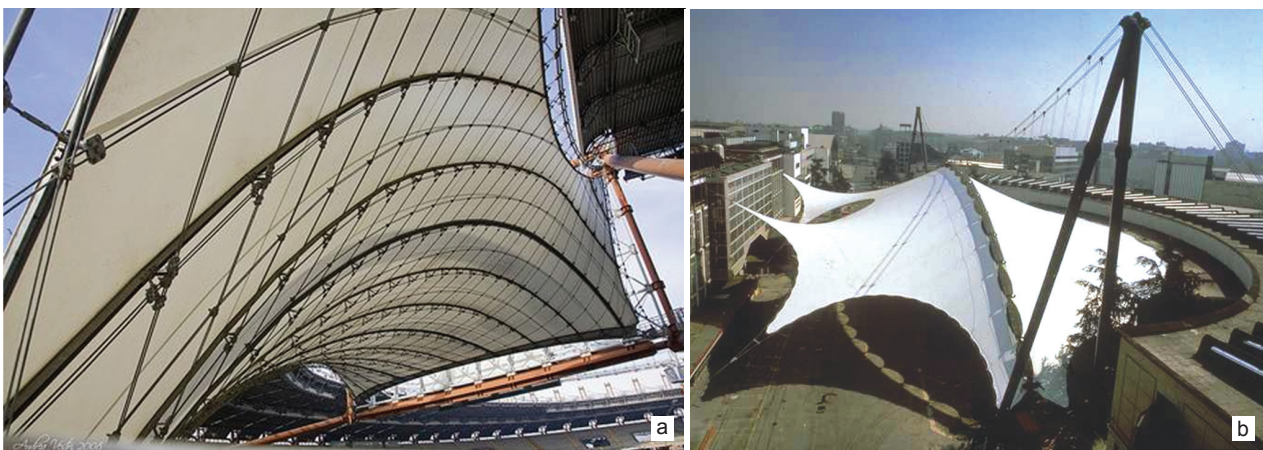
countable guides. I truly doubt that FFD, in architecture, shows the way to ascend into Heaven. Auxiliary IT (Informatics Technology) resources seem to overcome human reason, as “modern tendencies” diverge from the straight path [9] with:

- 1) the prevalence of aesthetics over static rationality,
- 2) stringent search for structural efficiency to solve a more complex issue than reality, in order to achieve an original solution,
- 3) the categorical rhetoric of structural actions that translate into design languages,
- 4) the structure as a sculpture,
- 5) mechanistic impressionism,
- 6) the metaphorical transposition, into architecture, of Nature and other foreign elements,
- 7) the rhythmic and monotonous repetition of an architectural motif,
- 8) the emphatic representation of a typical element's detail, to identify the overall scale.



Il. 5. Kładka dla pieszych nad autostradą A-13, Włochy

Fig. 5. Footbridge over A-13 highway, Italy



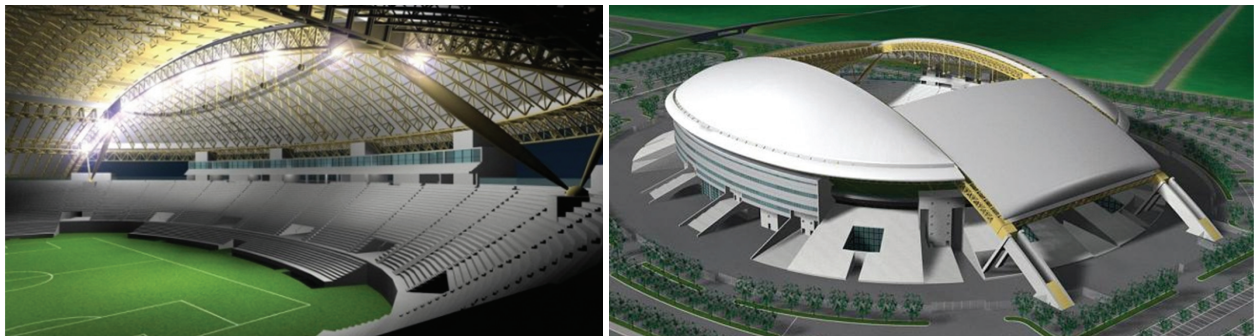
Il. 6. Konstrukcje membranowe: a) Stadion Alpejski, Turyn, b) Targi w Mediolanie

Fig. 6. Membrane structures: a) Stadium of the Alps, Turin, b) Milano Fair



Il. 7. Konstrukcje hybrydowe na terenach targowych w Bolonii: a) pawilon 16-18, b) pawilon 19-20

