



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Elevado em estrutura mista de aço e concreto do trem de levitação magnética MagLev Cobra da UFRJ

Eduardo de M. Batista¹, Augusto Cláudio P. e Silva², Richard Stephan³

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE e Escola Politécnica / batista@coc.ufrj.br

² Tecton Engenharia / augusto@tectonengenharia.com.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE e Escola Politécnica / richard@dee.ufrj.br

Resumo

O projeto de levitação magnética supercondutora da COPPE se inscreve nas iniciativas de pesquisa e inovação da Universidade Federal do Rio de Janeiro e deve ser visto de forma multidisciplinar, considerando a associação de distintas áreas de conhecimento com o objetivo de adequar a tecnologia de levitação magnética para aplicação competitiva no ambiente urbano. O presente artigo apresenta a solução estrutural do elevado em estrutura mista de aço e concreto para percurso do MagLev, solução compatível com a inovação tecnológica em curso, associando os conceitos dos projetos de arquitetura e de estruturas, resultando em uma solução concebida em vigas treliçadas em perfis tubulares de aço e tabuleiro em lajes mistas do tipo *steel deck*.

Palavras-chave

Levitação magnética; MagLev Cobra; tubos de aço; estrutura mista de aço e concreto.

Introdução

A tecnologia de veículo leve sobre trilho com base em levitação magnética está em desenvolvimento no Laboratório de Eletrônica de Potência da COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro (PLANETA COPPE, 2013). A fase atual das pesquisas é de transição de protótipos de laboratório para tecnologia aplicada, sendo esse o estágio de desenvolvimento do veículo MagLev (MAGLEV, 2013), dirigido para aplicações urbanas de transporte coletivo. A partir dos desafios científicos para o desenvolvimento de tecnologia original de levitação magnética supercondutora, o veículo desenvolvido na COPPE está em fase de implantação de seu primeiro protótipo em escala operacional com acesso ao público, no campus da UFRJ, com o objetivo de permitir não apenas testes operacionais, mas igualmente estabelecer um campo de provas para o desenvolvimento de soluções inovadoras de engenharia. Desse modo, o presente artigo se propõe a apresentar a solução do elevado em estrutura mista de aço e concreto, solução julgada compatível com a inovação tecnológica em curso, associando os conceitos originais dos projetos de arquitetura e de estruturas, resultando em um elevado concebido em vigas treliçadas em perfis tubulares e tabuleiro em lajes mistas do tipo *steel deck*.

O projeto de levitação magnética supercondutora da COPPE se inscreve nas iniciativas de pesquisa e inovação da Universidade e deve ser visto de forma multidisciplinar, considerando a associação de distintas áreas de conhecimento com o objetivo de adequar a tecnologia de levitação magnética para aplicação competitiva no ambiente urbano.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



A tecnologia de levitação magnética

As técnicas de levitação magnética, usualmente identificada pelo termo MagLev, são promissoras para aplicações em transporte de massa e podem ser subdivididas em três grupos, descritos a seguir.

Levitação Eletrodinâmica (EDL)

Este tipo de levitação necessita do movimento de um campo magnético nas proximidades de um material condutor. A proposta japonesa de trem de levitação, JR-MagLev (RTRI, 2013), está calcada neste princípio. Existe uma linha dupla para demonstração e testes, de 18,4 km, em Yamanashi, localidade entre Tóquio e Osaka, operando desde 1997. O recorde mundial de 582 km/h foi aí atingido em dezembro de 2003. O Japão planeja prolongá-la para substituir o Shinkansen – Trem de Alta Velocidade roda-trilho, que liga estas duas cidades, mas a tecnologia ainda não foi implantada comercialmente.

Se um material magnético realizar um movimento relativo a uma lâmina condutora (e.g., alumínio), correntes parasitas serão induzidas no condutor. Estas correntes, por sua vez, gerarão outro campo magnético o qual, pela lei de Lenz, opor-se-á à variação do campo criado pelo material magnético. A interação entre estes dois campos gerará uma força repulsiva no material magnético. Esta força aumenta com a velocidade e é a responsável pela levitação. O sistema, se convenientemente ajustado, pode ser estabilizado lateralmente de forma passiva, mas necessita de rodas de apoio nas baixas velocidades.

