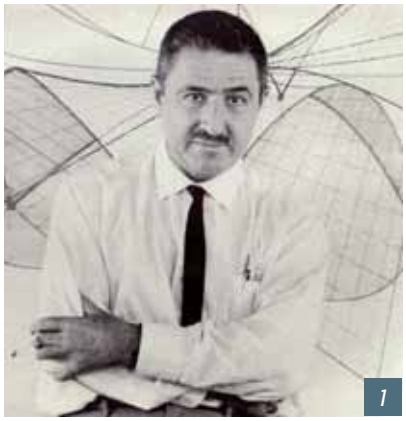
FÉLIX CANDELA – STAVITEL, INŽENÝR, UMĚLEC
FÉLIX CANDELA – BUILDER, INGINEER, ARTIST


1

JIŘÍ STRÁSKÝ

Příspěvek připomíná práci velkého španělského inženýra, který je především znám jako autor pozoruhodných skořepinových konstrukcí tvaru hyperbolického paraboloidu.
Paper remind a work of a great Spanish engineer, who is – first of all – known as a author of the shell structures of the shape of a hyperbolic paraboloid.

V roce 2008 vyšly dvě knihy věnované práci španělského inženýra Féliexe Candely (obr. 1). První knihu, kterou napsal de Anda Alanís, s názvem „Félix Candela - The Mastering of Boundaries" [1], vydalo nakladatelství Taschen v edici věnované velikánům současné architektury. Druhou knihu s názvem „Félix Candela – Engineer, Builder, Structural Artist" [2] napsal Moreyra Garlock spolu s profesorem Billingtonem. Tato kniha byla vydána v Princeton University Art Museum.

Zatímco první kniha chronologicky popisuje postavené konstrukce, druhá kniha popisuje Candelův život, jeho názory a podrobně rozebírá některé jeho konstrukce. Autoři navazují na dříve publikované práce profesora Billingtona, zejména pak na knihu „The Tower and the Bridge – The New Art of Structural Engineering" [3], v níž jsou popsána významná inženýrská díla postavená význačnými inženýry – od Thomase Telforda po Christiana Menna. Zde je také definován termín **structural art – umění konstrukcí**. Podle Billigtona tento termín vystihuje konstrukce, které v sobě kombinují krásu s konstrukční efektivitou, kterou představuje minimální spotřeba materiálu. A inženýři, kteří tyto konstrukce vytváří, jsou **structural artists – umělci navrhující konstrukce**.

V současné době se ve světě začínají objevovat konstrukce charakterizované naprostou volností tvarů odvozených z představ architekta. Mluví se o hledání volných tvarů (*free form finding*) a o tak zvané *tekuté architektuře* (*liquid architecture*). Protože tyto tvary nejsou dány statickou funkcí, navrhují se tyto stavby obvykle tak, že se vytvoří tradiční nosný systém, na který se připevní tvarovaný plášť. Pokud se použije tvárný beton, nehledí se na jeho spotřebu, ale jen na tvar konstrukce. Mnohdy se navrhují staticky nelogické konstrukce, jejichž cílem je ohromit a upoutat.

Proto považuji za účelné právě nyní připomenout práci Félixe Candely, jehož konstrukce jsou krásné, mnohotvárné a současně hospodárné. Je až překvapivé, kolik tvarově rozdílných konstrukcí Candela navrhl při využití jen jednoho geometrického tvaru – hyperboloického paraboloidu (obr. 2).

V příspěvku vycházím především z druhé knihy. Věřím, že Ti, kteří se snaží konstrukcím rozumět a dále je vyvíjet, si uvedené knihy opatří a stanou se pro ně zdrojem inspirace pro jejich tvůrčí práci.

FÉLIX CANDELA

Félix Candela se narodil v roce 1910 v Madridu. V roce 1935 promoval na fakultě architektury madridské univerzity. Následujícího roku – s ohledem na velmi dobré znalosti matematiky a stavebné mechaniky – získal stipendium na studium skořepinových konstrukcí u Prof. Dishingera v Německu. Tam však, vzhledem k občanské válce, neodjel. Jako kapitán ženistů bojoval v republikánské armádě. Po Francově vítězství uprchl přes Francii do Mexika. Zde začal pracovat na projektech a stavbách skořepinových konstrukcí.

V roce 1951 navrhl a postavil první významnou konstrukci – **Kosmický pavilon**, jehož střecha měla být s ohledem na průchod kosmických paprsků co nejtenčí. Vytvořil ji z válcové skořepiny, kterou následně zakřivil i v příčném směru. Vytvořil tak hyperbolický paraboloid, jehož tuhost daná dvojí křivostí umožnila pro rozpětí 10,75 m navrhnout skořepinu tloušťky jen 15 mm.