Fig. 7. Hybrid structures (cable string beams) at Bologna fair: a) Pavillion 16-18, b) Pavillion 19-20



Il. 8. Stadion Marco Polo, Wenecja

Fig. 8. Marco Polo Stadium, Venice

1) przewagą efektu wizualnego nad statyczną racjonalnością,

2) rygorystycznym poszukiwaniem konstrukcyjnej efektywności, aby rozwiązać problem bardziej złożony niż w rzeczywistości, w celu uzyskania oryginalnego rozwiązania,

3) kategoryczną retoryką działań strukturalnych, które przekładają się na języki projektowania,

4) strukturą jako rzeźbą,

5) mechanistycznym impresjonizmem,

6) metaforyczną transpozycją Natury i innych elementów obcych w architekturę,

7) rytmicznym i monotonnym powtarzaniem motywu architektonicznego,

8) emfaticzną reprezentacją szczegółu typowego elementu w celu identyfikacji skali ogólnej.

Możemy uznać, że powstaje fenomenologiczna niepewność, zawsze kiedy forma konstrukcji lub technika projektowania generuje niepewność co do jakiegokolwiek aspektu możliwego zachowania konstrukcji będącej w budowie, eksploatacji i warunkach ekstremalnych.

Niepewności te zostają wprowadzone do projektów, które usiłują rozszerzyć „stan techniki”, włączając nowe koncepcje i technologie. W rzeczywistych realizacjach fenomenologiczne niepewności projektu odgrywają bardzo ważną rolę; dzisiaj widzimy wolną formalną ekspresyjność, która tworzy takie obiekty architektury, jak krzywe wieże, rzeźbione mosty, przekrycia „free form” itp.,

Phenomenological uncertainty may be considered to arise whenever the form of construction or the design technique generates uncertainty about any aspect of the possible behaviour of the structure under construction, service and extreme conditions.

Those uncertainties are introduced in designs which attempt to extend the “state of the art”, including new concepts and technologies. In actual realizations, phenomenological design uncertainties play a very important role; today we see free formal expressiveness originating such architectural objects as leaning towers, sculptured bridges, free form enclosures and the like, whose shape sometimes has no connection whatsoever with structural principles.

According to the technical and scientific philosophy taken from Eiffel, Torroja, Nervi and others, who designed by looking first and foremost at the construction, quite sure that observing the laws of static engineering would be seen, per se, as a guarantee of aesthetic results achieved, they are no more than structural forgeries.

On the contrary, many of these new architectural objects amaze us and they are appreciated in the name of the very definition of the word architecture, as an intellectual and technical exercise directed at adapting our physical environment to the needs of social life. It cannot be denied that some works achieve the level of architectural and sculptural art and the role played by structures is merely to support architectural design.

których kształt niejednokrotnie nie ma jakiegokolwiek związku z zasadami konstrukcyjnymi.

Według filozofii technicznej i naukowej przejętej po Eiffelu, Torroi, Nervim i innych – którzy projektowali, patrząc przede wszystkim na konstrukcję, w przekonaniu, że przestrzeganie zasad statyki budowli samo przez się będzie gwarancją osiągnięcia efektów estetycznych – nie są one niczym innym jak strukturalnymi fałszerstwami.

Wręcz przeciwnie, wiele z tych nowych obiektów architektonicznych zadziwia nas i są one doceniane w imię samej definicji słowa architektura jako intelektualne i techniczne ćwiczenie mające na celu zaadaptowanie naszego środowiska fizycznego dla potrzeb życia społecznego. Nie można negować faktu, że niektóre dzieła osiągają poziom sztuki architektonicznej i rzeźbiarskiej, a rola konstrukcji ogranicza się jedynie do wspierania projektu architektonicznego. W tych okolicznościach Torroja przewidział, wyrokując etycznie, sposób zachowania w przypadku projektowania FFD, które stanowi nowe wyzwanie zarówno dla Architektów, jak też i Inżynierów:

Jeśli bycie kreatywnym oznacza po prostu, że ktoś nie daje się prowadzić sensownym argumentom, jeżeli kreatywność nie następuje jako bezpośredni rezultat zastosowania wiarygodnych i precyzyjnych zasad do nowych zadań, w takim razie, oryginalne idee rozdarte pomiędzy mylną interpretacją a niespójnym manieryzmem przechodzą od geniuszu do próżności, przekształcając sztukę w oportunizm. Sama innowacja nigdy nie przejmie instrumentalnej roli w promowaniu artysty; przede wszystkim umiejętności artysty powinny zasługiwać na szacunek i pochwałę i w końcu skupiać zainteresowanie publiczne na swoim innowacyjnym potencjale [10, cap. XVII].