Levitação Eletromagnética (EML)

Este tipo de levitação tem origem na proposta alemã de trem de levitação (TRANSRAPID, 2013), e está implantada comercialmente, desde 2003, em uma conexão de 30 km, em linha dupla, entre Pudong Shanghai International Airport e Shanghai Lujiazui, a qual constitui a melhor vitrine desse distrito financeiro (SMT, 2013). A Alemanha também possui uma linha singela de demonstração e teste, com 30km de extensão, em Emsland, operando há aproximadamente 20 anos.

O fundamento físico básico, nesta aplicação, explora a força de atração que existe entre um eletro ímã e um material ferromagnético. A estabilização vertical, neste caso, só é possível com um sistema de controle ativo e regulador devidamente sintonizado.

Levitação Supercondutora (SML)

Este tipo de levitação baseia-se na propriedade diamagnética dos supercondutores para exclusão do campo magnético do interior dos supercondutores. No caso dos supercondutores do tipo II, diferentemente do que ocorre com os supercondutores do tipo I, esta exclusão é parcial, o que diminui a força de levitação, mas conduz à estabilidade da levitação em função do chamado efeito de *pinning*. Esta propriedade, que representa o grande diferencial em relação aos métodos EDL e EML, só pôde ser devidamente explorada a partir do final do século XX com o advento de novos materiais magnéticos, como o $Nd_2Fe_{14}B$ (Nd-Fe-B), e de pastilhas supercondutoras de alta temperatura crítica (HTS), como o $YBa_2Cu_3O_x$ (YBCO). O



Brasil, com o projeto MagLev-Cobra, poderá ser o primeiro país do mundo a possuir uma linha de demonstração em escala-real desta tecnologia. A Figura 1 resume de forma gráfica essas informações sobre as tecnologias de levitação.

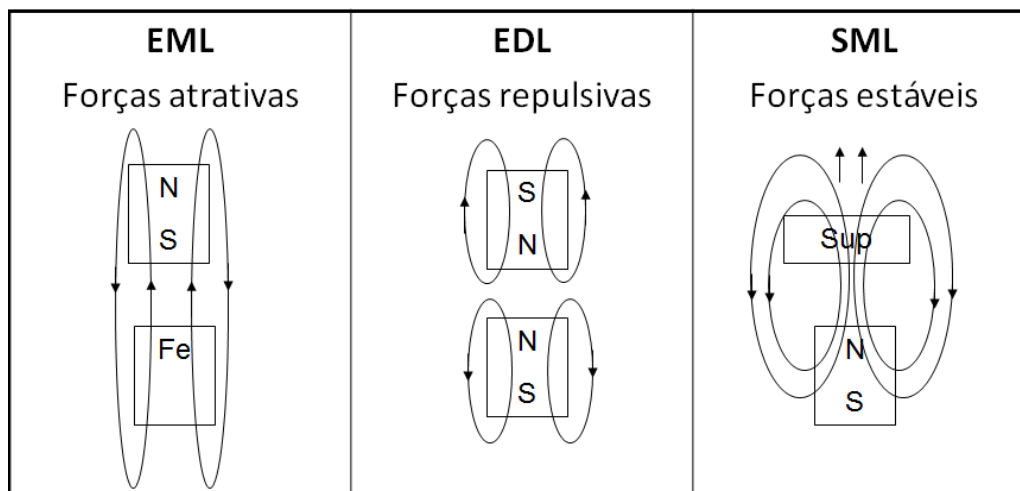


Figura 1 - Métodos de Levitação Magnética.

De um modo simplificado, a Levitação Magnética, independentemente da técnica aplicada, compara-se com a tecnologia tradicional roda-trilho para transporte como indicado na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação MagLev vs. Roda-Trilho.