Na základě úspěchu této konstrukce získal zakázky na řadu staveb, které nejen vyprojektoval, ale také postavil. Zkušenosti ze staveb mu umožnily konstrukce dále rozvíjet. Stavěl jednoduché konstrukce tvaru hyperbolického paraboloidu i konstrukce, ve kterých jednotlivé hyperbolické paraboloidy skládal a kombinoval. Využil specifických podmínek Mexika, kde po druhé světové válce byl materiál drahý a pracovní síla byla mimořádně levná (obr. 3). Proto s úspornými skořepinovými konstrukcemi vítězil nejen u občanských a sakrálních staveb, ale i u průmyslových objektů.

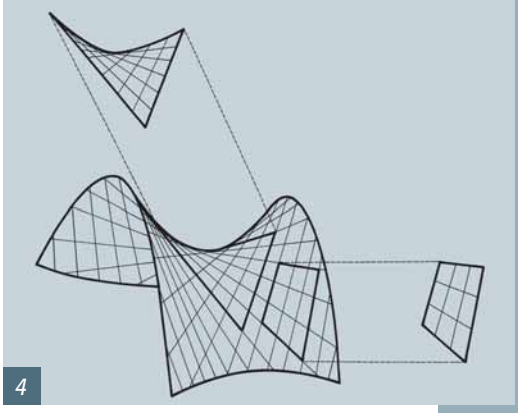
V průběhu let 1950 až 1971 postavil 896 konstrukcí. Candela napsal řadu článků, ve kterých popsal analýzu jím navrhovaných skořepinových konstrukcí. Publikoval také eseje a kritické studie o architektuře, inženýrství, vzdělávání studentů a o ekologii. Svoji projekční a stavební činnost ukončil v roce 1971, kdy se odstěhoval do USA. Zde si otevřel konzultantskou kancelář a přednášel na řadě univerzit. Zemřel v 87 letech v roce 1997.

HYPERBOLOICKÝ PARABOLOID

Félix Candela ve své práci navázal na španělskou tradici stavby hladkých skořepin. Tu zahájil Antoni Gaudí (1852 až 1926), jehož nejvýznamnější skořepinová konstrukce je střecha školy postavené v roce 1909 vedle stále budovaného kostela Sagrada Familia. Konstrukci dvojí křivosti tvoří skořepina sestavená z vrstevnatých kachlí, která je vyložena přes obvodové zdi. Poprvé tak jasně ukázal hladkou a tenkou skořepinu tvořící nosný konstrukční prvek.

Na Gaudiho práci navázal Eduardo Torroja (1899 až 1961), jehož nejvýznamnější skořepinovou konstrukcí je konzolová střecha hipodromu Zarzuela postaveného v roce 1935 poblíž Madridu. Střechu o dvou polích tvoří série hyperbolických paraboloidů, jejichž tloušťka na konci konzol je jen 50 mm. Je jasným příkladem španělského pojetí skořepin tvořených hladkými křivkami bez ztužujících žeber.

Félix Candela navázal na předcházející konstrukce. Využil specifických vlastností hyperbolického paraboloidu – translač-



Obr. 2 Kaple Lomas de Cuernavaca
Fig. 2 Chapel Lomas de Cuernavaca

Obr. 3 Betonáž skořepiny továrny Bacardí
Fig. 3 Castng of the Bacardí factory shell

Obr. 1 Félix Candela
Fig. 1 Félix Candela

Obr. 4 Hyperbolický paraboloid
Fig. 4 Hyperbolic paraboloid

Obr. 5 Kaple Lomas de Cuernavaca – skruž
Fig. 5 Chapel Lomas de Cuernavaca – falsework

ní plochy, která vzniká posunem paraboly s vrcholem nahoře po parabole s vrcholem dole. Hyperbolický paraboloid má dvojí křivost, která dává konstrukci dostatečnou tuhost. Elementy konstrukce jsou ve dvou na sebe kolmých směrech namáhány tahem a tlakem. Významnou vlastností hyperbolického paraboloidu je, že jeho plocha je tvořena přímkami, a proto ji lze poměrně jednoduše zkonstruovat (obr. 4 a 5).

Félix Candela navrhoval konstrukce s přímými a nebo zakřivenými okraji. Vytvářel konstrukce, které vznikly průnikem dvou více i hyperbolických paraboloidů. Stavěl také konstrukce střech složených ze dvou nebo tří hyperbolických paraboloidů, které vzájemně spojoval trojúhelníkovými a nebo lichoběžníkovými prvky, a tak vytvářel konstrukce neobyčejné krásy (obr. 6 a 7).