W tym momencie musimy powiedzieć, że ze statycznego punktu widzenia ludzkie błędy w dziedzinie projektowania i budownictwa mają tendencje do znacznego wzrostu, gdy innowacja nie jest ciągła i jest niespodziewana, i kiedy nie wydarza się stopniowo z pomocą naukowej wiedzy [11], [12]. Swobodna strukturalna morfologia, która wywodzi się z aktualnych trendów FFD, stanowi jednocześnie wyzwanie i obawę w nauce i technice budowlanej, które zazwyczaj są zakotwiczone w konwencjonalnych typologiach i geometriach (ramy, łuki, powłoki itp.). To pociąga za sobą radykalną zmianę w formie psychicznej i metodologii pracy inżyniera konstruktora, zwłaszcza w odniesieniu do interpretacyjnej kontroli odpowiedzi konstrukcji w rozumieniu stanu naprężenia i odkształcenia pod działaniem stałych i zmiennych obciążeń, którą uzyskuje się na drodze zaawansowanej analizy przeprowadzonej za pomocą metody elementów skończonych.

Dlatego też FFD wymaga od inżynierów budowlanych nowego zaangażowania. Jest ono wypracowywane indywidualnie i wykorzystywane przy konkretnych projektach. Na przykład:

- Wykorzystanie konwencjonalnych profili stalowych przewidzianych do łączenia przede wszystkim pod kątem 90° nie jest celowe, gdy geometria konstrukcji również jest typu „free form”. Pierwsze Międzynarodowe Kollokwium FFD poświęcone roli nowych technologii w ułatwianiu procesu produkcyjnego i konstrukcyjnego odbyło się w TU Delft w 2006 r.

Under those circumstances Torroja anticipated, with an ethic judgement, how to behave under the FFD which constitutes a new challenge for Architects and Engineers alike:

If being creative simply stands for emerging driven by no sensible arguments, if creativity fails to happen as a direct result of reliable and accurate principles applied to new issues, then original ideas, torn between misrepresentation and inconsistent mannerism, move from genius to vanity, converting art into expediency. Innovation alone shall never take an instrumental role in promoting the artist; the skills of the artist should deserve respect and praise first and, eventually, focus the public interest on their innovatory potential [10, cap. XVII].

At this point we have to say that from a statistical viewpoint, human errors in the fields of design and construction tend to increase remarkably when innovation is discontinuous and sudden and when it does not take place gradually with the aid of scientific knowledge [11], [12]. The free structural morphology that stems from the current FFD trends represent, at the same time, a challenge and makes us apprehensive in building science and technique, which are traditionally anchored to conventional -typologies and geometries (frames, arches, shells, etc.). This entails a radical change in the civil structural engineer's mental form and methodology, especially with regard to the interpretative control of the structural response in terms of state of stress and deformation under the action of permanent and live loads, obtained through sophisticated analysis carried out according to the finite elements method.

Therefore, the FFD needs from structural engineering some new contributions. They are usually worked out individually for use in specific projects. For instance:

- The use of conventional steel profiles, conceived to be connected mainly at 90° , is not appropriate when the structural geometry is also involved into the FFD. A first International Colloquium of FFD, addressed to a new technologic contribute to facilitate the production and construction process, was held at TU Delft in 2006.

- An interesting contribute to generate structural composite steel plated elements able to follow a free form is Wetkamp Delta rib-system.

- ULS verification of free form member steel sections.

When using the plated box sections as in the under construction High Speed Train Station in Florence (originally designed by Foster and Arup, with final design for construction by STM – Studio Tecnico Majowiecki), a special method of ULS verification of the steel members and sections named “reduced stress method” is illustrated in [13]. The method:

- 1) allows to take into account direct stresses σ_x , shear stresses τ , stresses σ_z acting parallel to cross-section plane,

- 2) allows to define the acceptability of cross-section stresses distribution from the combined point of view of resistance and instability by means of the acceptability of stresses distribution of single cross-section plates,

- 3) allows to adopt as reference the stresses distribution derived from gross cross-section without iterative procedure and without additional eccentricity e_N ,

– Interesującym rozwiązaniem w wytwarzaniu konstrukcyjnych kompozytowych elementów stalowych, które mogą być kształtowane jako „free form”, jest system Wetkamp Delta.

– Weryfikacja ULS (stanu granicznego nośności) prętów stalowych o złożonych przekrojach typu „free form”.

