

Aspectos do túnel imerso Santos-Guarujá

MARCOS ANTONIO PEREIRA DE GODOY - ENG. - <https://orcid.org/0009-0007-4940-6940> (mapgodoy@yahoo.com) ;

TARCÍSIO BARRETO CELESTINO - GER. DE ENG. - <https://orcid.org/0000-0002-5062-6779> – Themag Engenharia

RENE KUIPER - ENG. - TUNNEL ENGINEERING CONSULTANTS, AMERSFOORT, HOLANDA

SELMO CHAPIRA KUPERMAN - DIR. – Desek Ltda

APRESENTAM-SE ALGUNS ASPECTOS TÉCNICOS DO PRIMEIRO TÚNEL IMERSO PROJETADO NO BRASIL, INTERLIGANDO-SE AS CIDADES DE SANTOS E GUARUJÁ, SOB O CANAL DO PORTO DE SANTOS. O TÚNEL POSSUI CERCA DE 1.500 M DE EXTENSÃO E SEU TRECHO CENTRAL, PROJETADO COMO TÚNEL IMERSO, POSSUI 870 M, SENDO COMPOSTO POR SEIS ELEMENTOS SUBDIVIDIDOS EM SETE SEGMENTOS. O TRAÇADO DO TÚNEL ATENDE A GABARITO DE NAVEGAÇÃO DEFINIDO PELAS AUTORIDADES PORTUÁRIAS (LARGURA: 220 M; ALTURA: 21 M). A SEÇÃO TRANSVERSAL DO TÚNEL (LARGURA: 37,06 M; ALTURA: 10,7 M) ABRANGE TRÊS CÉLULAS, DUAS PARA TRÁFEGO RODOVIÁRIO (TRÊS FAIXAS CADA), ALÉM DA CENTRAL COM GALERIA SUPERIOR (UTILIDADES) E INFERIOR (PEDESTRES E CICLISTAS). DESTACAM-SE AS SOLUÇÕES INOVADORAS, RESULTANTES DO APERFEIÇOAMENTO DA TECNOLOGIA DE IMERSÃO, A QUAL FOI CRIADA PARA A CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS LOCALIZADOS PRINCIPALMENTE SOBRE TOPO ROCHOSO PROFUNDO EM ESTUÁRIOS E ÁREAS PORTUÁRIAS.

PALAVRAS-CHAVE: TÚNEL IMERSO, DOCA SECA, MODELO BIELA E TIRANTE.

1. INTRODUÇÃO

As cidades de Santos e Guarujá são separadas pelo Canal de Acesso ao Porto de Santos, o qual possui cerca de 500 m de largura e é assentado sobre perfil geológico com topo rochoso profundo. Atualmente, a principal conexão entre as cidades é realizada por balsas, exigindo a implantação de uma alternativa complementar fixa para atender ao aumento do transporte e à expansão portuária. O Túnel Imerso (IMT, *immersed tunnel*, em língua inglesa) [1], é a solução ideal para o local, região portuária urbanizada, reduzindo a distância rodoviária entre estas cidades, que atualmente é de 46 km, para apenas 2 km. A Secretaria dos Transportes

Metropolitanos do Estado de São Paulo coordenou o projeto do túnel, o qual foi desenvolvido entre os anos 2015 e 2018.

O comprimento total do túnel, com cerca de 1.500 m, abrange um trecho central imerso e os acessos. Com extensão de 870 m, o trecho imerso é composto por seis elementos de túnel (TE, *tunnel element*, em inglês), a unidade estrutural da fase de navegação, imersão e montagem, com comprimento de 145 m cada. Cada TE contém sete segmentos de túnel (TS, *tunnel segment* em inglês), a unidade estrutural da fase de operação.

Para a navegação, o traçado do túnel atende ao gabarito definido pela Autoridade Portuária (220 m de largura e 21 m de profundidade).

O túnel comporta seis faixas rodoviárias em dois sentidos, com altura livre de 5,5 m, além de duas galerias superpostas

na célula central, para a passagem de pedestres e ciclistas, e abrigar utilidades na galeria superior (Figura 1).

Em dois lotes de três, os seis TE serão construídos em Doca Seca (DD, *dry dock* em inglês) temporária localizada em trecho de 500 m do Acesso Guarujá. A DD, com cerca de 14 m de profundidade, é conformada lateralmente por paredes diafragma e complementada por parede *combi-wall* removível, voltada ao canal. Para redução dos esforços solicitantes, o topo das paredes diafragma é contraventado (tubo metálico uniformemente espaçado), o solo de fundação é enrijecido (placa de concreto submerso; injeção de argamassa), e o solo lateral é drenado (redução das pressões externas e eventuais infiltrações).

Após construído cada lote de TE e inundada a DD, os TE flutuam e são rebocados, estacionando temporariamente ao

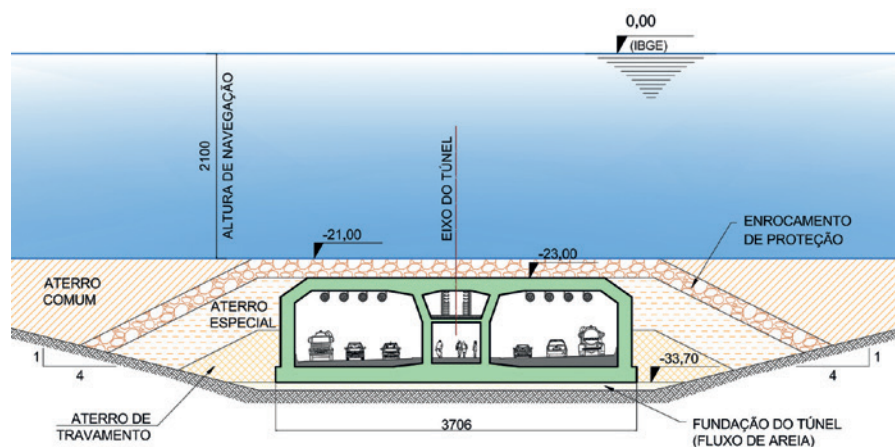


FIGURA 1

SEÇÃO TRANSVERSAL DO IMT ENVOLVIDO POR REATERRO ESPECIAL TÍPICO (MEDIDAS EM CM E NÍVEIS EM M)

FONTE: OS AUTORES

lado da DD. Apenas o sexto TE permanece na DD até a imersão e instalação dos demais, sendo então direcionado para a finalização do trecho imerso. Após o posicionamento final dos seis TE, uma Junta de Fechamento (CLJ) é construída entre TE6 e o Acesso Guarujá.

