

MOST NATAL, BRAZÍLIE ■ NATAL BRIDGE, BRASIL



Richard Novák, Petr Kocourek,
Jiří Stráský

Půdorysně zakřivený zavěšený most je popsán s ohledem na architektonické a konstrukční řešení, statickou a dynamickou analýzu a postup stavby. Most celkové délky 278,4 m má tři části – hlavní most a oboustranně navazující viadukty. Hlavní monolitický most délky 120 m je tvořen parapetním nosníkem, který je na vnějších okrajích zavěšen na středním pylonu tvaru písmene V, navazující viadukty jsou sestaveny z prefabrikovaných nosníků. Most je v půdorysném oblouku s poloměrem 500 m. ■ A plan curved cable-stayed bridge is described in terms of its architectural and structural solution, static and dynamic analysis and a construction process. The bridge of the total length of 278.4 m is composed of three parts – the main bridge and the adjoining viaducts on both sides. Main, cast-in-place bridge of length of 120 m, is formed by a channel girder, which is suspended on its outer edges on the central V-shaped pylon, connecting viaducts are assembled of precast beams. The bridge is in a plan curvature with a radius of 500 m.

V souvislosti s konáním fotbalového mistrovství světa v roce 2014 se v Brazílii před pěti lety rozběhla intenzivní výstavba dopravní infrastruktury a sportovišť. Město Natal, situované na severovýchodě země, leží v tropické oblasti Brazílie s malými teplotními výkyvy mezi dnem a nocí a mezi obdobími such

a dešťů. Město je známé především svými bílými písčitými plážemi a několik desítek metrů vysokou písečnou dunou. Ve městě žije 1 milion obyvatel.

Blízko centra města na původně nezastavěném území vyrostl v roce 2013 moderní fotbalový stadion se zázemím. Součástí stavby je i modernizace a zkapacitnění přilehlých komunikací v okolí stadionu. Most Natal (úplný název stavby Enconramento Av. Prudente de Moraes e Av. Lima e Silva) umožňuje mimoúrovňové křížení stávajících komunikací a přemostění podcházejícího rámového mostu.

USPOŘÁDÁNÍ PŘEMOSTĚNÍ

Při zpracování realizační dokumentace mostu se navázalo na předběžné řešení schválené v územním řízení. Most celkové délky 280 m převádí 7,1 m širokou dvoupřehovou komunikaci přes tři větve křižovatky a sousedí s vyústěním tunelu. Přemostění je tvořeno třemi částmi – hlavním mostem a oboustranně navazujícími (přístupovými) viadukty. Hlavní monolitický most délky 120 m má dvě symetrická pole zavěšená na středním pylonu (obr. 1, 2 a 3a), navazující viadukty délek 100 a 60 m mají typické rozpětí délky 20 m. Jsou tvořeny prefabrikovanými nosníky a spřaženou mostovkovou deskou (obr. 3b). Směrově je most veden v přímé, v přechodnicích a oblouku s poloměrem 500 m. Výškově je

Obr. 1 Stavba mostu Natal ■
Fig. 1 Natal Bridge construction

Obr. 2 Podélný řez mostem ■
Fig. 2 Bridge elevation

Obr. 3 Příčný řez nosnou konstrukcí:
a) zavěšený most, b) přístupové viadukty před sedlem ■ Fig. 3 Deck's cross section: a) cable stayed bridge, b) approach viaducts

Obr. 4 Zavěšený most: a) podélný řez, b) půdorys, c) sedlo kabelu, d) řez kabelem před sedlem, e) řez kabelem v sedle ■
Fig. 4 Cable-stayed bridge: a) elevation, b) plan, c) cable saddle, d) cable section in front of the saddle, e) cable section in the saddle

Obr. 5 Zavěšený most – konstrukční uspořádání ■
Fig. 5 Cable-stayed bridge – structural arrangement

Obr. 6 Pylon – původní návrh: a) příčný řez, b) podélný řez ■
Fig. 6 Pylon – original design: a) cross section, b) elevation