Velmi úspěšné byly konstrukce, pro které se používá anglický termín „umbrella" – deštník. Jsou to konstrukce tvořené čtyřmi vzájemně spojenými hyperbolickými paraboloidy, které jsou podepřeny jediným sloupem. Ten je vetknut do patky tvaru obrácené střechy – tedy také složeniny čtyř hyperbolických paraboloidů (obr. 8). Tyto konstrukce lze vzájemně skládat, a tak vytvářet rozsáhlá zastřešení, které Félix Candela navrhoval pro tržiště, továrny, skladiště a stanice metra a autobusů.

Při řešení skořepinových konstrukcí Candela používal jednoduchou membránovou teorii, která je např. uvedena v [4].

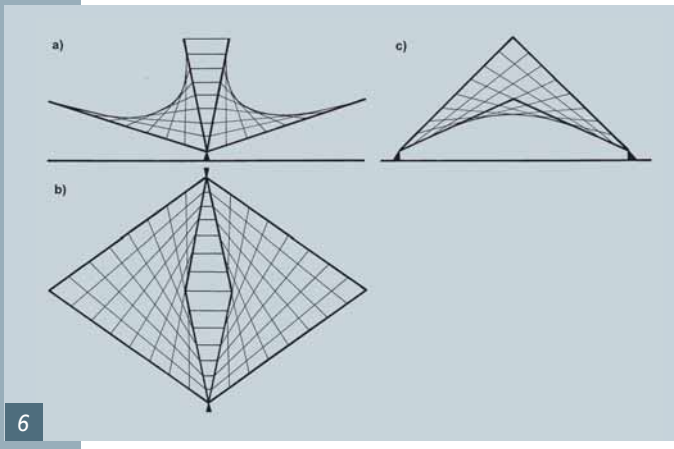
VÝZNAMNÉ KONSTRUKCE

Z řady postavených konstrukcí jsou nejvíce známé a obdivované následující stavby.

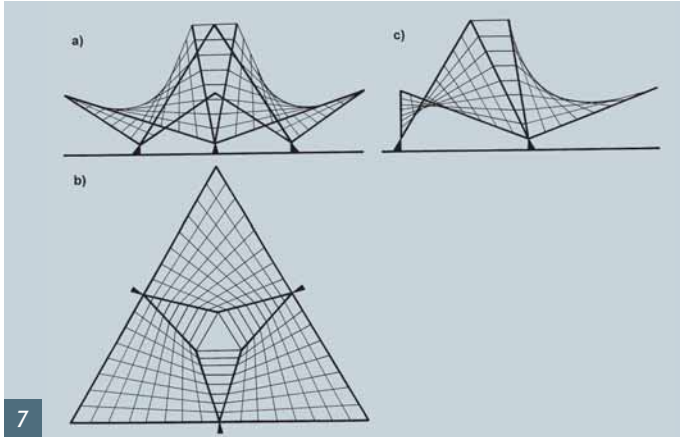
Kaple Lomas de Cuernavaca

Kaple postavená v roce 1959 je situována na náhorní plošině na okraji města Cuernavaca (obr. 2). Vytváří výraznou dominantu, která upoutá lehkostí a plastickou bohatostí. Výrazně nesymetrická konstrukce kaple je tvořena jedním hyperbolickým paraboloidem (obr. 9 a 10), který je ztužen jen u spodního okraje. Převážná část konstrukce má tloušťku jen 40 mm.

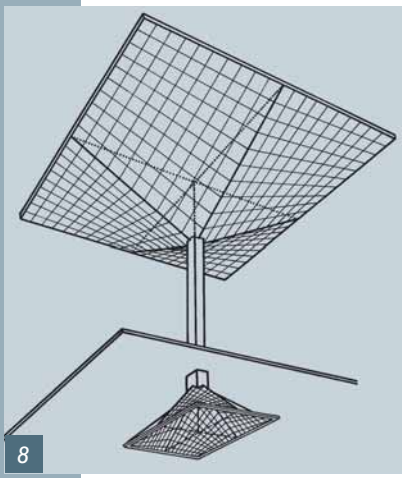
Kaple se stavěla dvakrát. Původní konstrukce s maximálním vzepětím 24 m se při odskružení zřítila, proto byla konstrukce znovu postavena s menším vzepětím 21,9 m. Konstrukce byla navržena na základě jednoduché membránové analýzy. Nedávno byla na univerzitě v Princetonu konstrukce znovu analyzována a posouzena. Podrobná analýza konstrukce metodou konečných prvků,