2. NOMENCLATURA

Apresenta-se o glossário baseado na *International Tunneling Association* [2], padronizando a comunicação internacional sobre o tema:

- ▶ **Túnel imerso:** denominação associada a método construtivo de unidades estruturais temporárias tamponadas (TE) e construídas em DD, que flutuam, navegam e emergem em direção à posição final de operação;
- ▶ **Imersão:** fase de construção do túnel desde a flutuação do TE até a sua

instalação em posição de operação sobre fundação pré-instalada ou suportes temporários;

- ▶ **Doca seca:** local idealmente próximo ao IMT, onde os TE são construídos em ambiente seco, passível de inundação e drenagem controladas, e separado do canal por contenção removível;
- ▶ **Elemento de túnel:** estrutura formada por conjunto de TS, temporariamente consolidado por protensão longitudinal e tamponado nas extremidades, permitindo sua flutuação, navegação e imersão;
- ▶ **Segmento de túnel:** unidade estrutural permanente do IMT, separada das adjacentes por juntas verticais vedadas;
- ▶ **Junta de imersão:** junta estrutural impermeável entre TE adjacentes, dotada de vedação dupla de borracha: tipo Gina (bloco contínuo permanentemente comprimido entre TE adjacentes); e

tipo Ômega (lâmina delgada contínua interna conectada a TE adjacentes);

- ▶ **Junta de fechamento:** trecho de finalização do IMT, sempre dotado de dispositivos para manutenção das vedações Gina comprimidas, neste caso em particular localizada na região de interface do TE6 com o Acesso Guarujá; e
- ▶ **Modelo biela e tirante:** método para dimensionamento estrutural principalmente de regiões rígidas, onde bielas representam resultantes de campos de compressão e tirantes resultantes da armadura adotada [3] [4] [5].

3. SEÇÃO TRANSVERSAL

A geometria da seção transversal do IMT deve atender a aspectos operacionais e de navegação, com distribuição dos esforços internos solicitantes compatíveis com a espessura estrutural correspondente. O perímetro da seção de concreto armado deve:

- a) ter densidade global inferior à da água, permitindo a flutuação e navegação das unidades temporárias (TE), mas abrangendo a máxima quantidade de concreto estrutural possível. Uma razão de 2,60 (pouco superior à relação entre densidade do concreto armado e da água) entre área do perímetro da seção transversal e área da seção de concreto fornece uma definição inicial promissora;
- b) posicionar o centro de gravidade do concreto estrutural abaixo do centro de flutuação, proporcionando equilíbrio e estabilidade ao TE durante flutuação, navegação e imersão; e
- c) distribuir os esforços solicitantes compatibilizados com a correspondente espessura estrutural resistente, otimizando a armadura estrutural adotada.

Em túneis com três células, onde a central é mais estreita que as laterais, a adoção de paredes centrais inclinadas melhora a distribuição dos esforços solicitantes da laje superior, contribuindo positivamente para os três aspectos mencionados (Figura 2).

Com tal redução dos esforços internos, a massa de concreto estabelecida pelo critério de flutuação pode ser redistribuída, com menor espessura média na laje superior, compensada por maior espessura na laje inferior. Este arranjo de espessuras, rebaixando o centro de gravidade da seção, beneficia a estabilidade do TE durante as fases de flutuação, transporte e imersão.

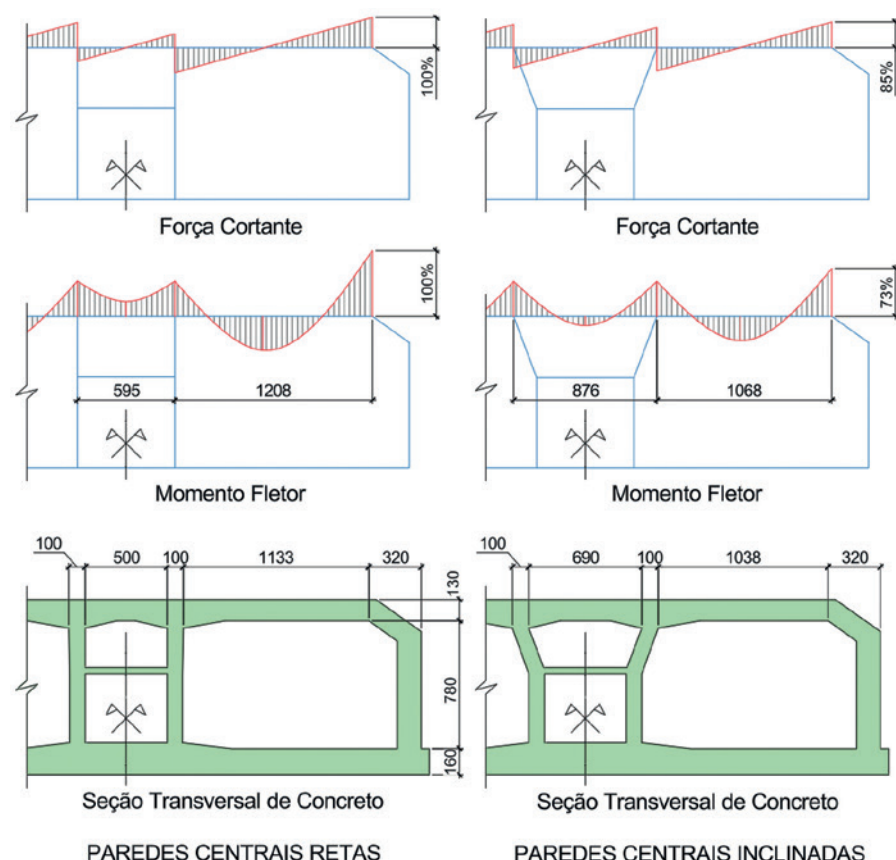


FIGURA 2

COMPARATIVO ENTRE ESFORÇOS INTERNOS ATUANTES EM SEÇÃO TRANSVERSAL DE IMT DOTADO DE PAREDES INTERNAS RETAS E PAREDES INTERNAS INCLINADAS (MEDIDAS EM CM)