Wykorzystując profilowane przekroje skrzynkowe, takie jak w budowanej stacji szybkiej kolei we Florencji (oryginalnie zaprojektowanej przez Foster and Arup, gdzie projekt wykonawczy został przygotowany przez STM – Studio Tecnico Majowiecki), specjalna metoda weryfikacji ULS prętów i przekrojów stalowych zwana „metodą zredukowanego naprężenia” została zilustrowana w [13]. Metoda ta:

1) pozwala na wzięcie pod uwagę naprężeń podłużnych σ_x , naprężeń stycznych τ , naprężeń σ_z działających równoległe do płaszczyzny przekroju poprzecznego,

2) pozwala na określenie dopuszczalności rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym z punktu widzenia wytrzymałości i niestabilności za pomocą dopuszczalności rozkładu naprężeń poszczególnych ścianek przekroju poprzecznego,

3) pozwala na zastosowanie jako wartości referencyjnej rozkładu naprężeń otrzymanego dla przekroju poprzecznego brutto bez procedury iteracyjnej i bez dodatkowego mimośrodru eN,

4) jest uogólnieniem poprzedniej metody efektywnych przekrojów poprzecznych,

5) jest konstrukcyjną metodą optymalizacyjną w celu zwiększenia niezawodności w FFD. Metoda optymalizacji oparta na algorytmie genetycznym została przedstawiona w [14] (il. 9),

6) obejmuje zaawansowane metody analizy niekonwencjonalnych wrażliwych systemów konstrukcyjnych z niepewnościami obejmującymi tolerancje budowlane.

4) is the generalization of the previous effective cross-sections method,

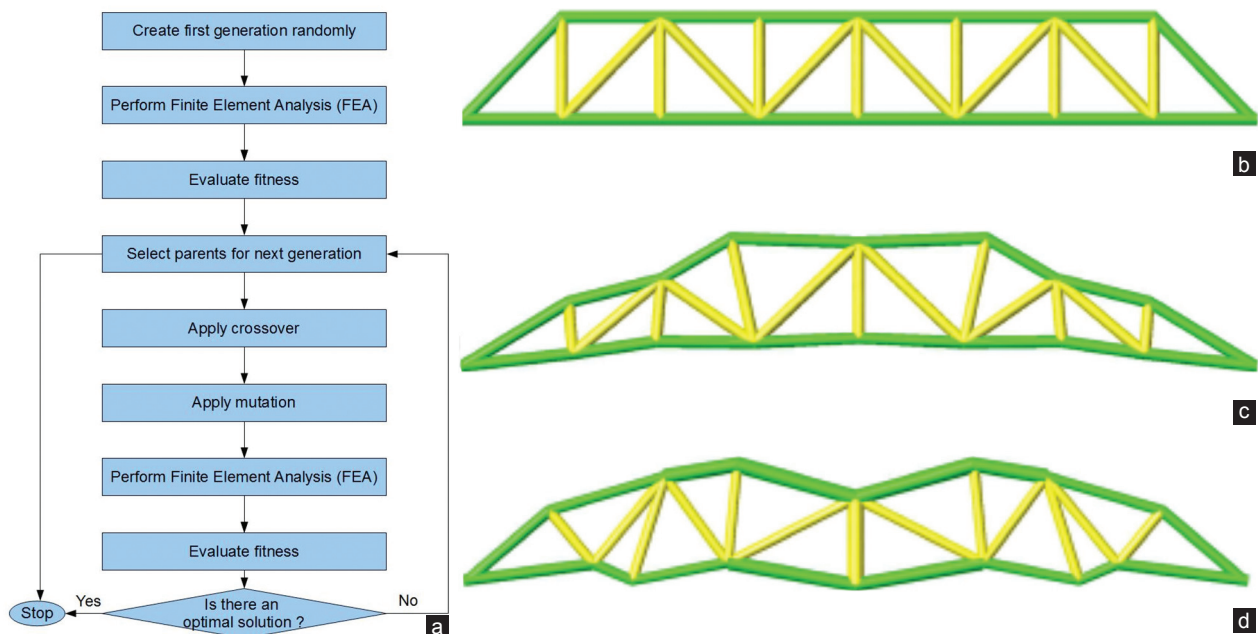
5) structural optimization methods to increase reliability in FFD. An optimization method based on genetic algorithm is presented in [14] (Fig. 9),

6) advanced methods of analysis for unconventional sensitive structural systems with uncertainties including construction tolerances.

In the case of a new suspended cable roof of Braga Stadium in Portugal, reliability analysis under random wind loads was performed (Fig. 10), [15]. The following results are obtained: a) the sensibility of the failure probability of the roof to the spatial random distribution of wind loads, b) the wind direction that drives the structure to fail with most probability (considering all wind direction with a uniform distribution), c) the points of the roof that will fail with most probability, and d) the spatial distribution of wind loads that drive the structure to fail with most probability.