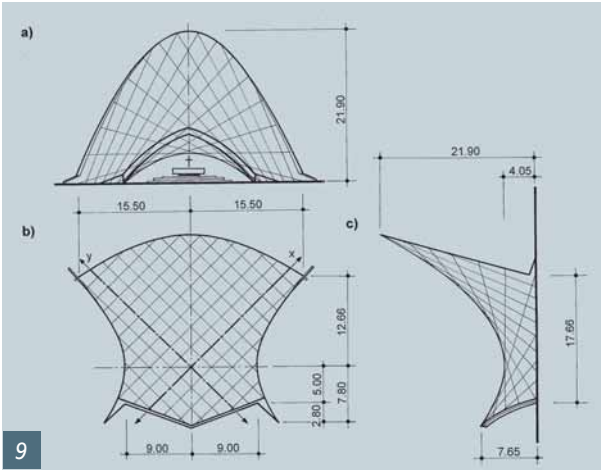
6



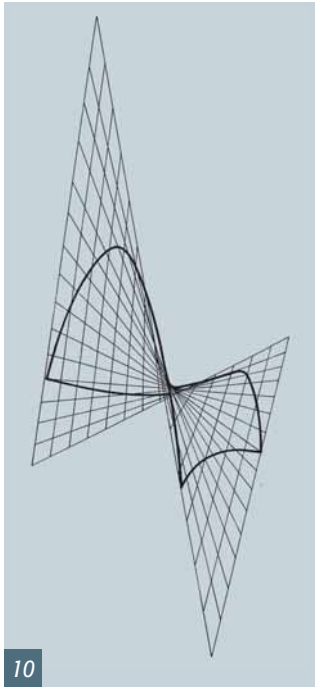
7



8



9



10

Obr. 6 Složení dvou hyperbolických paraboloidů – kostel Svatého Josefa
Fig. 6 Assembly of two hyperbolic paraboloids – Church of Saint Joseph the Laborer

Obr. 7 Složení tří hyperbolických paraboloidů – kaple Svatého Vincenta Pavla
Fig. 7 Assembly of three hyperbolic paraboloids – San Vicente de Paul Chapel

Obr. 8 Konstrukce tvaru deštníku
Fig. 8 Structure of the umbrella shape

která zohlednila skutečnou geometrii a materiálové charakteristiky, prokázala, že jak původní návrh, tak i modifikovaný návrh jsou bezpečné. Příčina zřícení původní konstrukce tak nebyla v chybě projektu, ale pravděpodobně nerovnoměrným odskružením konstrukce.

I když nová zástavba v okolí kaple poněkud znehodnocuje původní umělecký dojem z konstrukce, kaple stále slouží a dává svědectví o neskonalých možnostech tvárného betonu.

Kostel Zázračné Panny Marie

Kostel postavený v letech 1953 až 1955 je situován mezi rezidenčními budovami v městské části Narvarte v Mexico City. Kostel, který byl postavený na ploše 45,8 x 20,6 m, má střechu vytvořenou z jednadvaceti hyperbolických paraboloidů (obr. 11). Jejich tvar byl odvozen z již dříve popsaných deštníkových konstrukcí (obr. 12).

Félix Candela navrhl kostel s tradičním uspořádáním. V návrhu nechtěl měnit pojetí kostela, to co chtěl ukázat, bylo nové pojetí konstrukce a plastické možnosti betonu. Různě skloněné plochy hyperbolických paraboloidů s přirozeně tvarovanými sloupy zdůrazňují konstrukci nenásilně vyrůstající ze země a podobně jako gotické kostely dosahující nedostižných výšek (obr. 13 a 14).

Candela analyzoval konstrukci jednoduchou membránovou teorií popsanou v jeho publikacích. I tato stavba byla znovu analyzována metodou konečných prvků na univerzitě v Princetonu. Nová analýza zohlednila postupnou výstavbu konstrukce i její chování jako celku a odhalila kritická místa konstrukce ve vrcholu střechy. Je pozoruhodné, že Candela svým konstrukčním citem tato místa zesílil a více vyztužil. Stavba je stále ve velmi dobrém stavu.

Továrna Bacardí

Haly pro plnění lahví rumem Bacardí byly postaveny v roce 1960 v městě Cuautitlán. Konstrukce hal vznikla jako výzva ke konstrukci letištního terminálu v St. Louis, USA, kterou projektoval Anton Tedesko v roce 1954. Tuto konstrukci tvoří vzájemně se protínající válcové klenby ztužené jak na okrajích, tak i v místě jejich průniků.