Obr. 7 Pylon – realizovaný návrh: a) příčný řez, b) podélný řez ■
Fig. 7 Pylon – realized design: a) cross section, b) elevation

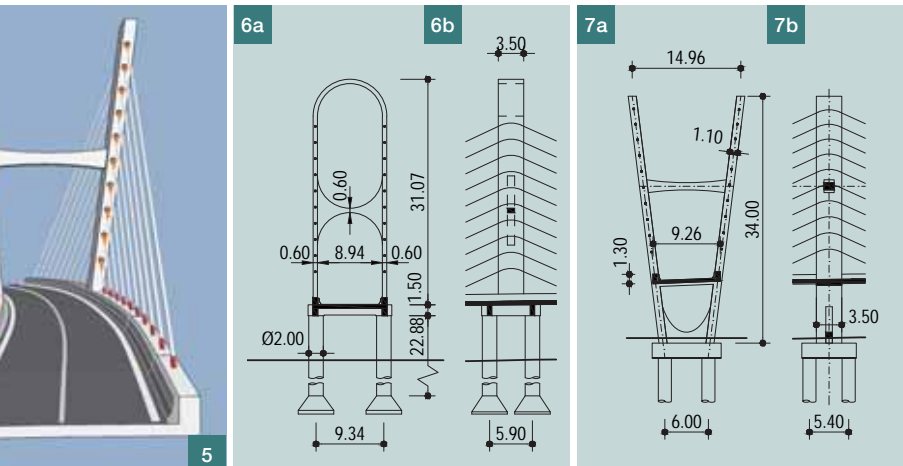
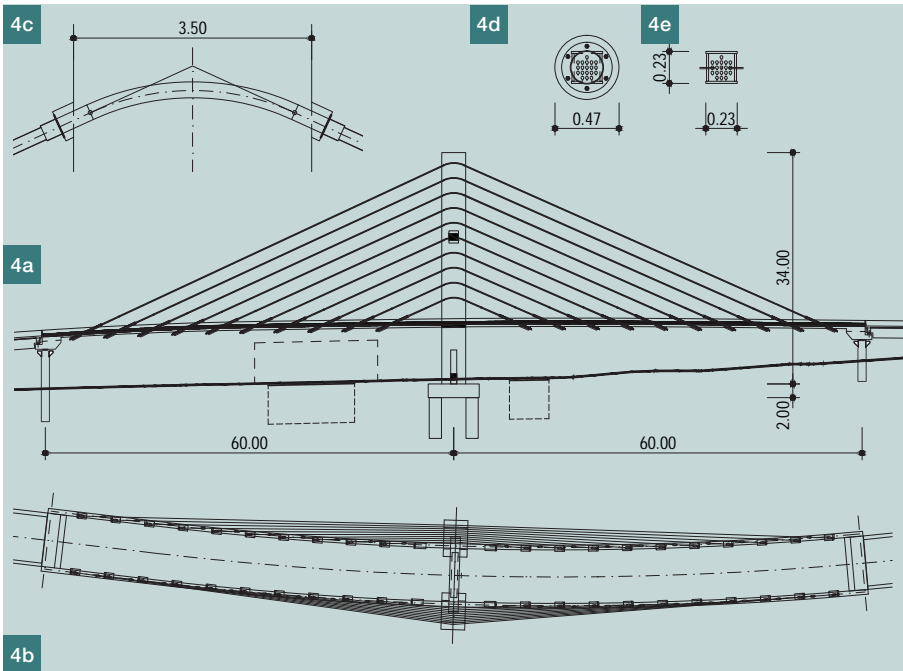
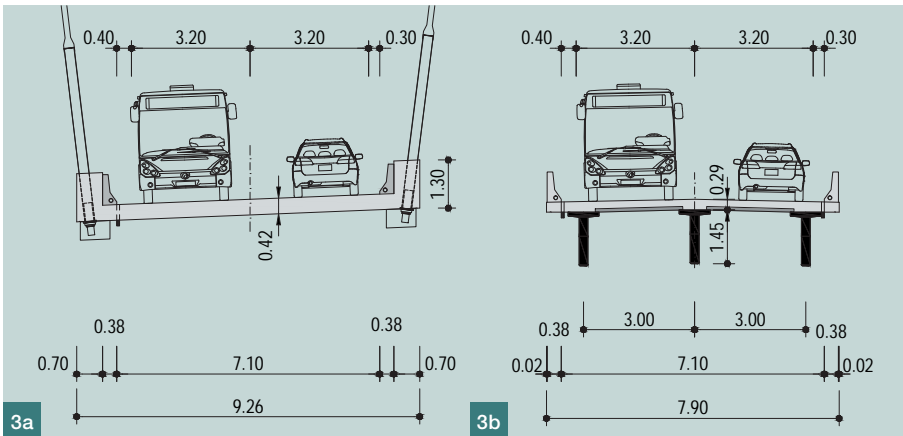
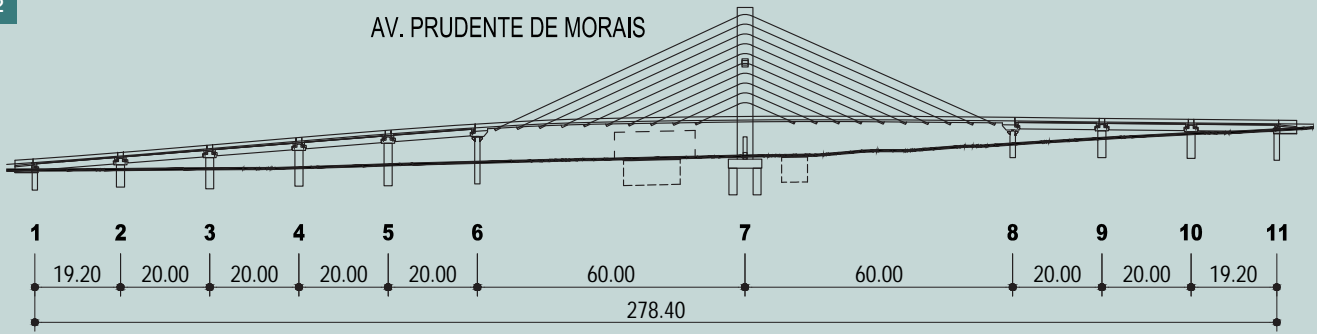
most ve vrcholovém zakružovacím oblouku se stoupáním tečen až 8 %. Příčný sklon na mostě je proměnný od 2% střešovitěho sklonu po 4% jednostranný sklon.

