

# Vliv geometrického tvaru konstrukčních prvků na životnost betonových konstrukcí na mořském pobřeží

## THE EFFECT OF THE GEOMETRIC SHAPE OF STRUCTURAL ELEMENTS ON THE LIFE CYCLE OF OFFSHORE CONCRETE STRUCTURES

VICENTE CUSTÓDIO MOREIRA DE SOUZA, LUIZ CARLOS MENDES, JOSÉ MARIA ROCHA DE ALMEIDA

Beton přímořských stavebních objektů je vystavován agresivním účinkům, proti nimž je nutné objekty v zájmu zvyšování jejich životnosti chránit. V tomto článku jsou uvedena některá doporučení pro projektování betonových částí staveb, přičemž zvláštní pozornost je věnována vlivu tvarového uspořádání objektů na zvyšování jejich odolnosti proti vlivům agresivního mořského prostředí.

*Concrete of offshore building structures is exposed to aggressive effects from which they must be protected in order to extend their life cycle. This article presents some recommendations for the design of concrete parts of constructions. The emphasis is placed upon how the shape of the constructions can improve their resistance to the effects of the aggressive seashore environment.*

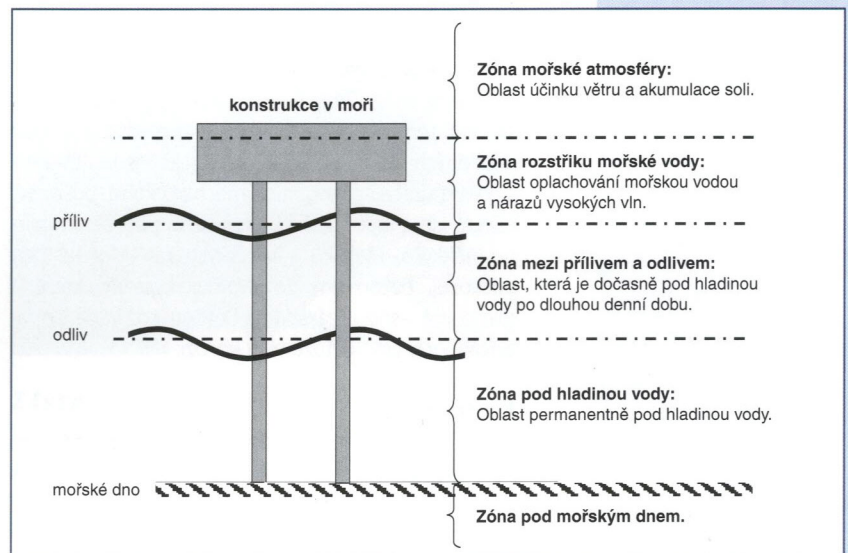
### Úvod

V současné době již známe značný počet faktorů, které ovlivňují konstrukce ze železobetonu a předpjatého betonu; z nich mořská voda je jedním z nejagresivnějších činitelů. Betonové konstrukce na mořském pobřeží jsou vystaveny poškozování v důsledku jednak chemické agresivity, ale také mechanického působení odlivů a přílivů, nárazů lodí a vln a v neposlední řadě i biologických účinků různých druhů mořských mušlí a řas. Abychom ilustrovali význam geometrického uspořádání stavebních prvků pro životnost betonových konstrukcí na mořském pobřeží, popíšeme havárii, ke které nedávno došlo na přístavní hrázi v zálivu Guanabara v Rio de Janeiru a které bylo možno předejít, kdyby byla věnována přiměřená péče jak návrhu, tak také údržbě objektu.

### ÚČINEK MOŘSKÉ VODY

Chemické působení mořské vody na betonové konstrukce je vyvoláno několika roztoky solí, které se ve vodě nachází: jsou to sírany, chloridy, soli hořčíku, vápník,  $\text{CO}_2$  a draslík. Chloridy jsou nejagresivnější. K jejich infiltraci do masы betonu dochází v zásadě během přílivu a odlivu, a to zejména v zálivech. Na zvýšení agresivity chloridů působí slunce a výškový rozdíl mezi přílivem a odlivem. NEVILLE (1997) uvádí, že chloridy mohou být přenášeny rovněž vzduchem na vzdálenost až dvou kilometrů v závislosti na větru a topografií terénu. Kromě vlivu chloridů, které napadají výztuž, betonová konstrukce trpí rovněž nezávislým a současně probíhajícím účinn

kem síranů, které v širokém měřítku reagují s konstrukčním betonem (DE SOUZA ET AL, 1998); dále škodlivým působením  $\text{CO}_2$ , rozpuštěným v mořské vodě. Tento nepříznivý vliv se projevuje zejména v chráněných zálivech typu Guanabara s vysokou koncentrací oxidu uhličitého pocházejícího ze znečištěného ovzduší (MEHTA, 1994). Na obr. 1 je zobrazena obecná klasifikace mikroklimatu s komentářem CEB pro stavby v moři.