FONTE: OS AUTORES

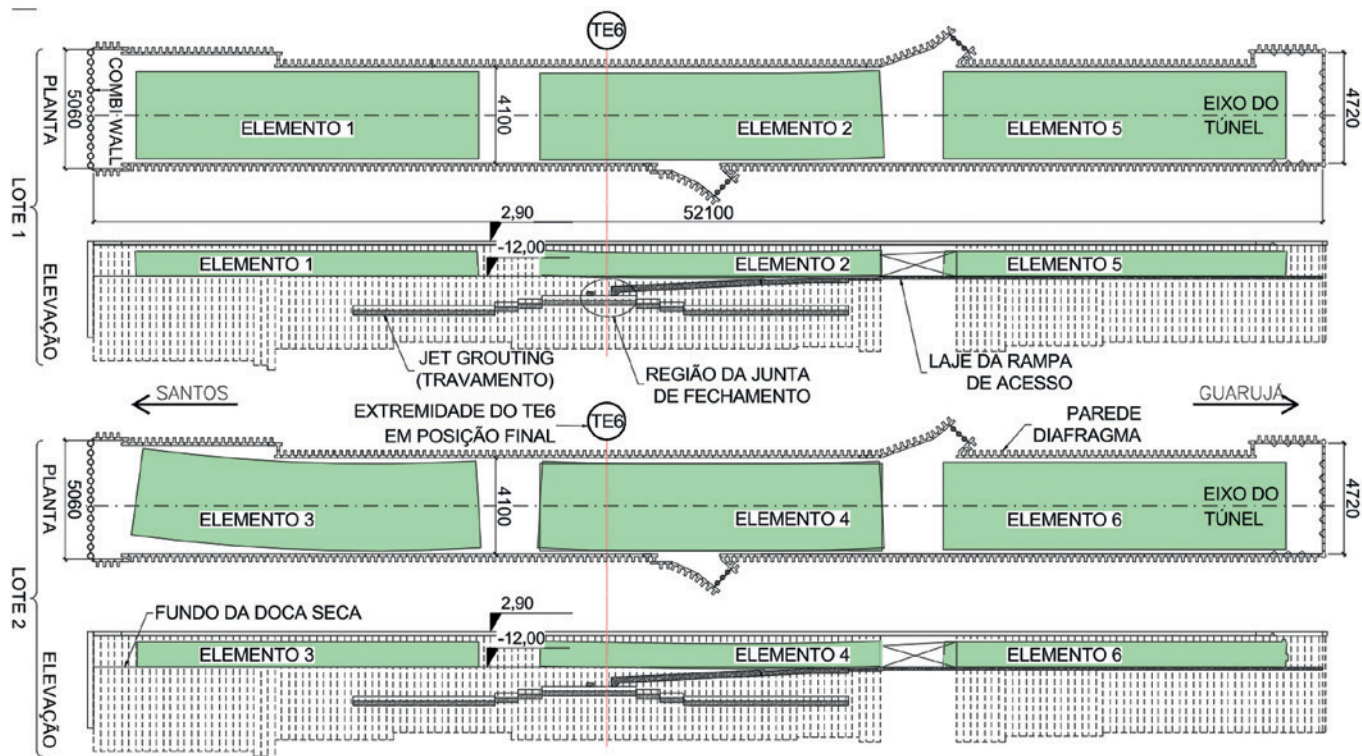


FIGURA 3

PRODUÇÃO EM DUAS ETAPAS DOS SEIS TE NA DD. O EIXO TE6 INDICA A EXTREMIDADE GUARUJÁ DE TE6 (EM POSIÇÃO FINAL) E A LOCALIZAÇÃO DA CLJ (MEDIDAS EM CM E NÍVEL EM M)

FONTE: OS AUTORES

Com o maior equilíbrio do comportamento estrutural obtido com paredes centrais inclinadas, obteve-se uma redução na taxa de armadura esperada, estimada, neste caso, em cerca de 15%.

4. DOCA SECA

Sem local adequado próximo a Santos para a DD, e descartando-se opções distantes por riscos no transporte, optou-se, para tanto, pelo uso de parte do Acesso Guarujá.

Devido às limitações de espaço e possível redução da resistência do solo quando das movimentações da parede *combi-wall*, opta-se pela construção dos TE em dois lotes de três unidades. Com profundidade da DD em cerca de 14 m, comparativamente ao perfil inclinado do Acesso Guarujá, há necessidade de sobre-escavar o trecho voltado ao Guarujá e postergar a escavação do trecho junto ao canal.

Os TE possuem geometrias distintas: TE1, TE5 e TE6 são retos, todo o TE3 abrange quase toda a curva horizontal do IMT, e TE2 e TE4 (simétricos) complementam