ZAVĚŠENÝ MOST

Zavěšený most je tvořen nosnou konstrukcí tvaru parapetního nosníku, pylonem tvaru písmene V a závěsy v harfovém uspořádání (obr. 4 a 5). Parapetní nosník je 1,3 m vysoký, mostovková deska má tloušťku 420 mm. Rozpětí polí je 60 m. Závěsy jsou kot-

2

AV. PRUDENTE DE MORAIS



veny v nosíku po 5 m, první závěs je kotven ve vzdálenosti 10,5 m od pylonu. Nosná konstrukce je vetknuta do pylonu a na krajních podpěrách je uložena prostřednictvím monolitického příčnicku na elastomerových ložiscích situovaných na dvojici sloupů krajní podpěry.

V původním projektu byl pylon tvořen dvěma štíhlými sloupy ztuženými obloukovou příčlím, příčnickem a masivním nadzemním základem (obr. 6). S ohledem na půdorysné zakřivení byly stojky namáhány velkými příčnými momenty od příčných sil působících v místě jejich kotvení v pylonu. Proto bylo přijato alternativní řešení, ve kterém má pylon tvar písmene V (obr. 5, 7 a 8). Příčným nakloněním stojek se zmenšil půdorysný lom kabelů, odpovídající radiální síly i příčný ohybový moment. Pylon má výšku 34 m a je ztužen dvěma příčnickami. První příčník je v úrovni nosné konstrukce a je s ní integrován. Druhý je přibližně ve dvou třetinách výšky pylonu a má proměnnou výšku. Průřez pylonu tvoří obdélník o rozměrech 1,1 a 3,5 m.