Característica	MagLev	Roda-Trilho
Custo do material rodante/levitante	☹️	😊
Custo e tempo de execução das obras de construção civil	😊	☹️
Tempo de viagem / paradas	😊	☹️
Custo operacional: manutenção, combustível	😊	☹️
Impacto ambiental: ruído audível, emissão de CO ₂	😊	☹️

Projeto do trem de levitação magnética Maglev

A necessidade de transporte público eficiente, não poluidor, com custos de implantação e manutenção competitivos, faz parte das prioridades do mundo moderno, onde grande parte da população se concentra em metrópoles e o tema da mobilidade urbana já se tornou prioritário.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Cidades que dispõem de uma extensa malha de metrô subterrâneos são consideradas como modelo de solução. No entanto, o custo de implantação destas vias encontra-se entre 100 e 300 milhões de Reais por km (50 a 100 milhões de dólares), dependendo do tipo de solo. A tecnologia MagLev-Cobra propõe um veículo de levitação magnética com articulações múltiplas, que lhe permite efetuar curvas de raios de até 50m, vencer aclives e declives de até 15% e operar em vias elevadas a até 70km/h. Seu custo de implantação é da ordem de 1/3 do necessário para um metrô.

O sistema em desenvolvimento vale-se da propriedade diamagnética dos supercondutores de elevada temperatura crítica (YBCO) e do campo magnético produzido por ímãs de NdFeB para obter a levitação. Estes materiais só foram produzidos a partir do final do século passado e ainda não existe, até a presente data, um veículo do tipo aqui proposto em uso comercial, o que lhe confere originalidade e oportunidade de inovação e crescimento tecnológico.

A tração do veículo é obtida por ação de um motor linear, tecnologia que também abre novas perspectivas para o parque industrial brasileiro.

Por ser movido a energia elétrica, cuja geração no Brasil é predominantemente de origem hidráulica, o sistema MagLev-Cobra funciona sem a emissão de gases poluentes. Adicionalmente, por não depender de atrito mecânico, o sistema MagLev-Cobra, além de menor consumo energético, não produz poluição sonora, podendo se harmonizar com a arquitetura das cidades em vias elevadas, apresentando uma imagem futurista dos locais onde for instalado.

A Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), através da COPPE, vem trabalhando no desenvolvimento desta tecnologia desde o ano 2000. A evolução encontra-se organizada em quatro etapas (STEPHAN, ANDRADE, FERREIRA, 2012), (STEPHAN, 2010):

- A. **Prova de Conceito**, que correspondeu à construção de um Protótipo em Escala Reduzida, finalizado em 2006 com o apoio do CNPq, CAPES e FAPERJ. O total de recursos investidos nesta etapa foi da ordem de 100 mil Reais (50 mil dólares).
- B. **Protótipo Funcional**, desenvolvido entre 2008 e 2012 com recursos da FAPERJ e da FUNDAÇÃO COPPETEC, totalizando cerca de 4,8 milhões de Reais (2,4 milhões de dólares). Este protótipo objetiva demonstrar a viabilidade técnica do veículo em escala real, sua capacidade de suportar cargas, efetuar curvas, vencer declividades, tudo ainda dentro de um ambiente controlado de laboratório e teste.
- C. **Protótipo Operacional**, para o qual foram levantados recursos de 5,8 milhões de Reais (2,9 milhões de dólares) do BNDES/FUNTEC (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico). A esse apoio público somaram-se a participação das seguintes empresas privadas: Vallourec, OAS, White Martins, Akzo Nobel e WEG. Este protótipo deverá operar cotidianamente, em uma linha aberta, com 200 metros de extensão, para qualquer usuário no interior do campus da Cidade Universitária da UFRJ, localizado na Ilha do Fundão, Rio de Janeiro. Em suma, trata-se da comprovação da viabilidade operacional do equipamento. Vale destacar que o apoio da FAPERJ, oferecido para a concretização da etapa anterior, desempenhou papel significativo para a aprovação do projeto BNDES/FUNTEC.
- D. **Industrialização**. Esta etapa necessita dos resultados da etapa anterior para ser devidamente programada e será objeto de trabalhos futuros. Efetivamente, esta etapa trará o esperado desdobramento associado ao crescimento industrial brasileiro.



As etapas acima descritas encontram-se esquematizadas na Figura 2.