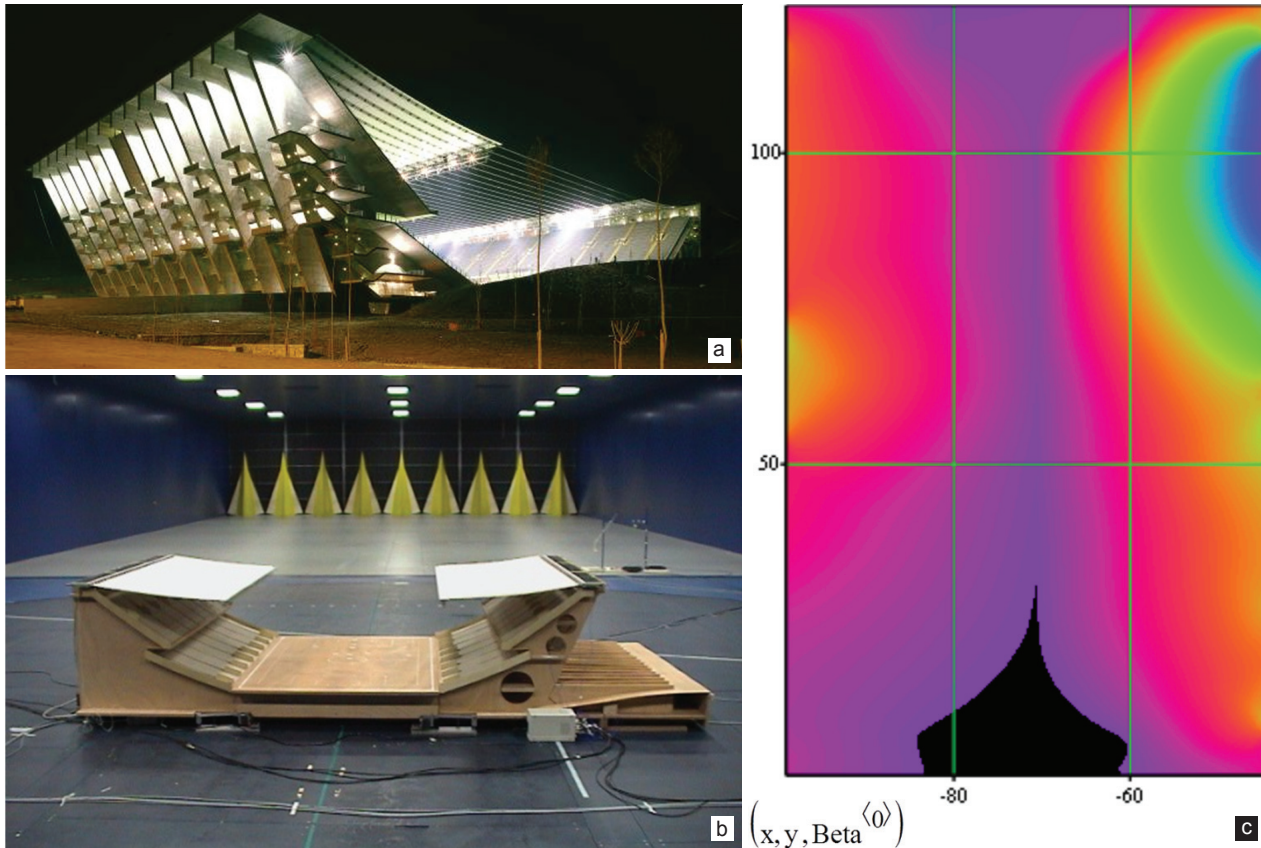
The time dependent effect of coactive indirect actions as pre-stressing, short and long term creeping and temperature effects; furthermore, when rheological uncertainties (as creep differential column shortening in high rise buildings or construction time history incremental state of deformation and stress, etc.) involve modelling uncertainties, it would be necessary to have adequate and systematic feedback on the response of the design by monitoring the subsequent performance of such structures so that the long term sufficiency of the design can be evaluated.

Some actual, FFD objects elaborated under the structural consultancy of the author, are shown in Figure 11.