Závěsy systému VSL jsou situovány ve dvou skloněných rovinách, prochází krajními nosníky mostovky a jsou kotvené v nálticích situovaných na jejich spodním okraji. V pylonu prochází sedla, která zabraňují prokluzu lan (obr. 4c). Každý závěs je tvořen 19 lany s třinásobnou protikorozní ochranou. Lana jsou vedena v HDPE trubkách, které jsou do výšky 2,5 m nahrazeny antivandalovými ocelovými trubkami. Závěsy byly napínány symetricky z nosné konstrukce.

Pylon je vetknut do obdélníkového základu založeného na čtveřici velkopřůměrových pilot délky 30 m a průměru 1,8 m a ve spodní části je ztužen stěnou tloušťky 0,9 m eliptického tvaru. Krajní podpěry jsou tvořeny dvěma sloupy průměru 1,2 m, které pod terémem plynule přecházejí do vrtaných pilot stejného průměru.



Obr. 8 Pylon ■ Fig. 8 Pylon

Obr. 9 Přístupový viadukt: a) příčný řez u typické podpěry, b) příčný řez u krajní podpěry, c) detail 'A', d) detail 'B', e) podélný řez krajním polem ■ Fig. 9 Approach viaduct: a) cross section at a typical support, b) cross section at the end support, c) detail 'A', d) detail 'B', e) elevation of the end span

Obr. 10 Prefabrikovaný nosník: a) boční pohled, b) půdorys, c) detail kotvení kabelů, d) pohled na čelo, e) příčný řez uprostřed rozpětí ■ Fig. 10 Precast girder: a) elevation, b) plan, c) detail of tendons anchoring d) view on the face, e) cross section at mid-span

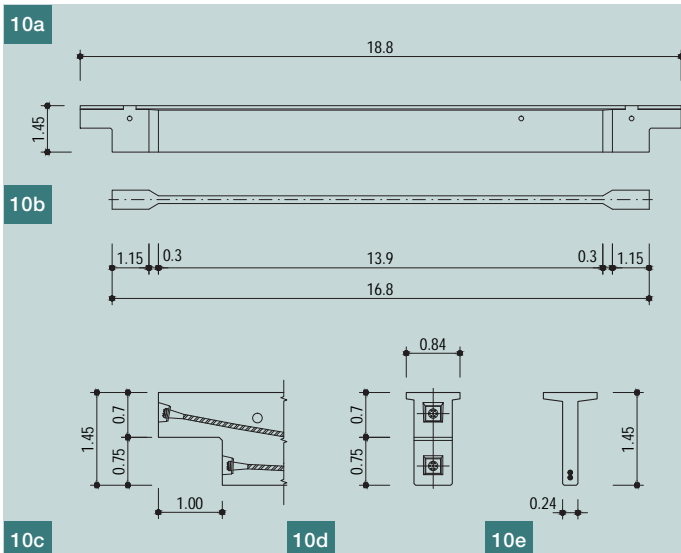
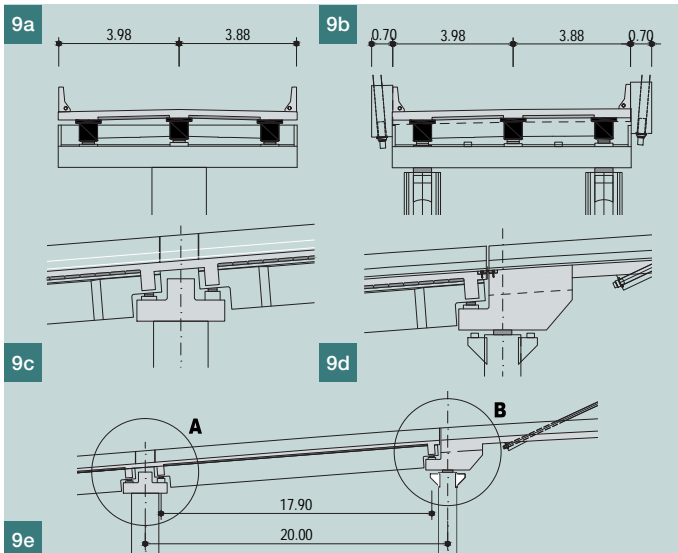
Obr. 11 Výpočtový model: a) globální roštový model, b) lokální deskostěnový model ■ Fig. 11 Calculation model: a) global grillage model, b) local shell model