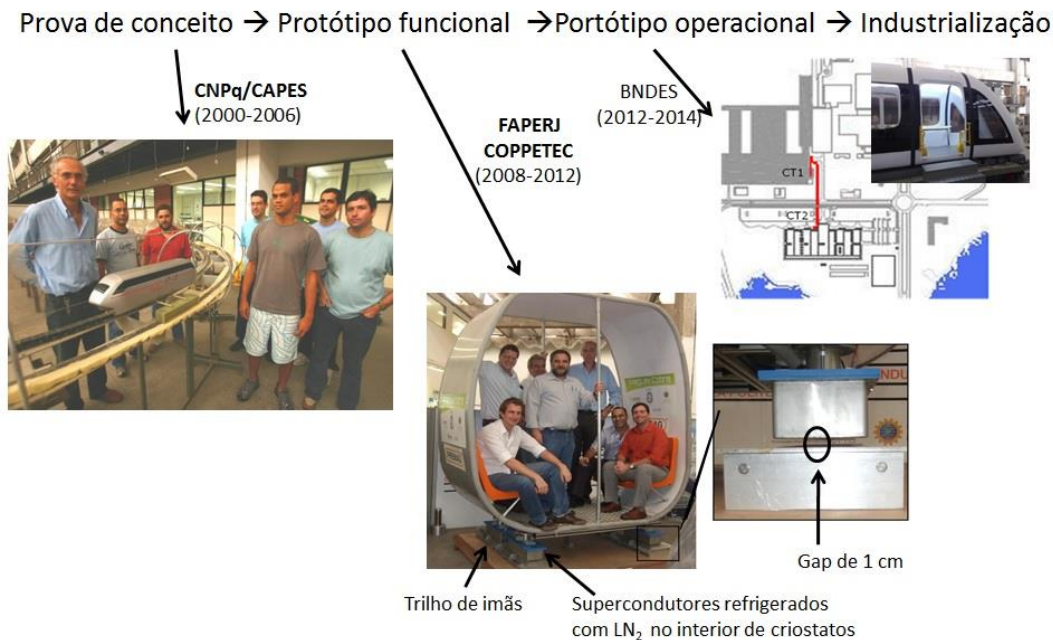


Figura 2 - As fases do projeto MagLev-Cobra.

Projeto da via elevada para testes operacionais no Campus da UFRJ

O protótipo do MagLev-Cobra deverá operar entre os edifícios CT1 e CT2 do Centro de Tecnologia da UFRJ, conforme apresentado na planta de situação na figura 3. Para isso, o projeto de arquitetura contemplou duas estações de embarque/desembarque ligadas pela via elevada conforme ilustrado na figura 4. O desenvolvimento de arquitetura levou em conta o uso de estruturas metálicas em tubos de aço, de modo a conformar uma imagem de leveza associada ao conceito inovador do empreendimento. As estações foram igualmente projetadas em estruturas de tubos de aço conforme se observa na figura 5.

Solução estrutural

A estrutura da via elevada foi projetada considerando os benefícios da tecnologia de estruturas mistas de aço e concreto, de modo a favorecer o seu desempenho. Para isso, o tabuleiro que abriga o veículo é concebido em laje mista do tipo *steel deck*, ligada às transversinas da estrutura metálica por conectores com cabeça (*stud bolts*), aprimorando tanto a resistência quanto a rigidez do conjunto estrutural e beneficiando, desse modo, o desempenho à flambagem das vigas treliçadas invertidas, como se verá mais adiante.

O projeto estrutural considerou a ação de multidão típica para passarelas, $q_s = 5,0 \text{ kN/m}^2$ (ABNT, 1982), sendo esse carregamento superior à ação oriunda do veículo MagLev-Cobra sobre a estrutura. Nesse caso, foi levada em conta a possibilidade do elevador funcionar com passagem de pedestres em alguma ocasião de sua vida útil.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