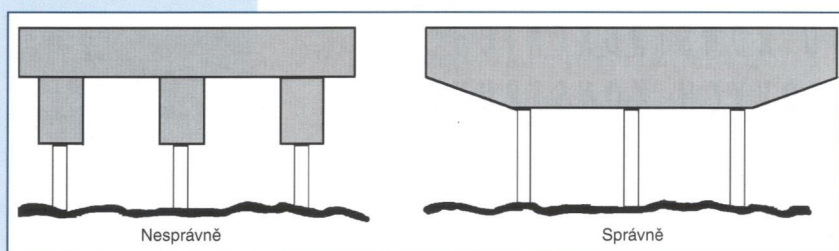
Postup koroze výztuže železobetonových konstrukcí do značné míry závisí na dvou činitelích: přítomnosti kyslíku a pórovitosti povrchových vrstev betonu. Proto lze dospět k následujícím závěrům:

- nejkritičtějšími oblastmi je zóna rozstříku mořské vody a zóna mořského ovzduší – je zde vysoká koncentrace kyslíku a mořskou vodou nenasycené povrchy konstrukce,
- proces koroze již není tak aktivní v zóně pod mořskou hladinou, protože zde je nízká koncentrace kyslíku a malá propustnost betonu,
- v zóně mezi přílivem a odlivem je vysoká koncentrace kyslíku, koroze je však omezena, poněvadž schopnost difúze povrchu betonu je nízká v důsledku nasycení betonu vodou.

Agresivní činidla obsažená v mořských deštích jsou většinou ukládána v zóně rozstříku mořské vody a v zóně mořského ovzduší, kde dochází k jejich krystalizaci.

Obr. 1 Klasifikace mořského prostředí podle Comité Euro-International du Beton – CEB

Fig. 1 Classification of the offshore environment by the Comité Euro-International du Beton – CEB



Obr. 2 Geometrická koncepce konstrukce přístavní hráze

Fig. 2 Geometrical concept of the structure of the jetty

V případě, že povrch železobetonu se nachází v zóně rozstříku mořské vody či v oblasti konstrukce nenasyčené vodou, dochází k urychlení procesu koroze výztuže v důsledku kombinovaného účinku vzdušného kyslíku, rozstříkované vody a nárazů vln s tím, že mezi propustností, korozí a degradací betonu dochází ke vzniku začarovaného kruhu, který časem způsobí havárii konstrukce.

Téměř celý proces, který má dopad na korozi výztuže, závisí na difuzi, tj.:

- karbonizaci: pronikání  $\text{CO}_2$  póry v betonu (difuze  $\text{CO}_2$ ),
- penetraci chloridů: difuze chloridů z vody póry betonu,
- korozi výztuže: závisí na difuzi kyslíku ze vzduchu v pórech betonu.

Mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti betonu se časem mění. Pokud není konstrukce udržována, dojde k těmto změnám rychleji v důsledku působení uvedených chemických činidel jako jsou chloridy a karbonizace, působením mechanického působení nárazů vln a lodí, jakož i biologickým působením plísní, měkkýšů, lišejníků a mořských řas. Mořské řasy poškozují beton tím, že uvolňují kyseliny, které – mimo jiné – snižují zásaditost betonu, což vede k oslabování ochrany výztuže vůči korozi.

### KOROZE

Koroze výztuže je pravděpodobně hlavní příčinou poruch železobetonových konstrukcí a má za následek vysoké náklady na rekonstrukce a opravy těchto staveb. U betonových konstrukcí na mořském pobřeží je průběh koroze výztuže, běžnější v zóně rozstříku mořské vody v důsledku kombinovaného účinku oplachování vodou, nárazy vln a vlivem vysokých teplot (LINDBERG, 1987). Koroze může být buď chemická, ale převážně je vyvolána elektrochemickým procesem, k němuž dochází za přítomnosti vody nebo velmi vlhkého prostředí (relativní vlhkost nad 60 %). Produkty koroze jsou oxidy a hydroxidy, které vyvolávají nejprve výskyt rezavých skvrn na betonu, a poté trhliny a odlupování na povrchu betonu v důsledku zvětšování objemu zkorodované oceli (HELENE, 1986).