Obr. 12 Ohybové momenty v pylonu ■ Fig. 12 Pylon's bending moments

Obr. 13 Obálka ohybových momentů v podélných trámech ■ Fig. 13 Longitudinal girders' bending moments envelop

Obr. 14 První vlastní tvary a frekvence: a) ohybová, b) kroutivá ■ Fig. 14 First natural modes and frequencies: a) bending, b) torsional

Obr. 15 Postup stavby: a) přístupová pole, b) zavěšená pole, c) napnutí závěsů ■ Fig. 15 Construction sequences: a) approach spans, b) cable-stayed spans, c) stays tensioning



PŘÍSTUPOVÉ VIADUKTY

Jižní přístupový viadukt má pět polí s rozpětími $19,2 + 4 \times 20$ m, severní přístupový viadukt má tři pole s rozpětími $2 \times 20 + 19,2$ m. V každém poli tvoří nosnou konstrukci tři předpjatá prefabrikované nosníky spřažené s betonovou monolitickou mostovkou, která byla betonována do ztraceného bednění tvořeného prefabrikovanými deskami (obr. 3b a 9). Prefabrikované nosníky délky 18,8 m a výšky 1,45 m jsou dodatečně předepnuty dvěma 6lanovými kabely (obr. 10). Pro jejich kotvení je tloušťka stěny 240 mm u podpěr zvětšena na 600 mm.

Každý nosník je uložen prostřednictvím elastomerového ložiska na monolitický příčník. V podélném směru se

jedná o soustavu prostých polí, která jsou nad vnitřními podpěrami spojena krátkou monolitickou deskou tloušťky 200 mm. Železobetonové příčníky obřáčeného T průřezu jsou rámově spojeny s pilíři.

Pilíře jsou kruhového průřezu a na terénu přecházejí plynule do velkopřůměrových vrtaných pilot průměru 1,8 m. Výška pilířů je od 0,5 do 4,8 m. Krajní opěra je tvořena úložným prahem s monoliticky spojenou závěrnou zídou s přechodovou deskou. Křídla opěr tvaru úhlových opěrných zdí jsou oddělována a jsou samostatně založena. Tvoří opěrnou zeď pro přilehlou komunikaci ve stísněných prostorových podmínkách. Úložný práh opěry je založen na dvojici vrtaných pilot průměru 1,2 m.