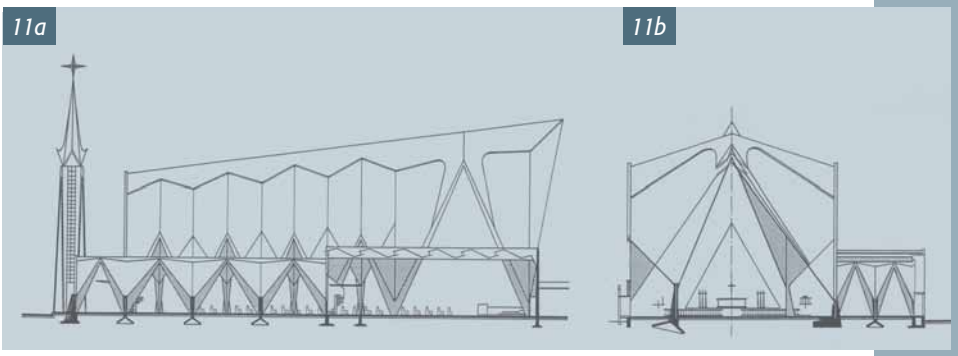
Haly továrny Bacardí jsou tvořeny šesti totožnými skořepinami, vzájemně spojenými skloněnými skleněnými stěnami (obr. 15). Skořepiny vznikly průnikem čtyř hyperbolických paraboloidů (obr. 16). Použití hyperboloického paraboloidu umožnilo Candelovi redukovat tloušťku

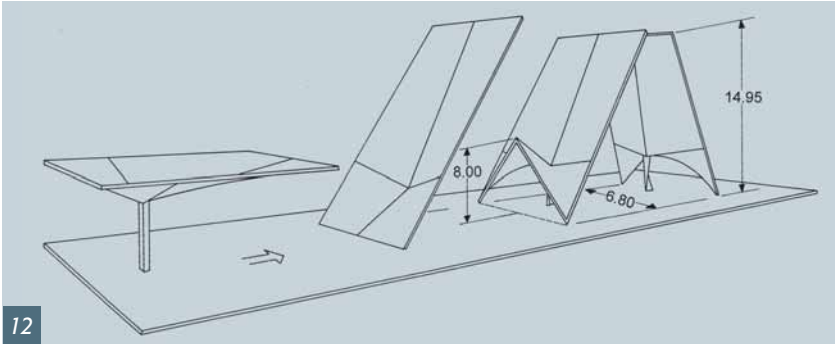
ztužujících žeber situovaných u okrajů a v průniku skořepin. Konstrukce tak získala lehkost a eleganci. Tloušťka převážné části skořepiny je jen 40 mm.

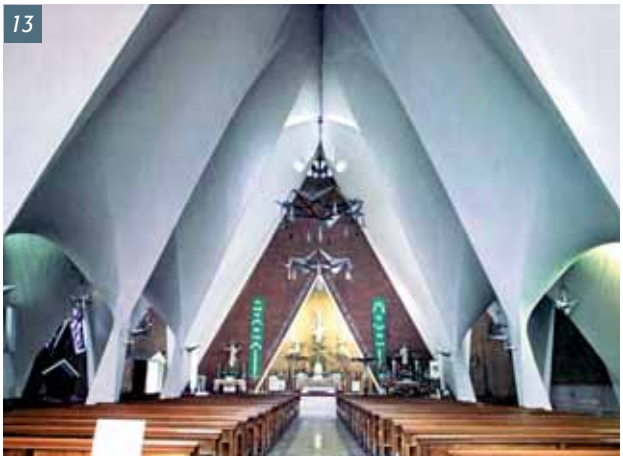
Vzdušnost řešení je také dána způsobem podepření. Skořepiny nejsou přímo uloženy na patkách, ale jsou podepřeny skloněnými stojkami přenášejícími zatížení do patek. Protože patky jsou vzájemně spojeny táhly přenášejícími vodorovnou sílu, jsou namáhány jen svislými silami.

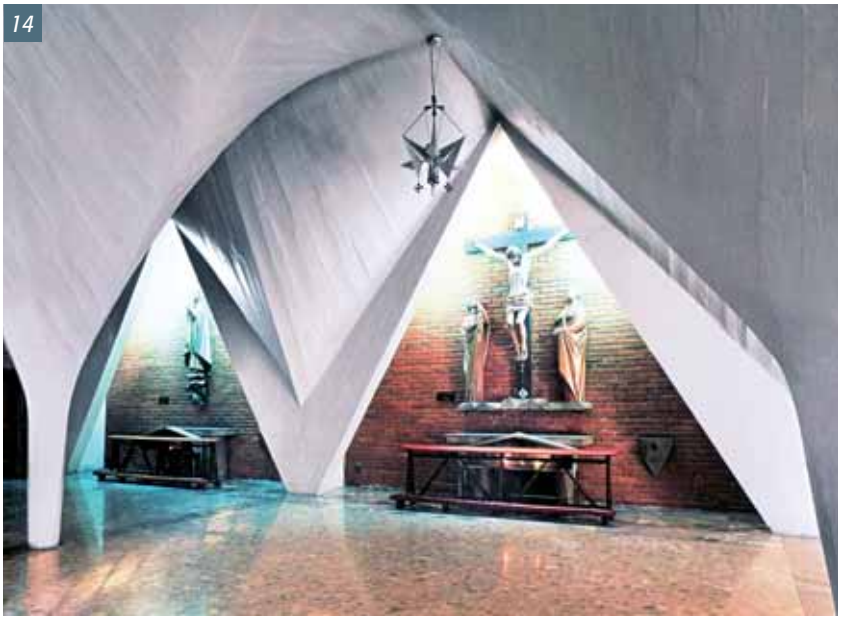
Haly byly stavěny na dvakrát. Nejdříve byly v roce 1960 postaveny tři skořepiny (obr. 3), které byly v roce 1971 doplněny o další tři. Haly jsou ve velmi dobrém stavu.