II. 9. Metoda optymalizacji oparta na algorytmie genetycznym: a) algorytm optymalizacji, b) optymalizacja typologii – rozwiązanie wstępne, c) optymalizacja typologii – wynik końcowy, d) optymalizacja łączona – wynik końcowy

Fig. 9. Optimization method based on genetic algorithm: a) optimization algorithm, b) topology optimization – initial solution, c) topology optimization – final result, d) combined optimization – final result



Il. 10. Inżynieria dachu wiszącego na cięgnach na stadionie w Bradze w Portugalii:

a) widok ogólny, b) analiza w tunelu aerodynamicznym, c) rozkład współczynnika bezpieczeństwa β wykazujący wrażliwość SLU (stanu granicznego użyteczności) na obszarze czarnym ($\beta = 3,798$) [16]

Fig. 10. Engineering of suspended cable roof of Braga Stadium, Portugal:

a) general view, b) wind tunnel analysis, c) β -Safety Index distribution, evidencing SLU sensibility on the black region ($\beta = 3.798$) [16]

W przypadku nowego dachu wiszącego na nowym stadionie w Bradze w Portugalii przeprowadzono analizę niezawodności w warunkach losowych obciążeń wiatrem [15] (il. 10). Uzyskano następujące wyniki: a) wrażliwość prawdopodobieństwa awarii dachu na przestrzenny losowy rozkład obciążeń wiatrem, b) kierunek wiatru powodujący awarię konstrukcji z największym prawdopodobieństwem (biorąc pod uwagę równomierny rozkład wszystkich kierunków wiatru), c) te punkty dachu, które są najbardziej narażone na awarię, oraz d) przestrzenny rozkład obciążeń wiatrem powodujących awarię konstrukcji z największym prawdopodobieństwem.

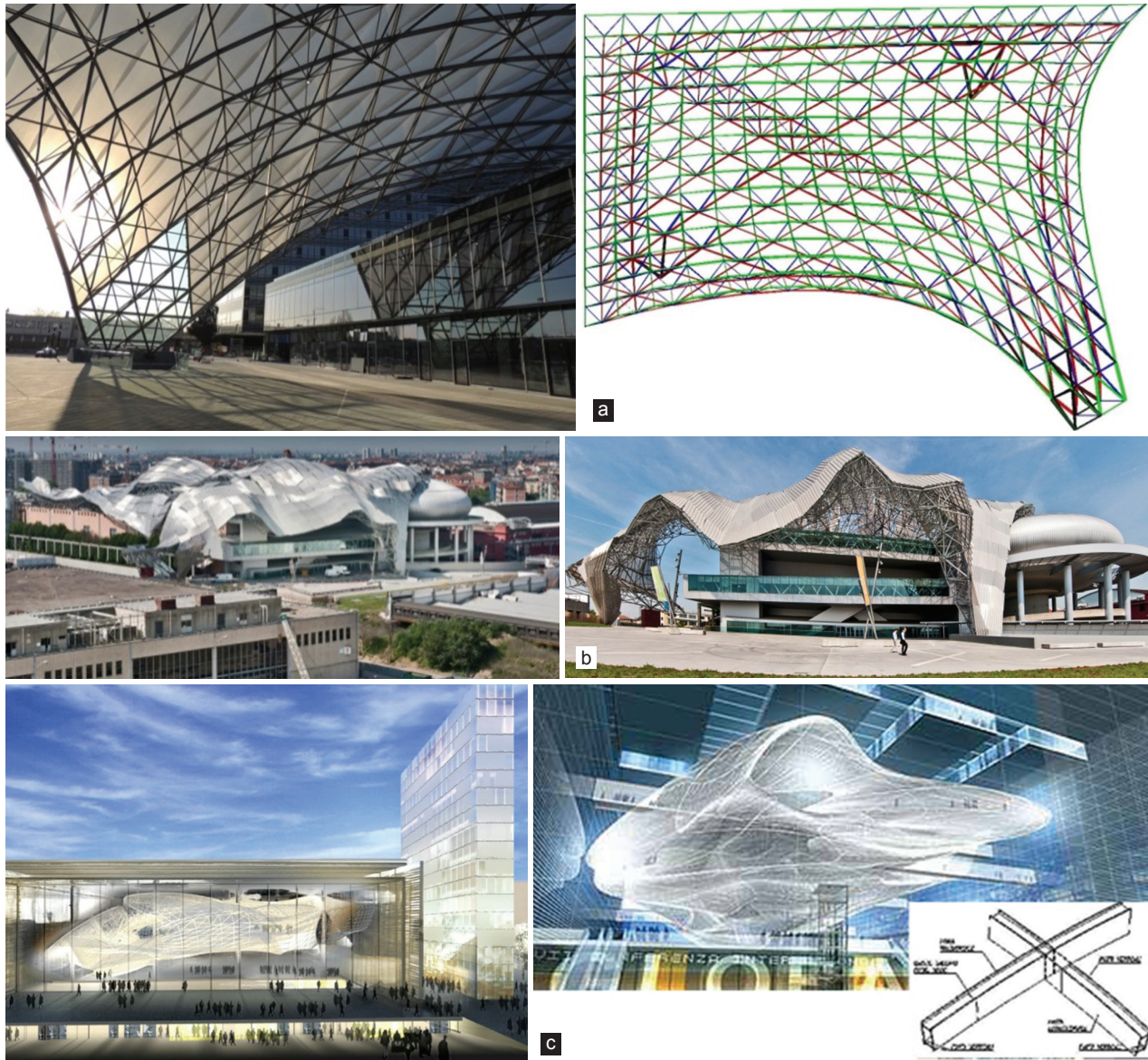
Zależny od czasu efekt jednoczesnego działania czynników pośrednich, takich jak wstępne sprężenie, pełzanie i działanie temperatury; ponadto, gdy niepewności reologiczne (jak zróżnicowane skrócenie pod wpływem pełzania słupów w wieżowcach lub przyrost w historii okresu budowy stanu deformacji i naprężeń itp.) obejmują niepewności modelowania, w takim przypadku istnieje konieczność zdobycia odpowiedniej informacji zwrotnej na temat odpowiedzi projektowanej konstrukcji poprzez monitorowanie jej kolejnych zachowań w celu dokonania ewaluacji długoterminowej rozwiązań projektowych.

