

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

TRAVESSIA DO RIO AMAZONAS, PROJETO ESTRUTURAL E OS DESAFIOS CONSTRUTIVOS

**RAPHAELLA OLIVEIRA DE ARAUJO- ELECENOR DO BRASIL; JULIANA NOBRE DE MELLO MOTTA(1)
MARTE ENGENHARIA LTDA
(1)**

RESUMO

Este IT descreve os principais aspectos desafiadores que estão sendo superados tanto no projeto como na construção das Linhas de Transmissão do Sistema, com enfoque na travessia do rio Amazonas, bem como na floresta amazônica e de suas áreas alagáveis, tendo em vista a importância desta interligação das principais cidades do norte do país. Serão apresentadas as análises do projeto das torres de travessia, incluindo o cálculo de cargas, a seleção da estrutura e o projeto de componentes estruturais e conexões. Em projetos típicos, torres estruturadas em perfis cantoneiras representam a solução mais adequada.

PALAVRAS-CHAVE

1.0 INTRODUÇÃO

A seguir é mostrado o esquema da travessia objeto desse artigo LT 230 kV (CD) ORIXIMINÁ - JURUTI – PARINTINS:

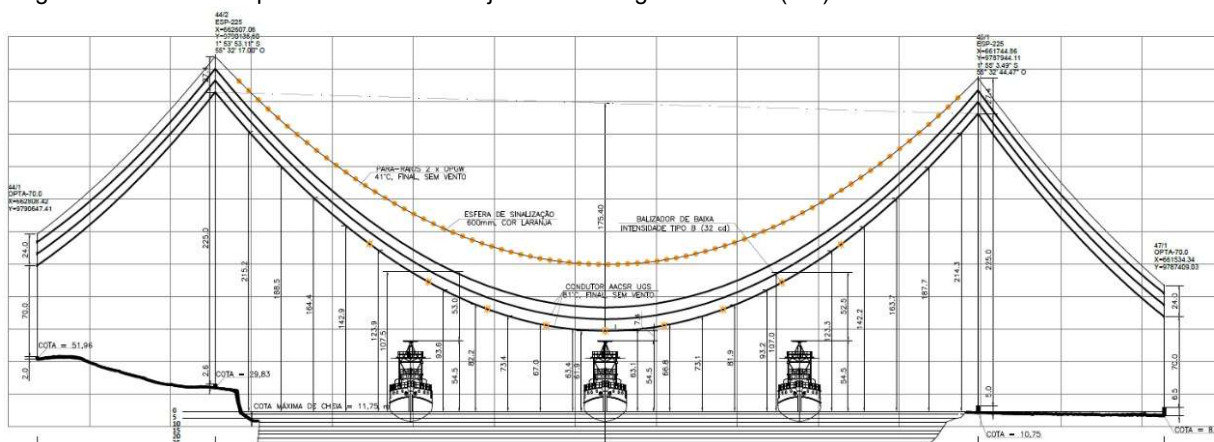


FIGURA 1: Esquema da Travessia

- Torres de Suspensão: Para cruzar a extensão do rio de 2.355 m, o tipo torre de suspensão (OPTS) foi escolhido para minimizar a sua carga, como a altura necessária de 252 m (altura da fase inferior 225m). As torres são feitas de aço perfil tubular, cujo membro principal tem as dimensões 1056x22 mm (diâmetro x espessura). O peso total da torre é de aproximadamente 1500 tf e sua base 46 m x 46 m. Como a extensão do rio supera o vão da travessia, uma torre foi instalada em uma zona temporariamente alagável e outra na margem seca do rio.

Torres de Ancoragens: Para ancorar os condutores especiais, duas torres com um circuito de configuração vertical de fases, chamadas OPTA, foram instaladas, antes e após as torres de suspensão de acordo com o esquema mostrado na Figura 1. Estas torres têm 94 m de altura e suportam a diferença longitudinal entre o condutor da travessia especial e o condutor padrão da LT.

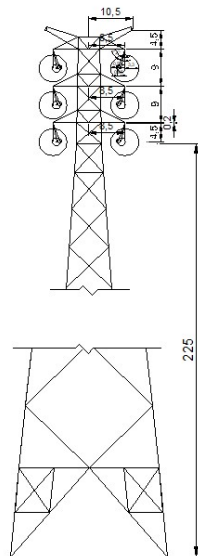


FIGURA 2: Torre de Suspensão

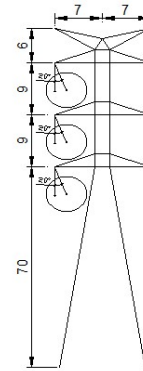


FIGURA 3: Torre de Ancoragem



FIGURA 4: Travessia

Exemplo das maiores estruturas de travessias mundiais:

Nome do projeto	Tensão	Altura total	Tipo de estrutura	Ano
Zhoushan LSTL	220/500kV	370.0m	Tubular com elementos mistos (concreto/aço)	2010
Jiangyin LSTL	500kV	346.5m	Perfis com seção soldada	2004
Tucuruí-Jurupari – Oriximiná – Macapá	500kV	296m	Tubular	2011
Nanjing Shanjiangkou LSTL	500kV	294.5m	Tubular	2007
Nanjing Dashengguan LSTL	500kV	257.0m	Tubular com elementos mistos (concreto/aço)	2000
Nanjing Shangjiankou LSTL	500kV	249.5m	Tubular	2005
Wuhu LSTL	500kV	229.0m	Tubular	2002
Nanjing Yanziji LSTL	220kV	195.5m	Tubular	1976

1.0 - Normas adotadas e correção dos fatores de segurança

É necessário utilizar normas que se complementem, uma vez que nenhuma delas contempla o caso em estudo. Um exemplo disso é a utilização da norma EN 1991 que complementa a norma EN 50341 para estruturas do porte analisado.

Com a análise da EN 1991, uma resposta e um fator de ressonância devem ser calculados em função da frequência natural da estrutura já arbitrada. Nesse cálculo, chegamos ao coeficiente de amplificação dinâmica a ser atribuído à porção variável da equação (rajada).

A maioria dos projetos de torres de aço no Brasil considera o vento como uma carga estática equivalente. Não levando em consideração seu caráter dinâmico e o estudo dos deslocamentos excessivos que podem ocorrer devido ao fenômeno da ressonância, quando a frequência natural da estrutura se aproxima da frequência da carga aplicada. Com a necessidade de enrijecer a estrutura para atingir uma frequência fundamental adequada, a carga aplicada não governará o dimensionamento.

Se o modelo não atingir a frequência natural arbitrada, deve ser feita uma análise dinâmica.

Para travessias utilizaremos o cálculo em cima de uma frequência natural maior ou igual a 0,5 Hz.

2.0 - ALTURA DE NAVEGAÇÃO

Por ser um rio de planície, é navegável em toda sua extensão. Os portos mais importantes do rio Amazonas ficam nas cidades de Iquitos, no Peru, Letícia na Colômbia e Manaus no Brasil.

O Rio Amazonas possibilita a navegação de grandes embarcações até as proximidades de Manaus, no local onde o Rio Negro se encontra com o Solimões. Além disso, nos afluentes do rio também a navegação é uma atividade comum, sendo o principal meio de locomoção da região.

Entre suas características está o fato de ser navegável em praticamente todos os seus afluentes, devido a boa profundidade da calha dos rios e a inexistência de corredeiras na planície amazônica. Na hidrovia são realizados os deslocamentos de passageiros, transporte de pequenas cargas e praticamente todo o transporte cargas direcionados aos grandes centros regionais – Belém (PA) e Manaus (AM).

Para Definição do Maior mastro que trafega na região do Rio Amazonas nos pontos GPS - (3° 7' 11,78" S – 51° 42' 16,79" O) para pontos de GPS - (3° 7' 31,90" S – 51° 42' 18,90" O) nas proximidades do Município de Óbidos PA, foram utilizadas como fonte de informação os moradores ribeirinhos, que moram nas proximidades de onde será feito a Travessia com Linha de Transmissão, consulta a Capitania dos Portos de Santarém e as principais empresas que operam na região, para identificação da embarcação de maior porte, sendo identificada o Navio de Carga JURUTI pertencente a NORSULMAX, que tem AB 75.200 ton. e mastro com 44,5 metros.

A região também é rota de Transatlânticos, que durante a temporada anual, fazem cruzeiros até a cidade de Manaus-AM, onde o maior a operar na região foi o M/S QUEEN VICTORIA operado pela CUNARD LINE, que tem AB 90.000 Ton e mastro de 54,5 metros.



FIGURA 5: Navio Mercante JURUTI



FIGURA 6: M/S Queen Vicotoria

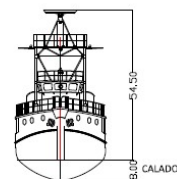
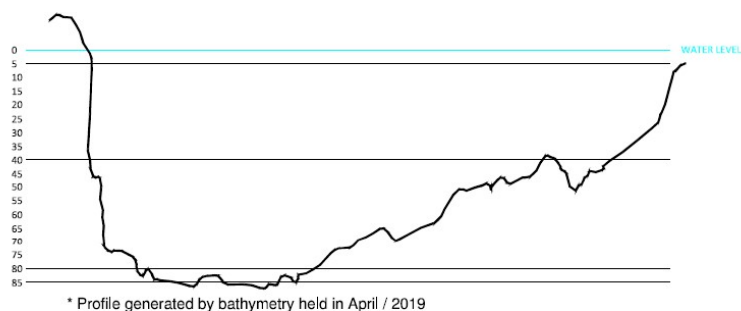


Figura 7: perfil do terreno

3.0 - Cálculo das pressões de vento

Para as pressões de vento foi adotado o período de retorno de 500 anos que é empregado em grandes travessias e a categoria de rugosidade I, devido a grande faixa sem obstáculos (representada pela própria largura do rio).