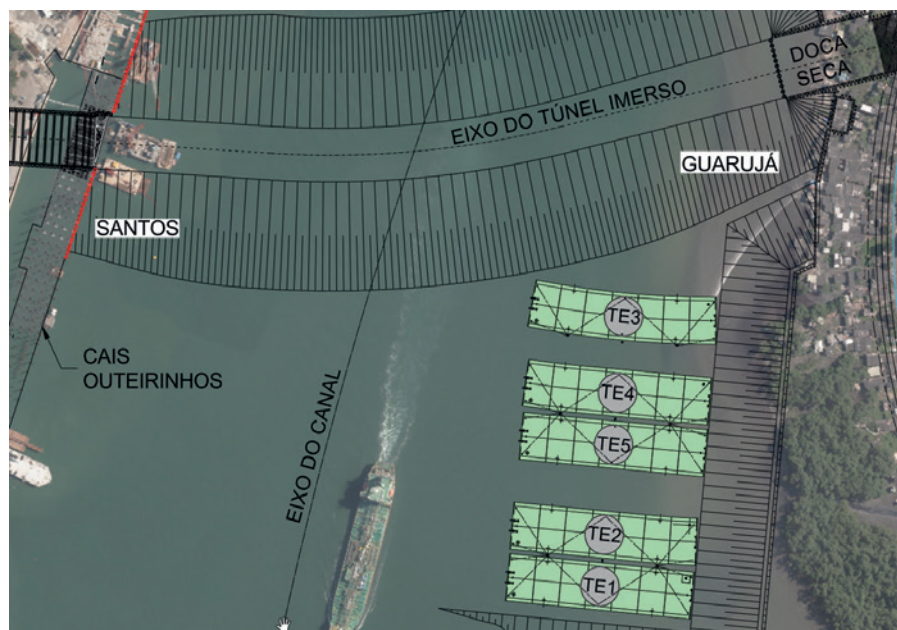


FIGURA 4

ESTACIONAMENTO TEMPORÁRIO DE TE1 A TE5. PLANTA

FONTE: OS AUTORES

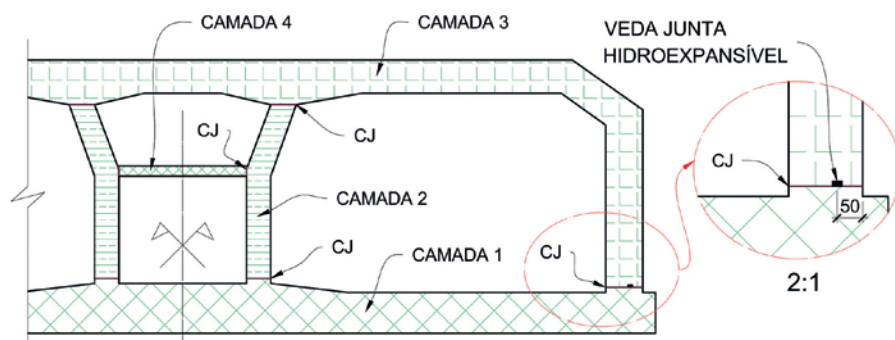


FIGURA 5

SEÇÃO TRANSVERSAL. SEQUÊNCIA E JUNTAS DE CONCRETAGEM (MEDIDAS EM CM)

FONTE: OS AUTORES

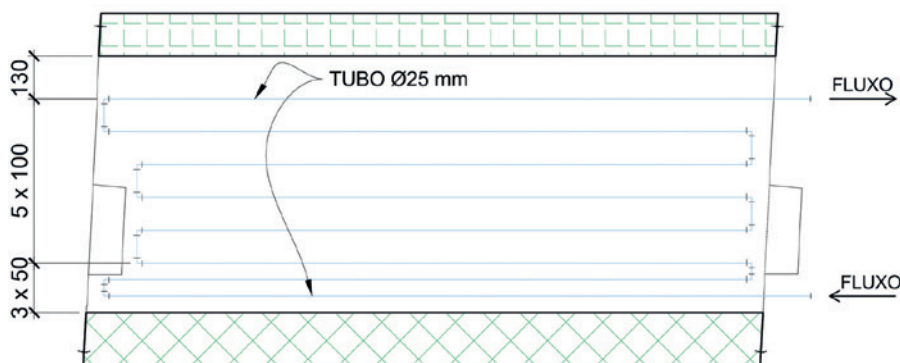


FIGURA 6

SEÇÃO LONGITUDINAL DAS PAREDES EXTERNAS EM ELEVÇÃO.
SISTEMA DE PÓS-REFRIGERAÇÃO PARA UM TS TÍPICO (MEDIDAS EM CM)

FONTE: OS AUTORES

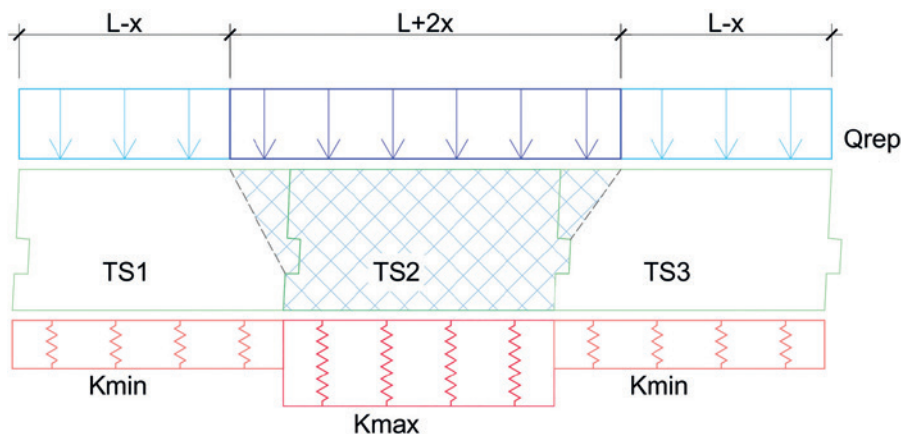


FIGURA 7

EXEMPLO ESQUEMÁTICO NA DIREÇÃO LONGITUDINAL EM ELEVÇÃO. INTERAÇÕES ENTRE TS ADJACENTES DEVIDO À DIFERENÇA DE RIGIDEZ NA FUNDAÇÃO (K_{MAX} ; K_{MIN})

FONTE: OS AUTORES

a curva central horizontal e abrangem as curvas verticais do IMT.

A disposição adequada dos TE na DD (Lote 1: TE1, TE2 e TE5; Lote 2: TE3, TE4 e TE6; Figura 3) otimiza espaço e execução, destacando-se:

- TE3 na saída da DD exige apenas um alargamento localizado para acomodar a curva horizontal;
- TE2 e TE4, simétricos e em lotes distintos, acomodam a curva vertical com reduzido escavamento localizado adicional da DD; e
- TE6, no Lote 2 e no fundo da DD, aguarda no local de construção pela imersão.

Após concluídos, TE1 a TE5 são removidos da DD, estacionando ao lado da DD (Figura 4), enquanto TE6 permanece na DD por não interferir com a imersão dos demais. Após a imersão dos seis TE, a CLJ entre TE6 e o Acesso Guarujá é finalizada com a DD ensecada.

5. CONCRETAGEM DO TE

O TS é a unidade estrutural monolítica dos TE, com comprimento de 20,60 m (cinco TS centrais) ou 20,94 m (TS das extremidades). Sua concretagem ocorre em quatro etapas: laje inferior, paredes internas, paredes externas junto com o teto, e laje interna da célula central. A critério do empreiteiro, as camadas 2 e 4 podem ser unificadas. Apenas duas juntas de concretagem (CJ, *concrete joint* em inglês) ficam no perímetro externo da estrutura, recebendo vedação hidroexpansível para garantia da estanqueidade (Figura 5).

Para controle da retração térmica do concreto, adota-se duplo resfriamento: pré-resfriamento do concreto (substituição parcial da água por gelo) e pós-resfriamento do concreto (nas primeiras horas de hidratação do cimento, circulação de água fria por dutos localizados nas paredes externas (Figura 6).