Niektóre rzeczywiste obiekty FFD opracowane przy konstrukcyjnej konsultacji z autorem zostały przedstawione na ilustracji 11.

Concluding remarks

Free Form Design is a challenge for architects and engineers alike but, after the first's impressive realizations, the ethic and aesthetic repercussions of FFD's appeal on the social context must be carefully considered, to avoid the inclination to view innovation, of any kind, as positive merely because it is innovative, irrespective of its real merits or its contribution to knowledge.

From the structural point of view, in order to guarantee the required reliability level, special expertise is needed in the design and construction of free structural morphologies involved in FFD. Considering that modern design & construction activities are part of a complex, holistic, trans-multi and inter-disciplinary process that must achieve a required reliability level a Value Analysis is also highly recommended, even in the preliminary design phase, in order to find the most suitable and compatible solution in accordance with the expected function worth, focusing from the "know-how" to the "know-why", in designing and constructing the "what" or – better – the "what for".



Il. 11. Kilka przykładów projektów FFD:

a) Vela nad Unipol Tower Plaza w Bolonii (arch. OPO & STM), b) „Cometa” Milano Portello Fair (Targi w Mediolanie), (arch. M. Bellini), c) „The Cloud” – Nowe Centrum Kongresowe w EUR, Rzym (arch. M. Fuksas)

Fig. 11. Some examples of FFD projects:

a) Vela over the Unipol Tower Plaza in Bologna, arch. OPO and STM, b) “Cometa” Milano Portello Fair, arch. M. Bellini), c) “The Cloud” – New Congress Centre in EUR, Rome (arch. M. Fuksas)

Uwagi końcowe

Projekty free form stanowią wyzwanie zarówno dla architektów, jak i inżynierów, jednakże po pierwszych imponujących realizacjach etyczne i estetyczne reperkusje oddziaływania FFD na kontekst społeczny muszą zostać starannie przeanalizowane w celu uniknięcia tendencji do osądzania innowacji, jakiegokolwiek rodzaju, jako zjawiska pozytywnego tylko dlatego, że jest ono innowacyjne, niezależnie od rzeczywistych zalet tej innowacji bądź jej wkładu do stanu wiedzy.

Z konstrukcyjnego punktu widzenia konieczne są specjalne kompetencje w projekcie i budowie konstrukcji o morfologii FFD, aby zagwarantować odpowiedni poziom niezawodności. Biorąc pod uwagę, że nowoczes-

ne projektowanie i działalność budowlana stanowi część kompleksowego, holistycznego, trans-, wielo- oraz interdyscyplinarnego procesu, który musi osiągnąć wymagany poziom niezawodności, zaleca się również przeprowadzenie *analizy wartości*, nawet we wstępnej fazie projektu, w celu znalezienia najodpowiedniejszego i najbardziej kompatybilnego rozwiązania zgodnie z oczekiwaną funkcją, stąd należy skupić się na przejściu z „know-how” (wiedzieć jak) do „know-why” (wiedzieć dlaczego), w projektowaniu i budowaniu „what” (co) lub – lepiej – „what for” (po co).