Koroze prutů výztuže je obvykle vyvolána karbonizací betonu a agresivitou chloridů. Beton poskytuje vynikající ochranu vůči korozi oceli (ACI, 1985) díky své vysoké alkalitě (pH kolem 12,5). To sice vede k vytváření pasivní vrstvy oxidů na povrchu prutů výztuže, avšak vliv karbonizace vede ke snížení pH (SCHLESSEL, 1987), čímž dochází k narušování této ochranné vrstvičky. Aby se tomu předešlo, je třeba, aby beton měl velmi nízkou propustnost, což je tou nejlepší

Obr. 3 Půdorys mola

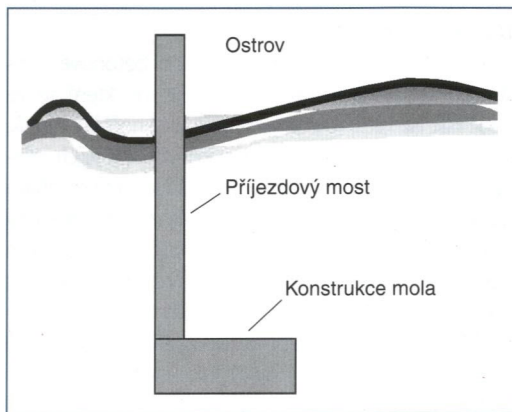
Fig. 3 Plan of the jetty

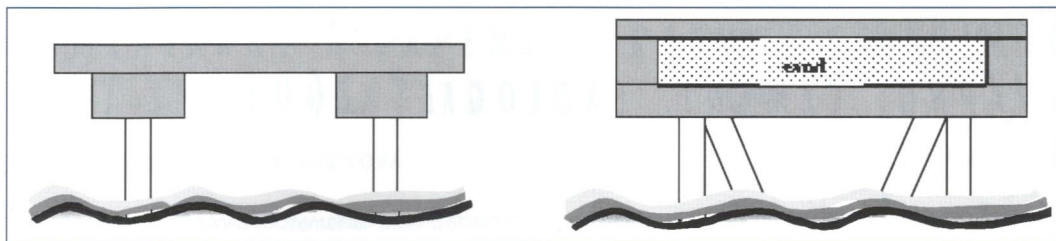
ochranou proti karbonizaci a působení chloridů. Nepropustnost rovněž zvyšuje elektrický odpor betonu, což brání výskytu korozivních elektrických proudů. Vzhledem k tomu, že koroze prutů výztuže je elektrochemickým procesem, je tak zajištěna i ochrana vůči korozi této výztuže.

### GEOMETRICKÝ TVAR KONSTRUKCE

Přímořské konstrukce jsou vystaveny účinku odlišného mikroklimatu, což má za následek, že některé prvky konstrukce nebo celé její části mohou být vystaveny agresivním vlivům, které nepůsobí na jiné části téže konstrukce. Tak například některé konstrukční prvky nejsou vystaveny slunečnímu ohřevu či větru, takže mají stálou povrchovou vlhkost. Oba tyto stavy povrchu usnadňují průnik soli do pórů v betonu, což působí na urychlení degradace konstrukce (CEB, 1989). Při navrhování nábrežních železobetonových konstrukcí je tedy třeba, aby projektant zahrnul do svého rozhodování také vliv prostředí (makroklima a mikroklima) včetně směru větru, přílivu a odlivu, mořských vln, znečištění ovzduší a slanosti mořské vody. Všechny tyto faktory nejsou běžně brány v úvahu. V Brazílii je tomu tak zejména kvůli prováděcím směrnicím pro projektování a provádění železobetonových konstrukcí (NBR6118/78), které vůbec neberou v potaz vliv mikroklimatu na trvanlivost takových staveb. Všeobecné předpisy železobetonových konstrukcí (zejména pokud jde o předpis krycí vrstvy betonu) těmto požadavkům neodpovídají. Pozornost je nutno věnovat nejen krytí prutů výztuže, nýbrž také tvaru konstrukce a předepsané jakosti betonu, aby dopad škodlivých faktorů na konstrukci byl omezen.

Při stanovení tvaru je třeba především pečovat o krytí prutů výztuže s tím, že je třeba mít na mysli, že nadměrná tloušťka krycí vrstvy může být stejně tak nebezpečná pro trvanlivost konstrukce jako krytí nedostatečné. Velká tloušťka krycí vrstvy je nejenom neekonomická, ale zvyšuje výskyt povrchových trhlinek, což následně umožňuje pronikání agresivních činidel. Správné určení tloušťky krycí vrstvy je závislé na nepropustnosti, na průměru výztužných prutů, druhu cementu a na okolním mikroklimatu – tak například krytí výztuže sloupu nacházejícího se v zóně rozstříku mořské vody nemůže být stejné jako krycí vrstva sloupu uvnitř budovy.