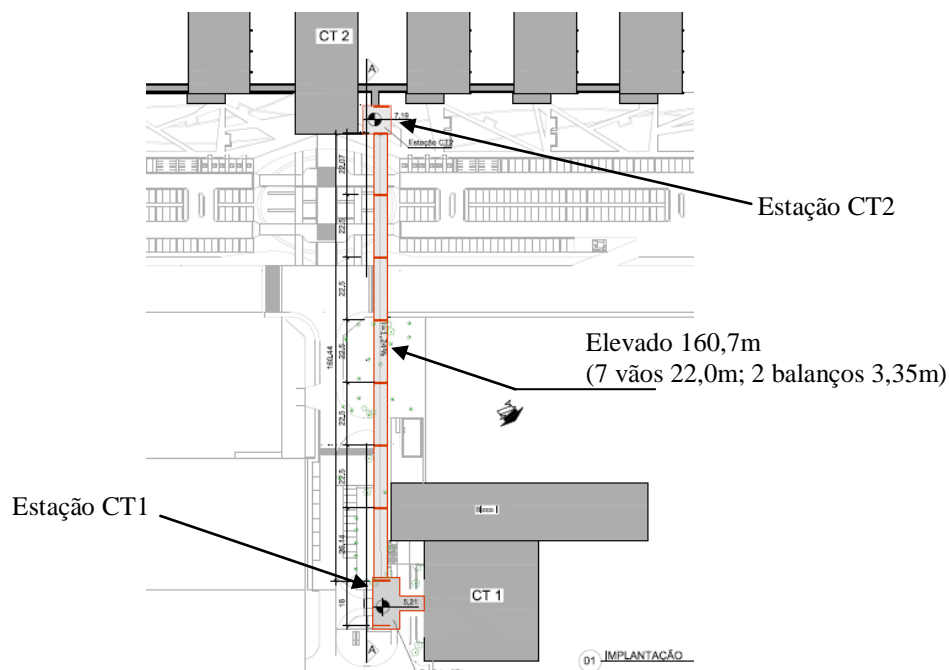


Figura 3 - Planta de situação da implantação da linha do MagLev entre os edifícios CT1 e CT2 na Cidade Universitária da UFRJ.



Figura 4 - Perspectiva do elevador de suporte da linha do MagLev.



Figura 5 - Ilustração da estação de embarque junto ao prédio de CT2.

A obra da via elevada apresenta as seguintes características principais: (i) comprimento total de 160,7m sem juntas, (ii) superestrutura em vigas treliçadas invertidas do tipo Warren, contínuas sobre oito apoios, projetadas em tubos de aço, totalizando sete vãos de 22,0m e dois balanços extremos com 3,35m cada, (iii) tabuleiro em laje mista *steel deck* contínuo, apoiado nas transversinas e conectados a essas com auxílio de pinos sem cabeça tipo *stud bolts*, (iv) ligações entre diagonais e cordas por solda a toda a volta, com afastamento, de modo a simplificar e tornar mais econômico o processo de fabricação, (v) oito pilares formados por tubos de aço de seção circular, preenchidos com concreto C30 sem armadura (com o objetivo de conferir resistência e rigidez suficiente frente às combinações de ações que incluem forças laterais devidas ao vento), (vi) superestrutura apoiada sobre vigas travessas, que se apoiam sobre os pilares por meio de dispositivo em flange, de modo a facilitar a montagem aparafusada no campo. Essas características podem ser observadas nas figuras 6, 7 e 8.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

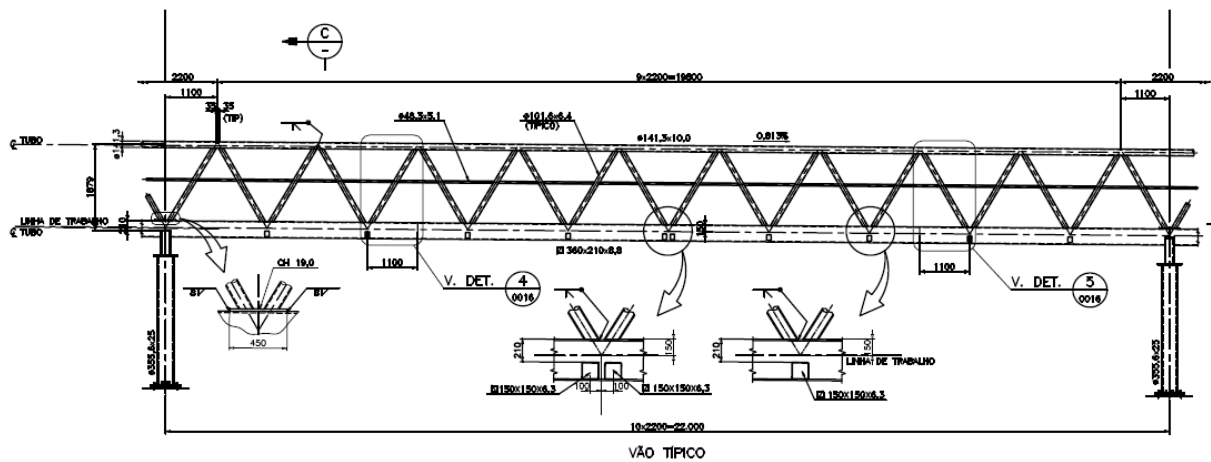


Figura 6 - Vista lateral de vão típico de 22,0m: viga treliçada Warren invertida projetada com tubos de aço sem costura e ligações diagonal-corda soldadas e com afastamento.