Como máximas temperaturas de lançamento do concreto (segurança de 20%), o estudo térmico estabeleceu:

- laje inferior, $T_{max} < 20^\circ C$;
- paredes internas, $T_{max} < 30^\circ C$;
- paredes externas, $T_{max} < 25^\circ C$; e
- teto, $T_{max} < 29^\circ C$.

Sem pós-resfriamento, a máxima temperatura de lançamento do concreto nas paredes externas seria de $15^\circ C$, valor pouco provável em Santos.

6. CHAVE DE CISALHAMENTO

A variação geológica da fundação gera interações de cargas entre TS adjacentes, cargas transmitidas por Chaves de Cisalhamento (SK, *shear key* em inglês), livres apenas de deslocamentos longitudinais. Analisam-se as forças resultantes destas interações considerando-se TS, adjacentes sobre fundações com rigidezes alternadas (máxima e mínima, definidas pela análise geotécnica). Estas forças sobrecarregam as seções transversais das extremidades do TS (Figura 7).

Para avaliação da extensão das regiões sobrecarregadas pela SK, utilizam-se dois Modelos Biela e Tirante (STM, *strut-and-tie model* em inglês) planos, representando a extremidade da parede longitudinal do TS (Figura 8).

O STM idealizado auxilia no dimensionamento das armaduras principais, definindo a extensão das seções transversais sobrecarregadas (igual a 5 m, neste caso). A favor da segurança, desconsideram-se na análise as interações das tensões internas com eventuais cargas externas atuantes e reações da fundação.

7. JUNTAS DE IMERSÃO E FECHAMENTO

Os seis TE são sucessivamente instalados a partir do Acesso Santos, quando a região entre TE adjacentes, a Junta de Imersão (IJ, *immersion joint* em inglês), recebe dupla vedação de borracha contínua: a) Gina, alojada junto ao perímetro externo do TE, com extremidade macia para uma vedação inicial sob baixa compressão, posteriormente complementada pela diferença das pressões hidráulicas entre as extremidades seca (lado Santos) e molhada (lado Guarujá) do TE em instalação; e b) Ômega, fixada nas extremidades dos TE adjacentes e internamente à Gina.

Uma Placa de Reação (RP, *reaction plate* em inglês) horizontal localizada junto à extremidade de TE6 (de espera; fixada nas paredes diafragma da DD) é adotada com a finalidade de impedir movimentações longitudinais dos TE instalados e consequente descompressão das vedações Gina. Esta região, de travamento de TE6 e de interação funcional com o Acesso Guarujá, é denominada junta de fechamento (CLJ, *closure joint* em inglês).

O contato de TE6 com a RP é realizado por duas escoras provisórias de concreto

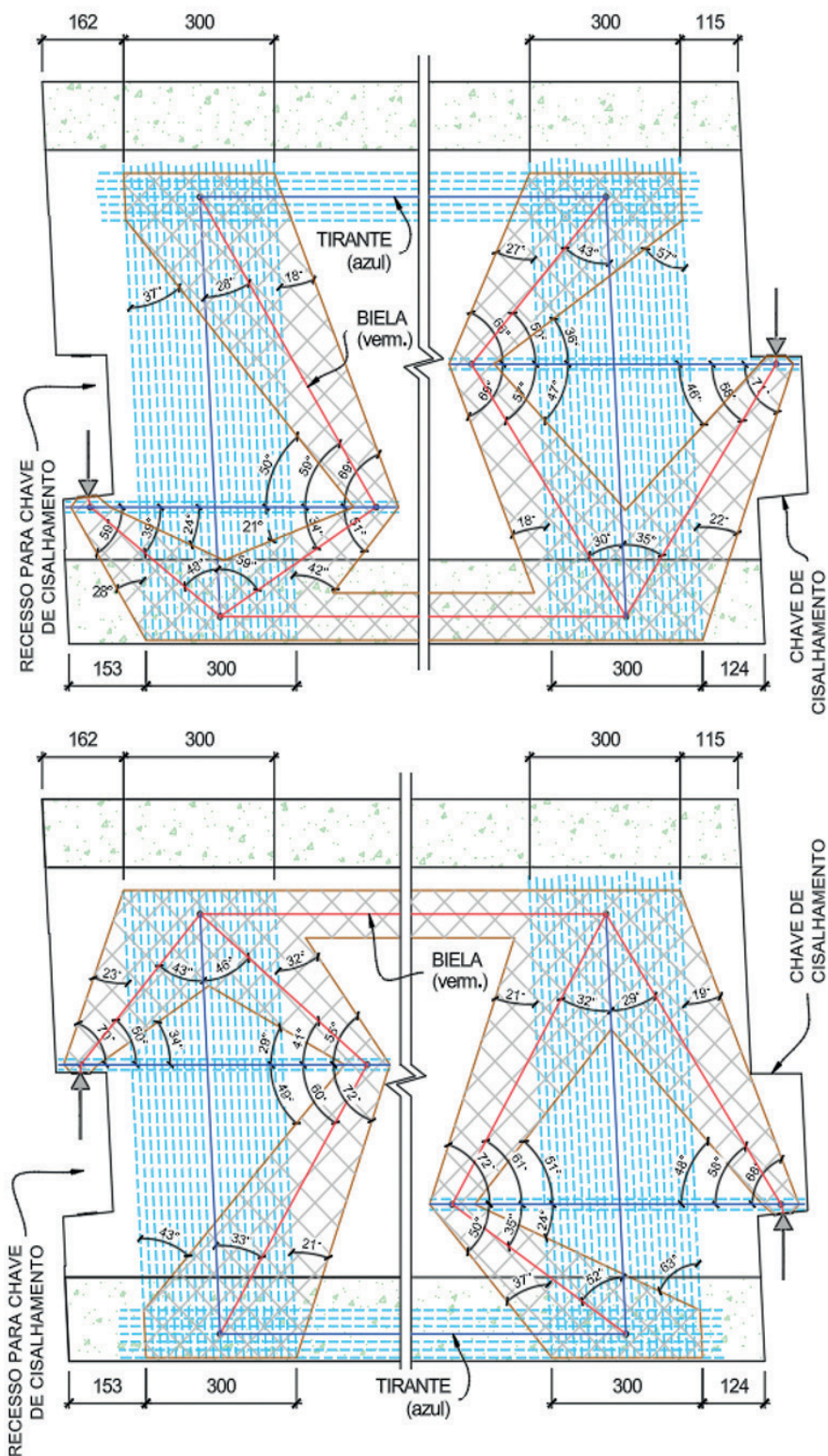


FIGURA 8

STM. EXTREMIDADES DA PAREDE LONGITUDINAL TÍPICA DO TS EM ELEVÇÃO RECEBENDO CARGAS DE TS ADJACENTES (ACIMA) E PARCIALMENTE APOIADA NOS TE ADJACENTES (MEDIDAS EM CM)