STATICKÁ A DYNAMICKÁ ANALÝZA

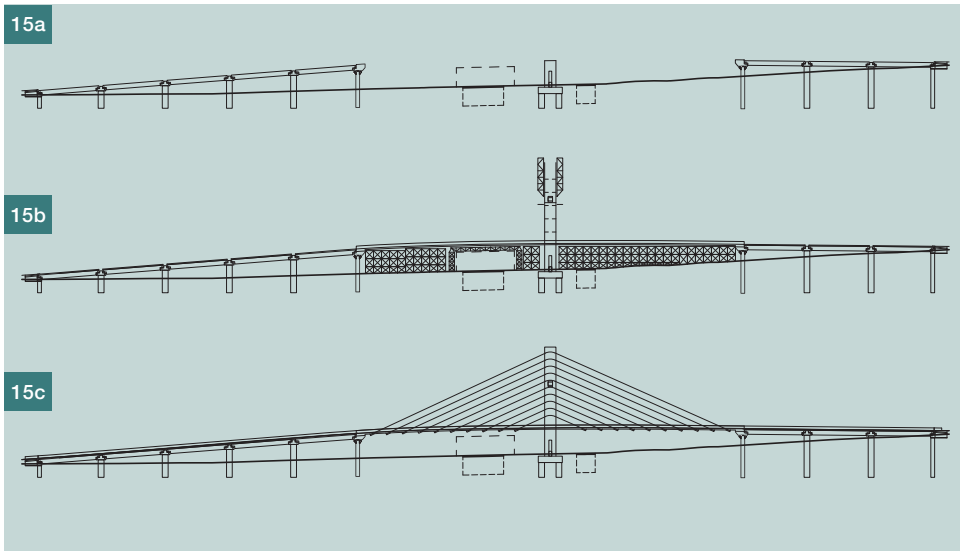
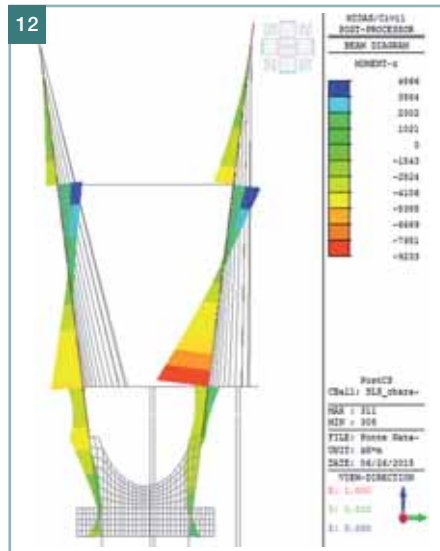
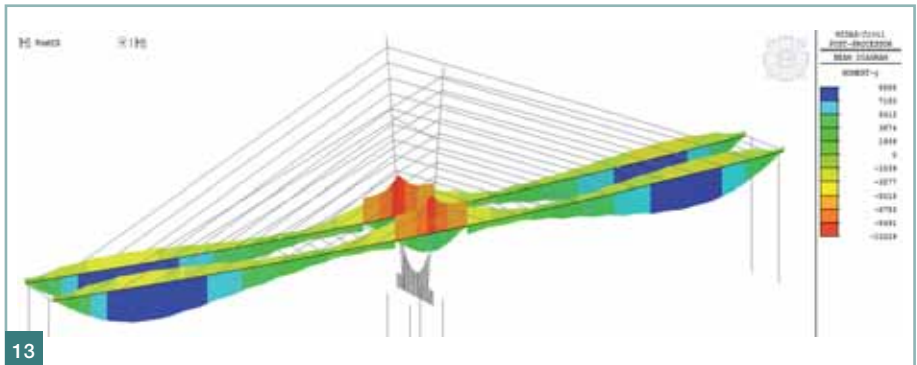
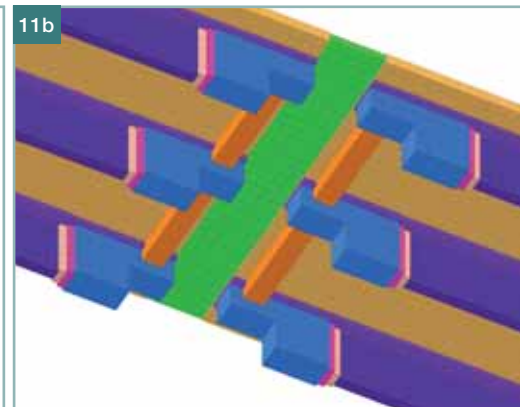
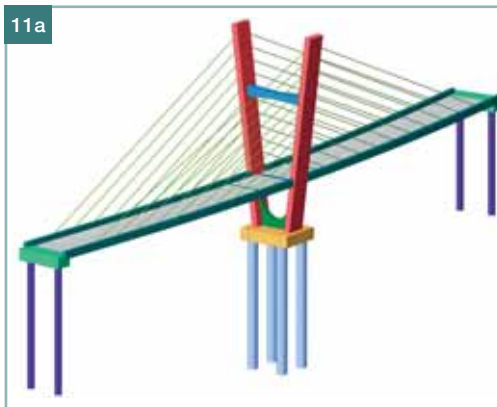
Statická a dynamická analýza konstrukce byla vyšetřována na globálním roštovém modelu i na lokálních deskostěnových modelech. Roštový model zahrnoval jak hlavní zavěšenou část, tak i obě přístupové rampy. Na něm byly vyhodnocovány účinky zatížení při postupné výstavbě i v definitivním stavu. Sloužil též pro vyhodnocení dynamických vlastností konstrukce (obr. 11a).