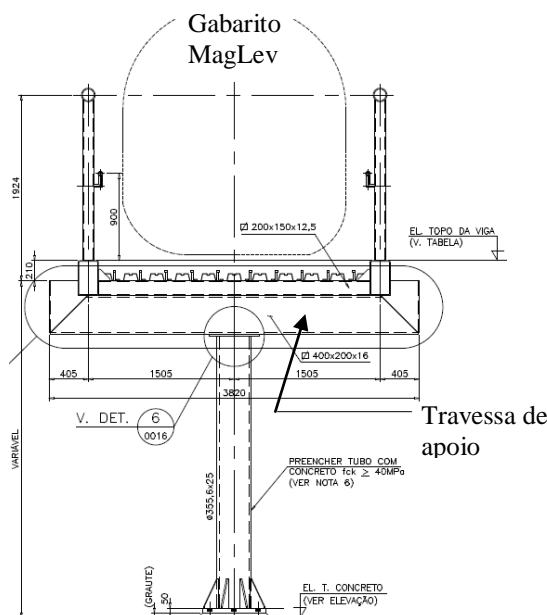


Figura 7 - Seção transversal típica no apoio.

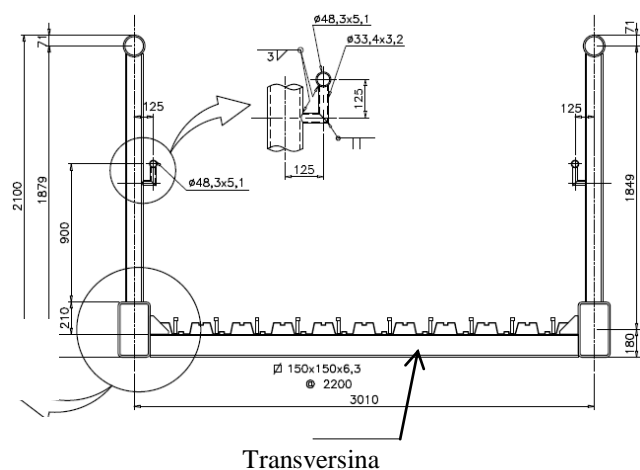


Figura 8 - Seção transversal típica no vão caracteriza viga treliçada invertida do tipo *pony truss*.

A solução em estrutura mista proporciona solução leve se comparada com a opção em concreto pré-moldado (considerada como opção no presente caso), reduzindo dessa forma o custo das fundações e facilitando transporte e montagem. As fundações foram projetadas em estacas de aço devido às condições de geotecnia (solo composto por aterro em camada de até 4m, seguida de areia argilosa até cerca de 9m, seguido de solo siltoso arenoso até cerca de 13m). Adicionalmente, a solução estrutural permite que a fabricação da estrutura metálica e a execução das fundações ocorram de forma concomitante, permitindo economia no prazo de



entrega da obra. A montagem da estrutura metálica do elevando foi realizada sem perturbações no tráfego local de veículos.