FONTE: OS AUTORES

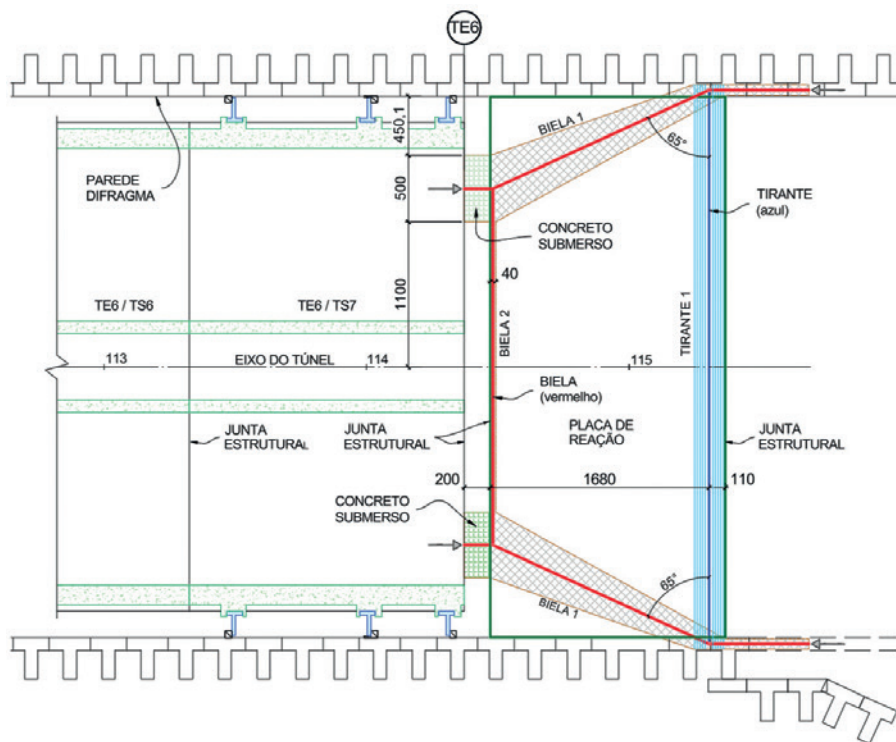


FIGURA 9

STM. CAMPO INICIAL DAS TENSÕES INDUZIDAS PELO TE6 NA PLACA DE REAÇÃO DA REGIÃO DA CLJ. PLANTA (MEDIDAS EM CM)

FONTE: OS AUTORES

submerso (Figura 9), substituídas, após o ensecamento da DD, por escoras definitivas de concreto armado (Figura 10). A carga atuante na RP resulta da decompressão hidráulica quando do ensecamento da DD. Para o ensecamento do Acesso Guarujá, adota-se um barramento hidráulico eficaz em todo o entorno de TE6 (Figuras 11 e 12).

O barramento hidráulico no entorno de TE6 abrange os seguintes itens:

- a) estrutura auxiliar à RP sob TE6, estabelecendo uma transição entre estacas-prancha (controle de percolação no solo) e face inferior do TE6; transição dotada de veda-junta inflável, pré-fixado, moldável por expansão à face inferior do TE6;
- b) geobags preenchidos com argamassa de cimento e bentonita nas laterais de TE6, junto com três placas transversais de concreto pré-moldado, próximas à região a ser drenada (poços de operação automática em cada lado do IMT, em sistema redundante, com fornecimento de energia garantido por gerador); e
- c) ensecadeira de solo lançada sobre o TE6, com material composto no mínimo por 20% de argila, com plasticidade média a baixa, e livre de matéria orgânica.

8. TRATAMENTO DO SOLO DE FUNDAÇÃO

O IMT apoia-se em camada de areia lançada gradualmente sob cada TE (em posição definitiva sobre apoios temporários) por sistema de bombeamento flutuante, preenchendo todo o espaço entre o topo do terreno dragado e a face inferior do TE (cerca de 80 cm).

Um afloramento rochoso próximo à junta entre TE1 e TE2 exige reforço de fundação em regiões adjacentes (colunas de argamassa injetada), minimizando recalques diferenciais. No lado Guarujá, devido às condições do solo, toda a fundação de TE6 e parte da TE5 recebem o mesmo reforço de fundação para reduzir recalques diferenciais.

9. PEDESTRES E CICLISTAS

A célula central do IMT contém duas galerias superpostas: a superior, abrigando serviços e utilidades à operação do túnel, e a inferior, destinada a pedestres e ciclistas, também é utilizada como rota de fuga (Figura 13). Ciclistas e pedestres adentram o túnel através de facilidades instaladas em Prédios de Acesso e Operação, localizados nas extremidades da travessia.

Durante a operação normal do túnel, as portas das rotas de fuga (conexões entre as células laterais através da central, a cada 145 m) permanecem bloqueadas. Em caso