Je pozoruhodné, že vedení továrny zadalo projekt sousední administrativní budovy Mies van der Rohovi, který ji navrhl, podobně jako svoje ostatní stavby, jako obdélníkovou konstrukci podepřenou ocelovým skeletem. V těsné blízkosti tak stojí naprosto rozdílné stavby. Chladný ocelový skelet a tvárný plastický beton. A protože obě budovy se vyznačují kvalitní architekturou, nesoutěží spolu, ale doplňují se.









Obr. 9 Kaple Lomas de Cuernavaca: a) příčný řez, b) půdorys, c) podélný řez
Fig. 9 Chapel Lomas de Cuernavaca: a) cross section, b) plan, c) longitudinal section

Obr. 10 Kaple Lomas de Cuernavaca – odvození tvaru
Fig. 10 Chapel Lomas de Cuernavaca – evolution of the form

Obr. 11 Kostel Zázračné Panny Marie: a) podélný řez, b) příčný řez
Fig. 11 Church of Our Miraculous Lady: a) longitudinal section, b) cross section

Obr. 12 Kostel Zázračné Panny Marie – odvození tvaru
Fig. 12 Church of Our Miraculous Lady – evolution of the form

Obr. 13 Kostel Zázračné Panny Marie
Fig. 13 Church of Our Miraculous Lady

Obr. 14 Kostel Zázračné Panny Marie
Fig. 14 Church of Our Miraculous Lady

Restaurant Los Manantiales v Xochimilco, Mexico City

Restaurant Los Manantiales byl postaven na jihu Mexico City, v rekreační oblasti s názvem Xochimilco, což znamená místo, kde rostou květiny. Konstrukce střechy, jejíž tvar připomíná lotosový květ, patří mezi nejkrásnější stavby dvacátého století (obr. 17).

Střechu tvoří osm vzájemně spojených kleneb tvaru hyperbolického paraboloidu, situovaných nad kruhovým půdorysem (obr. 18 a 19). Vnější průměr skořepiny je 42,425 m, rozpětí v místě podepření je 32,4 m.

15

Obr. 15 Továrna Bacardí
Fig. 15 Bacardí factory

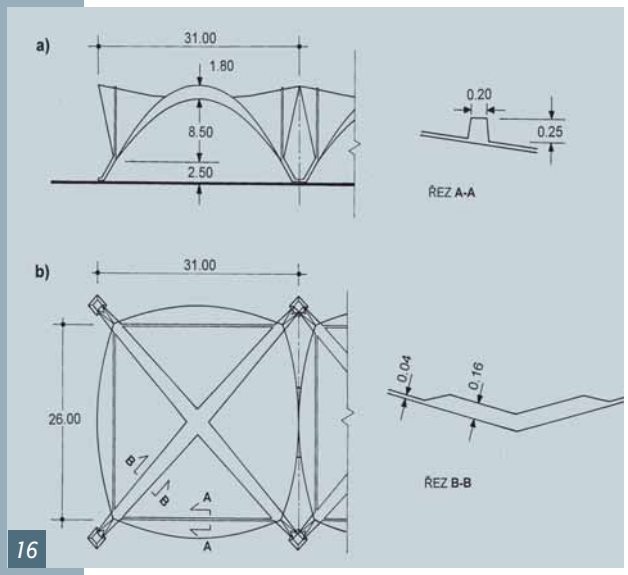
Obr. 16 Továrna Bacardí: a) příčný řez, b) půdorys
Fig. 16 Bacardí factory: a) cross section, b) plan

Obr. 17 Restaurant Los Manantiales
Fig. 17 Restaurant Los Manantiales

Obr. 18 Restaurant Los Manantiales: a) příčný řez, b) pohled
Fig. 18 Restaurant Los Manantiales: a) cross section, b) elevation