A combinação do gabarito do veículo MagLev-Cobra com o partido arquitetônico implicou em um par de treliças tipo Warren invertidas, sem ligação entre suas cordas superiores, conforme se observa nas figuras 7 e 8. Essa configuração é conhecida como *pony truss* (SSRC, 2010) e exige avaliação da estabilidade lateral das cordas superiores nos trechos onde ocorre compressão nessas barras. Resultado da análise da flambagem (*buckling analysis*) com auxílio de programa computacional de análise numérica pelo método dos elementos finitos permitiu a identificação do primeiro modo de flambagem apresentando na figura 9, a partir do carregamento nominal de projeto: ação permanente de peso próprio G_S combinada com a ação variável q_S ($=5,0 \text{ kN/m}^2$), essa última aplicada sobre o tabuleiro da superestrutura (condição crítica identificada para carregamentos alternados a cada vão). Para essa condição, concorre de modo decisivo a rigidez conferida ao sistema pela ligação entre a laje e as transversinas (espaçadas a cada 2,2m conforme na figura 6) com auxílio dos conectores de cisalhamento, permitindo a contribuição dessa laje na rigidez do “pórtico invertido” visualizado na figura 8 e incrementando, desse modo, a resistência à flambagem global das vigas treliçadas. O valor calculado da ação variável associada ao modo crítico de flambagem, $q_{S_{cr}}=12,5 \text{ kN/m}^2$, resultou cerca de 2,5 vezes a ação de serviço ($q_S=5 \text{ kN/m}^2$, ação de multidão).

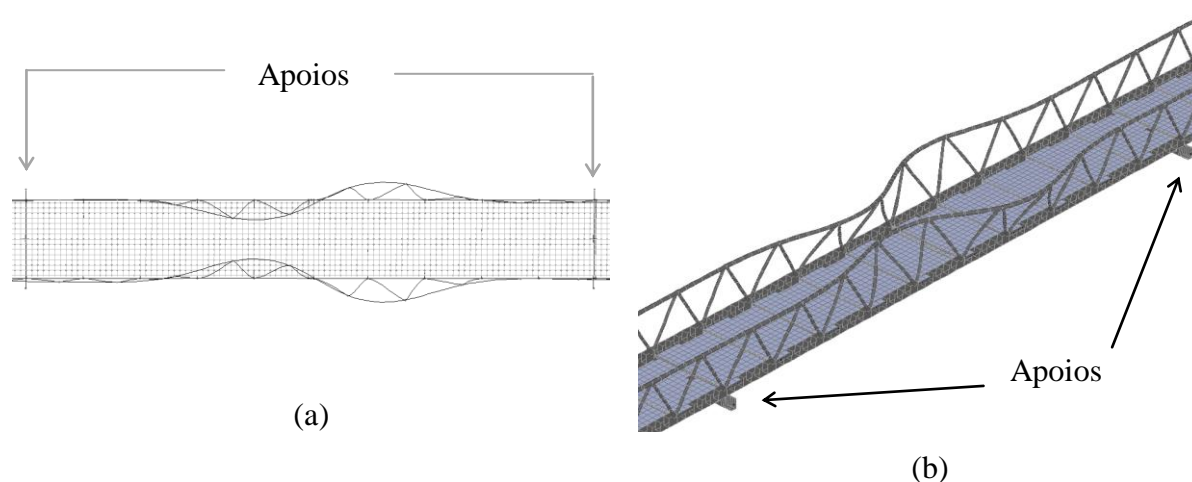


Figura 9 - Modo de flambagem crítico das vigas treliçadas invertidas: flambagem por flexão lateral dos banzos superiores comprimidos. (a) vista superior, (b) perspectiva 3D.

O resultado obtido da análise de flambagem do conjunto estrutural revelou a necessidade de providências especiais durante a fase da montagem da estrutura metálica e concretagem da laje mista. Nessa ocasião, não sendo possível contar com o efeito da estrutura mista na conexão entre a laje e as transversinas, com redução da rigidez do conjunto estrutural, a flambagem lateral no modo ilustrado na figura 9 merece atenção especial.

O dimensionamento da estrutura de aço e mista foi executado com base na norma brasileira NBR8800 (ABNT, 2008) em combinação com a nova norma brasileira para estruturas formadas por tubos de aço, aprovada em agosto de 2013 no âmbito da Associação Brasileira de Normas Técnicas, (ABNT, 2013).



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21,22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Finalmente, foram adotados tubos estruturais de aço sem costura com aço padrão VM300 ($f_y=300\text{MPa}$), fornecidos pela Vallourec (VALLOUREC, 2013). Os tubos de aço empregados na fabricação são, portanto, laminados a quente (seção circular) ou laminados a frio (seções quadradas e retangulares), esses últimos submetidos na origem (na siderúrgica) a procedimento térmico para alívio de tensões residuais. Esses produtos são habilitados a dimensionamento mais favorável na compressão axial, segundo a norma brasileira dedicada ao projeto de estruturas com tubos de aço (ABNT, 2013): curva de flambagem com base na prescrição da norma canadense (CSA, 2009), equivalente à curva europeia a_0 (EUROCODE, 2005).