Lokální deskostěnové modely byly použity pro dimenzování spřažené desky přístupových polí, ověření průběhu efektivních šířek mostovkové desky zavěšené části, pro návrh spojovací desky a pro návrh uložení předpjatých prefabrikovaných nosníků (obr. 11b).

Geometrie pylonu byla zvolena tak, aby jeho ohybová namáhání od stálých zatížení byla minimalizována. Vzhledem k půdorysnému zakřivení nosné konstrukce zavěšené části by v ideálním případě měly mít obě stojky pylonu rozdílný odklon od svislé roviny. Pro symetrický sklon byla optimalizace geometrie určena tak, aby v obou stojkách pylonu byly špičky ohybových momentů přibližně shodné (obr. 12).

Mostovka zavěšeného mostu byla navržena jako železobetonová deska zatížená vnějšími osovými silami působícími v příčném i podélném směru. Příčné i podélné předpětí je vedeno v plastových kanálcích. Obr. 13 ukazuje obalovou čáru ohybových momentů v trámech mostovky.

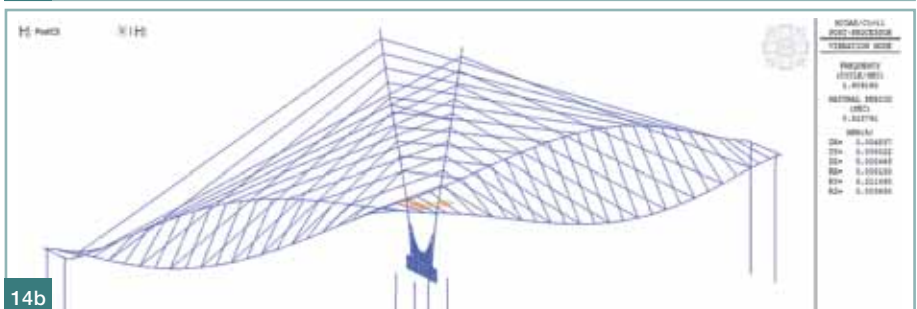
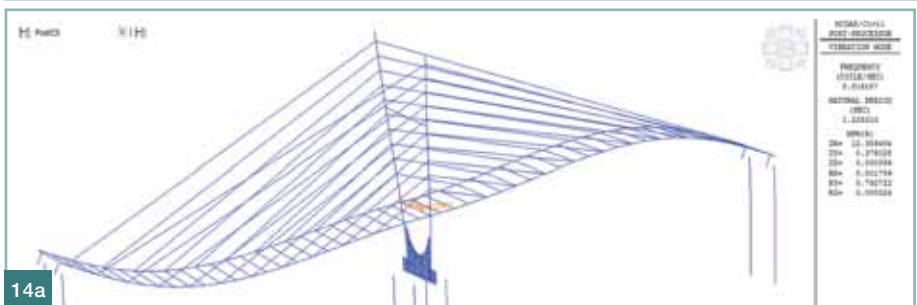
Pro posouzení aerodynamické stability byly nejdříve určeny vlastní tvary a frekvence kmitání. Poměr první kroutivé frekvence $f_{t(1)} = 1,91$ Hz (obr. 14b) k první ohybové frekvenci f



$\omega_{(1)} = 0,81$ Hz (obr. 14a) je 2,4. To ukazuje, že konstrukce má pro zatížení větrem dostatečný stupeň bezpečnosti [1], [2].

VYBAVENÍ MOSTŮ

Vozovka je tvořena betonovou přímo pojižděnou mostovkou. Svodidla jsou monolitická betonová tvaru New Jersey a jsou monoliticky spojená s nosnou konstrukcí. Na svodidla jsou upevněny stožáry veřejného osvětlení. Přívod napájení k osvětlení je veden skrz svodidla. Odvodnění mostu je řešeno osazením PVC trubek procházejících skrz nosnou konstrukci. Trubky jsou rozmístěny ve vzdálenosti 2 m a voda je jimi odváděna volným pádem pod most. Všechna ložiska jsou vyztu-





žená elastomerová, všesměrná. Mostní závěry na opěrách a podpěrách 6 a 8 jsou z vyztuženého elastomeru, typ EuroFlex. Součástí mostu je i slavnostní osvětlení (obr. 18).