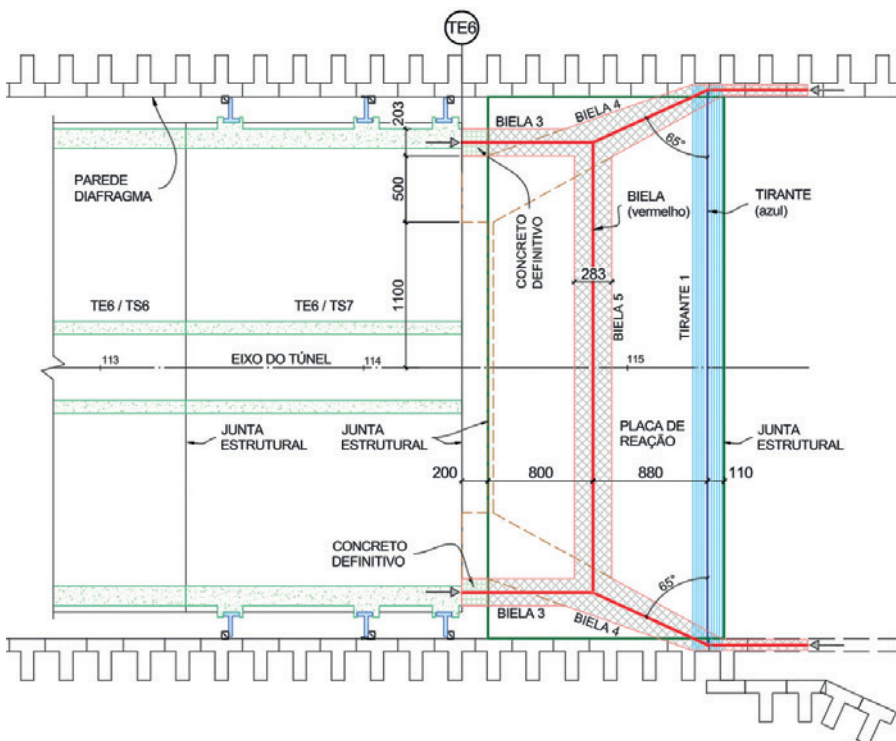


FIGURA 10

CAMPO PERMANENTE DE TENSÕES ATUANDO NA RP (MEDIDAS EM CM). PLANTA.

FONTE: OS AUTORES

de emergência, as portas são destravadas à distância, permitindo o acesso do Corpo de Bombeiros e Equipes de Resgate às três células, inclusive com a passagem de veículos utilitários.

10. TRAÇADO LONGITUDINAL

O gabarito de navegação definido para o canal de navegação (220 m x 21 m) atende a requisitos esperados de futuras embarcações, inclusive as semissubmersíveis. Para a definição do traçado longitudinal do IMT, compatibilizando-o ao gabarito de navegação e aos acessos pré-definidos, uma única curva horizontal é localizada no eixo do canal. Assim, as duas curvas verticais do túnel, alocadas junto aos Acessos, ficam independentes da curva horizontal (Figuras 14 e 15). Este arranjo geométrico, além de favorecer a segurança do tráfego rodoviário, simplifica a construção e a navegação dos TE, e minimiza as dimensões internas (altura e largura) da DD.

Devido à geometria do perfil vertical do túnel, dotada de inclinações favoráveis a ciclistas, e restrições ambientais para extensão da vala de imersão do IMS, projeta-se a construção do Acesso Santos a céu aberto e em vala de construção profunda. A vala é estruturada por paredes diafragma em seção T, contraventamento de fundo com concreto submerso, contraventamento intermediário e de topo com concreto armado, e um sistema externo de bombeamento de água para alívio de pressão durante a construção.

11. DADOS DO PROJETO ESTRUTURAL

Foram considerados os seguintes carregamentos no projeto estrutural:

Permanentes:

- peso próprio;
- peso do lastro de concreto;
- pressão hidrostática.

Variáveis:

- pressão hidrostática;
- pressão de solo;
- carga de tráfego;
- variações de temperatura.

Acidentais:

- explosão interna;
- navio sobre o túnel;
- inundação interna;
- nível extremo de água (com elevação dos oceanos em 50 cm);
- explosão externa;
- queda externa de âncora;
- impacto interno de veículo.

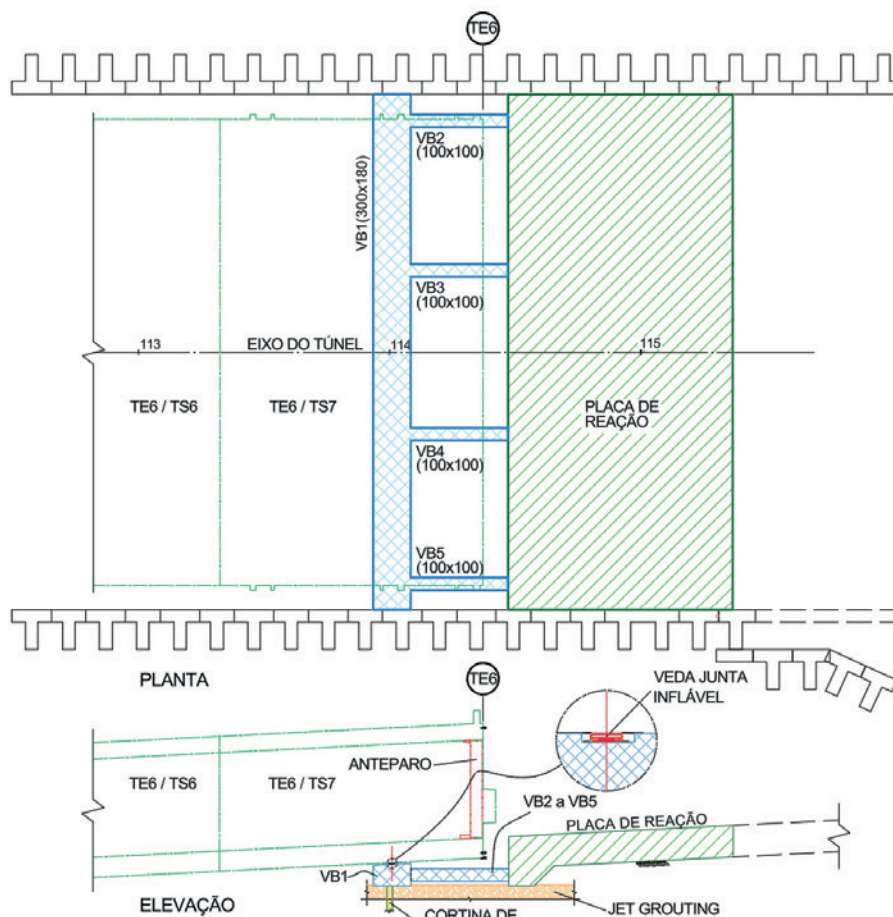


FIGURA 11

ESTRUTURA AUXILIAR SOB A EXTREMIDADE DO TE6, NECESSÁRIA PARA GARANTIR A ESTANQUEIDADE DESTA REGIÃO APÓS A DRENAGEM DO ACESSO GUARUJÁ