A estrutura final projetada do elevador apresenta o consumo de materiais indicado na tabela 2. A superestrutura do elevador resultou em consumo de aço de 395 kg/m (ou 127 kg/m^2 exclusivamente de tubos de aço, incluindo a via elevada e as colunas, excluída a forma incorporada do *steel deck*).

Tabela 2 - Resumo de consumo (aproximado) de materiais

Elemento	Produto	Massa (t)	Volume (m^3)
Superestrutura: vigas treliçadas e transversinas	Tubos de aço	56,2	
Colunas	Tubos de aço	7,3	
	Concreto		3,3
Laje	Steel deck	5,0	
	Concreto		72,0
Blocos de fundação	Concreto		32,0
	Armadura de aço	4,1	
Estacas de fundação	Perfis W	17,9	

Considerações finais

O elevador projetado para suportar o protótipo operacional do veículo de levitação magnética MagLev-Cobra, em implantação na Cidade Universitária da UFRJ, foi concebido a partir de um partido arquitetônico que preconizou uma construção leve, procurando associar uma imagem de tecnologia de construção civil compatível com o empreendimento, fortemente caracterizado como de inovação em ciência e tecnologia. O projeto estrutural resultou em aplicação de estruturas mista de aço e concreto, voltada para uma solução que permita a fabricação, transporte e montagem com intervenção mínima na área de implantação, minorando as interferências nas atividades desenvolvidas nas edificações vizinhas.

O uso de tubos de aço em todos os elementos estruturais, tanto do elevador quanto das estações de embarque, permitiu a definição de um padrão estético no conjunto das edificações, além de beneficiar a padronização dos projetos de fabricação. O emprego de tubos de aço sem costura garante à estrutura qualidade dimensional, além de economia na proteção contra a corrosão, com impacto favorável na durabilidade e nos custos de manutenção. Esses resultados de durabilidade dependem, ainda, da qualidade da fabricação e da proteção dos elementos estruturais executada em fábrica.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Agradecimentos

Os autores agradecem à arquiteta Fernanda Metello, autora do projeto de arquitetura, à Vallourec, que forneceu a totalidade dos tubos de aço para a fabricação das estruturas metálicas, à empresa OAS e Invepar, encarregadas das obras de construção civil, ao BNDES, à FAPERJ e à Fundação COPPETEC como financiadores do empreendimento, e à COPPE-UFRJ, em cujo ambiente acadêmico voltado para a inovação em ciências da engenharia está sendo desenvolvido o projeto de levitação magnética.

Referências

- ABNT. NBR16239 Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- ABNT. NBR7188 Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1982.
- ABNT. NBR8800 Projeto de estrutura de aço e mista de aço e concreto de edifícios, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- CSA. CSA-S16-09 Design of steel structures, Canadian Standards Association, Toronto, Canada, 2009.
- EUROCODE. EN 1993-1-1 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
- MAGLEV. <http://www.maglevcobra.com.br/> (acesso em agosto de 2013).
- PLANETA COPPE. <http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=1061> (acesso em agosto de 2013).
- RTRI. Railway Technical Research Institute, <http://www.rtri.or.jp> (acesso em agosto de 2013).
- SMT. Shanghai Maglev Train, <http://www.smtc.com> (acesso em agosto de 2013).
- SSRC. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Structural Stability Research Council, Ed. Ronald D. Ziemian, 2010.
- STEPHAN, R. M. Levitação Magnética: Um assunto estratégico para o desenvolvimento do Brasil, Revista do CREA RJ, Rio de Janeiro, p. 12 - 15, 30 out. 2010.
- STEPHAN, R.M.; de ANDRADE, R., Jr.; FERREIRA, A.C. Superconducting Light Rail Vehicle: A Transportation Solution for Highly Populated Cities, IEEE Vehicular Technology Magazine, v. 7, Issue: 4, p. 122 – 127, 2012.
- TRANSRAPID. <http://www.transrapid.de> (acesso em agosto de 2013).
- VALLOUREC. <http://www.vmtubes.com.br> (acesso em agosto de 2013).