STAVBA MOSTU

Po zhotovení monolitických částí založení a spodní stavby byly na příčnicku osazeny předpjaté nosníky (obr. 15a a 16). Na nosníky byly uloženy prefabrikované desky a v každém poli byla vybetonována spřažená deska. Následně byla vybetonována část desky nad podpěrami.

V zavěšené části byl pylon betonován do překládaného bednění po 2 m (obr. 15b). Mostovka byla betonována na pevné skruži. Po osazení betonářské a předpínací výztuže (obr. 17) byly po segmentech délky 20 m poutnický (střídavě) vybetonovány podélné trámy a deska mostovky. Po napnutí příčného předpětí byla napnuta dvojice krátkých podélných kabelů. Průběžně byly instalovány a napínány závěsy (obr. 15c). Napínání závěsů bylo předepsáno minimálně ve dvou krocích. Po napnutí všech závěsů na projek-

ovanou hodnotu byla demontována pevná skruž a proběhly dokončovací práce.

ZÁVĚR

Stavba mostu byla zahájena v říjnu 2013, most byl dokončen v červnu 2014. Most byl postaven bez podstatných problémů v požadované kvalitě.

Volba konstrukčního uspořádání a řešení detailů příslušenství mostu je v Brazílii značně odlišné od střeoevropských zvyklostí. Velký důraz je kladen na využití prefabrikovaných nosníků. Svodidla jsou zásadně betonová monolitická, mostní závěry gumové, vtlačené do spáry mezi betonovými konstrukcemi či kobercového typu. IG průzkum je prováděn vždy pouze formou SPT (Standard Penetration Test). Řešení detailů spodní stavby a nosné konstrukce musí být co nejjednodušší. Bohužel je kvalita provádění na řádově nižší úrovni než v ČR. Schvalování změn při výstavbě je přímočaré a není zatíženo příliš mnoha stupni odsouhlasení. Míra požadovaných změn v průběhu prací odpovídá střeoevropským zvyklostem. Odborná spolupráce se

Obr. 16 Prefabrikované nosníky

■ Fig. 16 Precast girders

Obr. 17 Výztuž mostovky zavěšeného mostu

■ Fig. 17 Reinforcement of the deck of the cable-stayed bridge

Obr. 18 Osvětlení mostu ■ Fig. 18 Bridge illumination

zhotovitelem byla v průběhu zpracování projektu velice dobrá.

Na základě dobré zkušenosti s projektem mostu Natal získal projektant v Brazílii další zakázku na projekt nového půdorysně zakřiveného zavěšeného mostu.

Investor	SEMOPI, Prefeitura Municipal do Natal, Brasil
Zhotovitel	sdržení Grupo AGIS, Sao Paulo, Brasil
Hlavní inženýr projektu	Enescil, Sao Paulo, Brasil
Realizační dokumentace	Stráský, Hustý a partneři, s. r. o., Brno

Literatura:

- [1] MATHIVAT, J. *The cantilever construction of prestressed concrete bridges*. New York: John Wiley & Sons, 1983
- [2] WALTHER, R., HOURIET, B., WALMAR, I., MOÏA, P. *Cable Stayed Bridges*. London: Thomas Telford Publishing, 1998



Ing. Richard Novák
e-mail: r.novak@shp.eu
Stráský, Hustý
a partneři, s. r. o., Brno



Ing. Petr Kocourek, Ph.D.
e-mail: p.kocourek@shp.eu
Stráský, Hustý
a partneři, s. r. o., Brno



prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.
e-mail: j.strasky@shp.eu
Fakulta stavební VUT v Brně
& Stráský, Hustý
a partneři, s. r. o., Brno



Text článku byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.