Obr. 4 Konstruktivní uspořádání jednotlivých částí mola

Fig. 4 Structural layout of parts of the jetty

Pokud jde o nepropustnost a pevnost betonu – ta přímo závisí na správné volbě vodního součinitele (ACI BC 318 uvádí pro betony nalézající se v přímém kontaktu s mořskou vodou max. poměr  $v/c = 0,4$ ).

Pokud jde o geometrii konstrukčních prvků, pak TUUTTI (1991) uvádí, že ke karbonizaci dochází spíše v rozích než na rovných plochách konstrukce. Znamená to, že při stejném druhu betonu jsou ke karbonizaci náchylnější trámy než desky. Na obr. 2 je uveden příklad téže konstrukce, navržené v nevhodném a ve správném tvarovém uspořádání.

Je zřejmé, že důležitými faktory ochrany prutů výztuže proti korozi není jen poměr  $v/c$  a množství cementu, nýbrž rovněž tloušťka krycí vrstvy a tvar stavebních prvků. Projekční předpisy pro železobetonové konstrukce na mořském pobřeží požadují také uvádět typ bednění, protože to má významný vliv na drsnost povrchu, dále návrh opatření na ochranu nevyzrálých povrchů betonu a odpovídající program údržby.

#### PŘÍKLAD NESPRÁVNĚ NAVRŽENÉ KONSTRUKCE

Konstrukce je přístavní molo nacházející se na ostrově uvnitř zálivu Guanabara. Molo bylo vybudováno v sedmdesátých letech.

Molo sestává ze dvou odlišných částí: příjezdového mostu a přístavní konstrukce. Pokud jde o síly, působící na konstrukce, pak na příjezdový most působí stálé zatížení a zatížení dopravou, zatímco na přístavní konstrukci působí stálé zatížení, zatížení dopravou a zatížení provozem lodí. Stavba je vyobrazena na obr. 3, 4 a 5.

Je patrné, že zatímco příjezdový most je typickým silničním mostem, sestávajícím z dvou nosníků, desky a sloupů, byla přístavní konstrukce pojata jako skříňový nosník, vyplněný pískem, aby konstrukce mohla odolávat možným nárazům lodí.

#### Prohlídka stavby ukázala, že:

- konstrukce přístavního mola není téměř poškozena; jsou zde pouze velmi malá místa s poškozením povrchu,
- konstrukce příjezdového mostu byla do značné míry napadena korozi prutů výztuže a trhlinami.

#### V archivech brazilského námořnictva byly nalezeny některé důležité informace o stavbě:

- stavba byla provedena zkušeným stavebním dodavatelem, s dlouholetou zkušeností se stavbami na mořském pobřeží,
- beton měl vysokou kvalitu,
- kvalita betonu všech konstrukčních prvků byla stejná,
- během výstavby mola nedošlo k haváriím.

Vysvětlení odlišného chování příjezdového (spojovacího) mostu a přístavního mola spočívá v tvarovém uspořádání těchto částí stavby. Uzavřené prostory pod spojovacím mostem, vytvořené mezi vnitřními líci trámů a deskou mostu, umožnily vznik velmi vlhkého mikroklimatu bez přístupu slunečního ohřevu a bez pohybu vzduchu. Plochy byly přitom ostříkávány vlnami s vysokou koncentrací soli. Z tohoto důvodu započal a pokračoval proces degenerace konstrukce projevující se zejména korozi prutů výztuže.



Obr. 5 Celkový pohled na molo

Fig. 5 General view of the jetty

#### ZÁVĚR

Je známo, že koroze výztuže je hlavní příčinou poškození železobetonových konstrukcí přímořských staveb. Proces koroze začíná z mnoha příčin, z nichž mnohým lze předejít vhodným návrhem konstrukce. Důležitá je správná volba tvaru konstrukce, kterou zejména lze výrazně oddálit zhoršování stavu a podstatně zvýšit její trvanlivost. I to je důvodem toho, proč směrnice CEB uvádí, že u konstrukcí vystavených agresivnímu prostředí je nutno věnovat v projektu zvýšenou pozornost architektonické koncepci, jejímž cílem je zajistit bezproblémový přístup ke všem stavebním prvkům tak, aby mohla být zajištěna kontrola a údržba konstrukce bez dalších dodatečných opatření.

Vicente Custódio Moreira de Souza, PhD, MSc  
e-mail: [desouza@civil.uff.br](mailto:desouza@civil.uff.br)

Luiz Carlos Mendes, DSc, MSc  
e-mail: [lcarlos@civil.uff.br](mailto:lcarlos@civil.uff.br)

José Maria Rocha de Almeida, MSc

Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria 156  
Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

Text překladu upravil:  
Doc. Ing. Leonard Hobst, CSc.