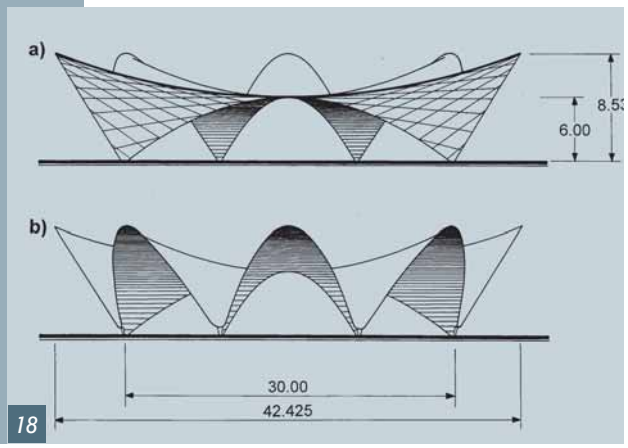
Obr. 19 Restaurant Los Manantiales – odvození tvaru
Fig. 19 Restaurant Los Manantiales – evolution of the form

Obr. 20 Restaurant akvária ve Valencii
Fig. 20 Restaurant for the aquarium in Valencia

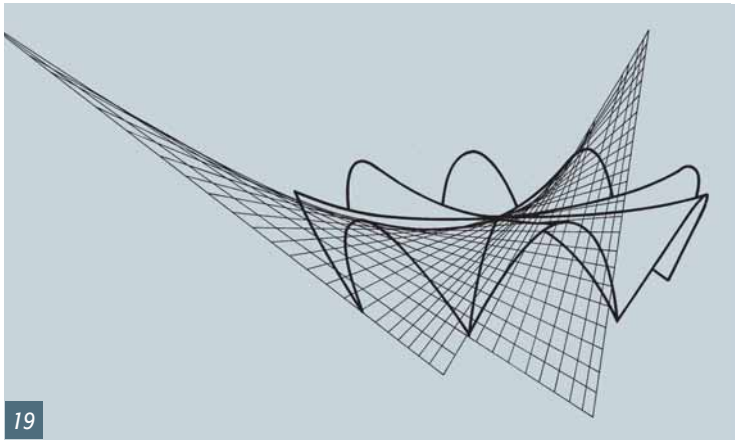


16

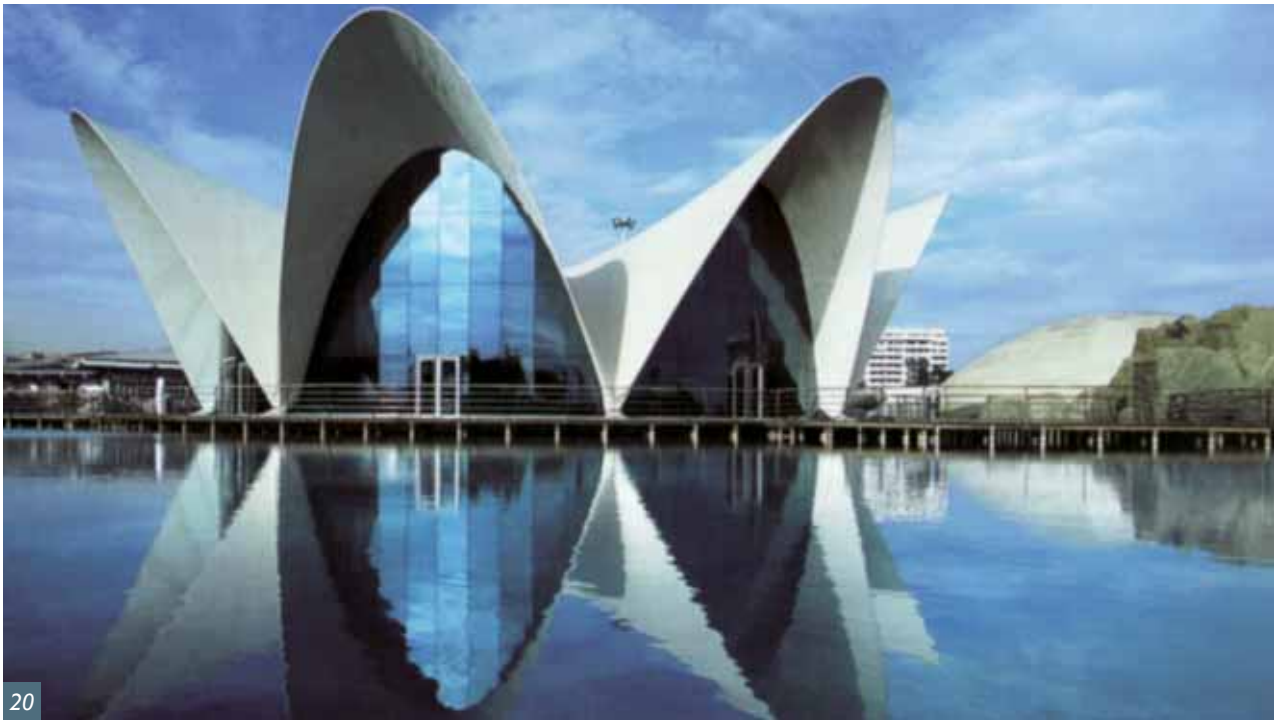
17



18



19



20

Skořepina je podepřena v místech úžlabí mezi klenbami patkami, které mají tvar obrácených deštníkových skořepin sestavených z hyperbolických paraboloidů. Skořepina má po celé ploše tloušťku jen 40 mm, v místě úžlabí je zesílena na 120 mm.

Statické účinky jsou ze skořepiny přenášeny do údolí mezi klenbami a odtud, podobně jako u obloukové konstrukce, jsou tlakem přeneseny do patek. Patky jsou po obvodě vzájemně spojeny táhly, která zachycují vodorovnou sílu výslednicí sil působících v radiálním směru.

V průběhu let vznikly na povrchu skořepiny smršťovací trhliny. Podrobná statická analýza konstrukce metodou konečných prvků však prokázala nejen správnost původního návrhu konstrukce, ale i dostatečnou únosnost střechy porušené trhlinami. Podle Prof. Billingtona se dá předpokládat, že střecha bude bezpečně sloužit dalších padesát let.

Restaurace byla postavena na poloostrově mezi plovoucími zahradami situovanými na zavodňovacích kanálech. Konstrukce střechy se tak zrcadlila v hladině mezi květy. Bohužel, v průběhu let hladina kanálů poklesla a zahrady byly nahrazeny budovami. Mnoho z přírodní krásy konstrukce se tak ztratilo.

Nicméně konstrukce se stala vzorem pro další tři podobné konstrukce: restauraci Seerose v Potsdamu, zahradní pavilon ve Stuttgartu a restaurant akvária ve Valencii, na jehož projektu Candela spolupracoval (obr. 20).

ZÁVĚR

Jak bylo uvedeno v úvodu, Candelovy konstrukce jsou krásné a současně hospodárné. Nedávné Candelovy skořepinové konstrukce postavené ve Valencii v blízkosti bombastických Calatravových staveb potvrzují, že skutečně představují vrchol architektonického a konstrukčního umění.