Źródło:
Tłumaczenie
Bogusław Setkiewicz
Romuald Tarczewski

Bibliografia/References

- [1] Majowiecki M., *Architecture & Structures: "Ethics in Free Form Design, New Shell and Spatial Structures"*, [w:] *New olimpics, new shell and spatial structures. Proceedings of the International Symposium IASS-APCS 2006*, Committee on Spatial Structures, China Civil Engineering Society, Association for Spatial Structures, China Steel Construction Society, Beijing University of Technology, Beijing, China, October 16–19, 2006.
- [2] Majowiecki M., *Tensostrutture*, „INARCOS – Rivista Tecnica e di Informazione dell'Associazione Ingegneri e Architetti della Provincia di Bologna” 1972, No. 313, 1, 1–17.
- [3] Musmeci S., *La statica e le strutture. Collana Poliedro*, Edizioni Cremonese, Roma 1971.
- [4] Majowiecki M., Trevisan R., *A graphic interactive software for structural modelling analysis and design*, Space Structures 4, Thomas Telford, London 1993.
- [5] *Proceedings of the First International Conference on Computational Structures Technology*, Heriot-Watt University, Edinburgh, U.K., 20–22 August 1991, „Structural Engineering Review” 1991, 3, 2.
- [6] RWDI – Roof snow loading study-roof re-design Olympic Stadium Montreal, Quebec. Report 93-187F-15, 1993.
- [7] Majowiecki M., *Observations on theoretical and experimental investigations on lightweight wide span coverings*, [w:] *Atti del 1° Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento*, Firenze, Ottobre 1990.
- [8] Ishii K. (ed.), *Structural Design of Retractable Roof Structures*, WIT Press, Southampton 2000.
- [9] de Moisset N.G., Moisset de Espanes D., *Diseñar con la estructura*, INGRESO, Cordoba (R.A.) 2002.
- [10] Torroja Miret E., *Razón y Ser de los tipos estructurales*, Instituto de la Construcción y del Cemento. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid 1957.
- [11] Carper K.L., *Construction Pathology in the United States. Lessons from structural failures*, „Structural Engineering International” 1996, Vol. 6, No. 1, 57–60.
- [12] Carper K.L., *Lessons architects can learn from failures*, [w:] *Proceedings of the National Convention on Structural Failures and Reliability of Civil Structures. IUAV, Venice 6–7 December 2001*.
- [13] Majowiecki M., Pinardi S., *Reduced stress method for Class 4 steel section*, [w:] A. Steffen (ed.), *Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Area. Proceedings of the 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, Venice, Italy, September 22–24, 2010*. Zürich, International Association for Bridge and Structural Engineering, (IABSE Reports; No. 97).
- [14] Majowiecki M., Petrucci M., *Structural optimization and free form design*, [w:] A. Steffen (ed.), *Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Area. Proceedings of the 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, Venice, Italy, September 22–24, 2010*. Zürich, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE Reports; No. 97).
- [15] Cosentino N., Majowiecki M., Marini M., *Dynamic characterization of the New Braga Stadium large span suspension roof*, [w:] Ch. Cremona (ed.), *EVACES 05: experimental vibration analysis for civil engineering structures = analyse vibratoire expérimentale des structures de génie civil. Proceedings of the International conference on experimental vibration analysis for civil engineering structures, 26–28 October 2005, Bordeaux, France*, Laboratoire central des ponts et chaussée, Paris 2005.
- [16] Saitoh M., *Conceptual Design of Hybrid Structures*, [w:] I. Mungan (ed.), *Proceedings of the IASS 1993 Symposium*, Istanbul 1993.

Źródła ilustracji

Wszystkie ilustracje pochodzą z archiwum prof. M. Majowieckiego.

Illustration credits

All illustrations are from the archive of Prof. M. Majowiecki.

Streszczenie

Artykuł prezentuje doświadczenie autora i jego osobiste poglądy na wyzwania, które wynikają z nowych trendów w projektowaniu – Free Form Design (FFD). W oparciu o uzyskane doświadczenie można było zidentyfikować zagrożenia dla systemu konstrukcyjnego, jakie niesie ze sobą nieskrępowane tworzenie formy architektonicznej. Implikuje to potrzebę rozszerzenia zakresu i zmiany standardowego podejścia w analizie konstrukcyjnej.

Słowa kluczowe: architektura strukturalna, konstrukcje o dużej rozpiętości, niezawodność, analiza eksperymentalna, monitorowanie

Abstract

The paper presents the author's experience and his personal views on the challenges that arise from the new trend in design – Free Form Design (FFD). Based on the experience gained it was possible to identify the hazards that unfettered creation of architectural form poses for the structural system. This implies the need for extension of range and change of the standard approach in the structural analysis.

Key words: structural architecture, wide span structures, reliability, experimental analysis, monitoring