FONTE: OS AUTORES

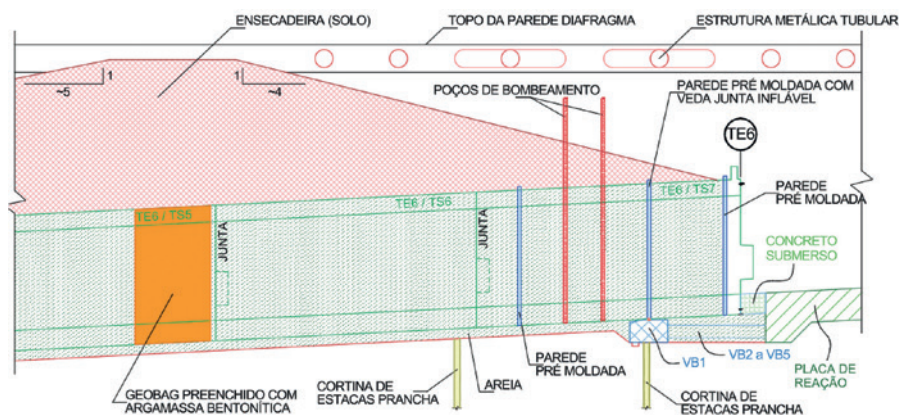


FIGURA 12

DISPOSITIVOS ADOTADOS NO ENTORNO DA EXTREMIDADE DO TE6 (LADO GUARUJÁ) PARA CONTENÇÃO DA ÁGUA DO CANAL, NECESSÁRIOS PARA O ENSECAMENTO DA REGIÃO DA CLJ. ELEVÇÃO

FONTE: OS AUTORES

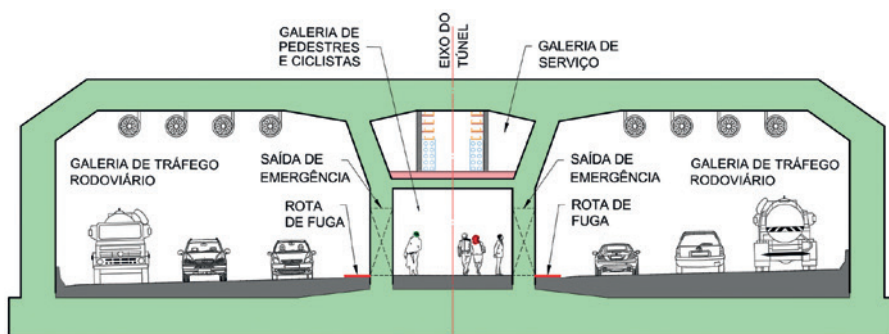


FIGURA 13

FUNCIONALIDADES DISTRIBUÍDAS NA SEÇÃO TRANSVERSAL DO IMT

FONTE: OS AUTORES



FIGURA 14

DISPOSIÇÃO EM PLANTA DO TÚNEL FINALIZADO (IMT EM VERDE; ACESSOS EM MARROM)

FONTE: OS AUTORES

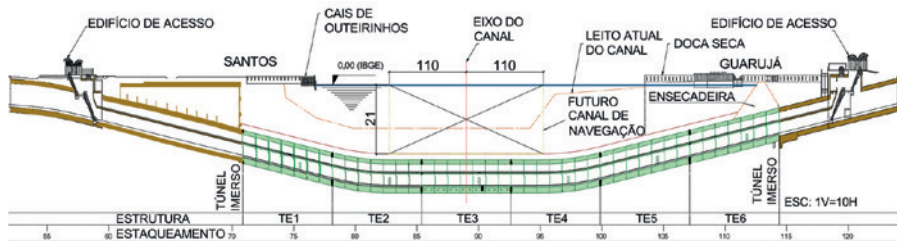


FIGURA 15

PERFIL VERTICAL DO IMT (VERDE) E ACESSOS (MARROM) (VIDE ESCALAS; MEDIDAS EM M)

FONTE: OS AUTORES

Classes de agressividade ambiental [6]:

- a) ambiente externo: Classe IV (muito forte);
- b) ambiente interno: Classe III (forte).

Cobrimento mínimo da armadura:

- a) ambiente externo: 6 cm;
- b) ambiente interno: 6 cm (abrange instalação prévia de placa de proteção passiva contra incêndio), exceto laje interna da célula central, com 4 cm.

Limites para a abertura de fissuras [6]:

- a) ambiente externo: $w_k = 0,20$ mm;
- b) ambiente interno: $w_k = 0,30$ mm.

Resistência característica do concreto estrutural:

- a) concreto armado (IMT; parede diafragma): $f_{ck} = 40$ MPa.
- b) Concreto submerso (CLJ): $f_{ck} = 25$ MPa.

12. CONCLUSÕES

Apresentaram-se aspectos do primeiro projeto executivo de um IMT desenvolvido no Brasil, relatando dificuldades enfrentadas e respectivas soluções adotadas, algumas inovadoras, destacando-se:

- a) procedimentos para a definição da seção transversal do IMT;
- b) otimização do espaço interno da DD localizada no Acesso Guarujá, devido à otimização do traçado geométrico e disposição adequada dos TE;
- c) duplo sistema de resfriamento do concreto para controle da fissuração de origem térmica;
- d) solução para instalação de CLJ no recinto da DD utilizando parte da estrutura da rampa de acesso; e
- e) uso de STM para dimensionamento e detalhamento das armaduras.

AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem à Themag Engenharia e à Royal HaskoningDHV pelo suporte material e pessoal proporcionados ao longo do desenvolvimento do projeto.

Os Autores ressaltam que as informações e opiniões incluídas no artigo são de responsabilidade destes, não refletindo posição do Governo ou de outros entes públicos. ☹

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LUNNIS, R.; BABER, J. Immersed Tunnel, Boca Raton, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013, 506p.
- [2] International Tunnel Association (ITA), Lausanne, Swiss. An Owners Guide to Immersed Tunnels. ITA Working Group 11 for Immersed and Floating Tunnels. ITA Report no 7, 2016, 12p.
- [3] FIP Fédération Internationale de la Précontrainte. fib CEB-FIP. FIP Recommendations. Practical Design of Structural Concrete, 1999.
- [4] FIB Fédération Internationale du Béton. Technical Report. Bulletin 61. Design Examples for Strut-and-Tie Models, 2011.
- [5] Schlaich, J., e Schäfer, K. Konstruieren im Stahlbetonbau. Beton-Kalender, Teil 22, 1993, p.327-486.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. - NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.