Ačkoliv Candelovy konstrukce vznikly ve specifických podmínkách poválečného Mexika, naznačují cestu, jak konstrukce navrhovat. Na jeho práce navázal švýcarský inženýr Heiz Isler [5], který, podobně jakou Antoni Gaudí, využíval modely k odvození optimálního tvaru skořepin. Nad jakýmkoliv půdorysem vytvářel konstrukce volného tvaru úsporně namáhané jen tlakem.

Je na nás, abychom takovéto konstrukce dále vyvíjeli a stavěli a přesvědčili veřejnost a investory, že tyto konstrukce jsou skutečným uměním. Je samozřejmé, že naše konstrukce musí být jiné, musí reflektovat současnou úroveň našeho poznání, musí se snadno stavět a musí mít dlouhodobou životnost a trvanlivost. Jedině tak získáme uznaní ve společnosti.

Příspěvek byl vypracován za finančního přispění MŠMT ČR, v rámci výzkumného záměru MSM 0021630519 „Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce".

Literatura:

[1] *De Anda Alanís E. X.:* Félix Candela, 1910–1997, The Mastering of Boundaries. ISBN: 978-8228-3724-5. Taschen 2008

[2] *Moreyra Garlock M. E., Billington D. P.:* Félix Candela – Engineer, Builder, Structural Artist. ISBN: 978-0-300-12209-1, Princeton University Art Museum, Yale University Press, New Haven and London 2008

[3] *Billington D. P.:* The Tower and the bridge. The New Art of Structural Engineering, ISBN 0-691-02393-X, Princeton University Press. Princeton, New Jersey 1985

[4] *Faber C.:* Candela - The Shell Builder, Reinhold Publishing Corporation. New York 1963

[5] *Chilton J.:* Heinz Isler, The engineer's contribution to Contemporary Architecture, ISBN 0 7277 2878 4, RIBA Publications. Thomas Telford, London 2000

Prof. Ing. Jiří Stráský, DSc., PE
Stavební fakulta VUTv Brně
Veveří 95, 662 37, Brno
tel.: 541 147 845, fax: 549 250 218

Stráský, Hustý a Partneři, s. r. o.
Bohunická 50, 619 00 Brno
tel.: 547 101 882, fax: 547 101 881
e-mail: j.strasky@shp.eu