A mudança do tipo de terreno de II - onde as medições são feitas - para I, terreno adotado para os cálculos - implica uma correção de 1,17 pu nas velocidades dos ventos indicadas nos mapas, guardados os diferentes períodos de retorno e tempos de integração dos valores médios (10 minutos, 3 e 30 segundos). A correção mencionada é a que consta da EN 50341.

Admitindo a norma EN 50341 como a que representa melhor acurácia no cálculo de grandes estruturas, tem-se o gráfico abaixo de pressões por altura:

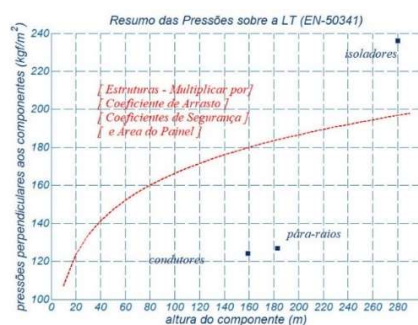


FIGURA 8: Vento extremo

4.0 - APLICAÇÕES e dados dos cabos

Aplicação travessia (m):

Vão de vento - suspensão	1500
Vão de peso - suspensão	3100
Vão de vento - ancoragem	500
Vão de peso - ancoragem	-1100

Foi utilizado o cabo condutor AACSR/UGS 540 e para-raios OPGW SM Loose, conforme indicado abaixo:

N cabos por fase	1
Peso linear para-raios kgf/m	2.298
Peso linear condutor kgf/m	3.381
Diâmetro para-raios (m)	0.0243
Diâmetro condutor (m)	0.03632

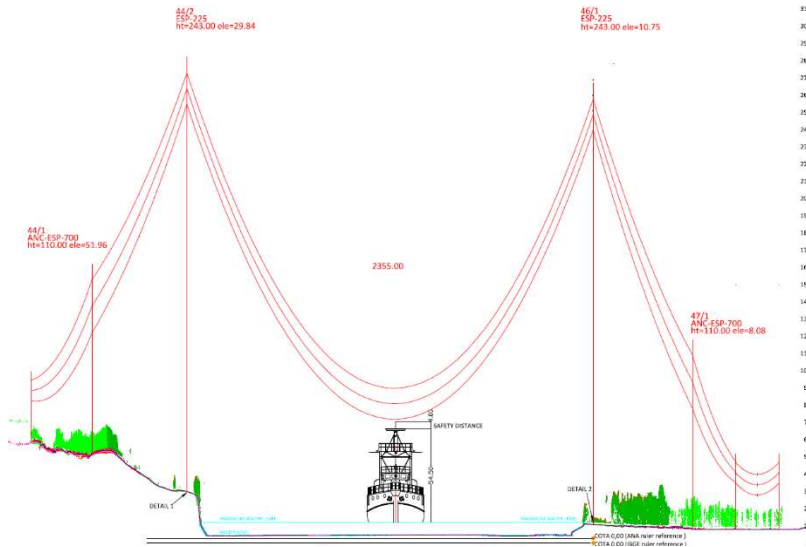
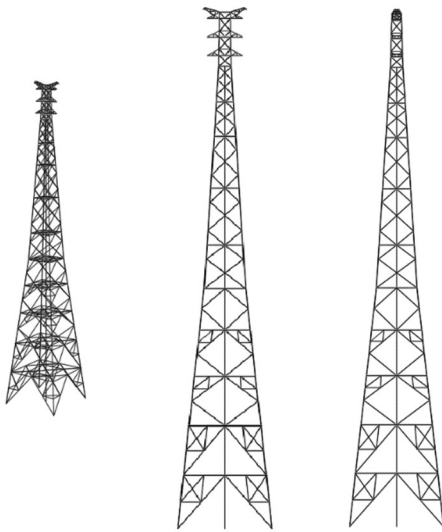


Figura 9 : Planta e perfil

5.0 - Dimensionamento estrutural

Foi feita a análise não linear da estrutura utilizando dois programas TTA e SAP 2000 foi adotada na análise estrutural global, que é compatível com as estruturas de treliça de grandes alturas submetidas a grandes cargas. Durante a análise, as cargas que atuam sobre cada membro da torre e os deslocamentos correspondentes no topo da torre foram investigados e comparados. O limite de resistência de cada membro da torre foi calculado de acordo com as recomendações da norma ASCE 10.



Poucas torres de transmissão são feitas de perfis tubulares, embora torres estruturadas de cantoneiras sejam comumente usadas. O comportamento estrutural da torre OPTS foi discutido e o motivo da escolha das propriedades desses componentes estará presente neste estudo.

A capacidade de carga geral da estrutura usando perfis tubulares requer menos travamentos intermediários porque as propriedades geométricas dos componentes tubulares têm a maior resistência à flambagem, portanto, tem um comprimento de flambagem mais longo. Alguns travamentos secundários são descartados nesta situação. O resultado é a obtenção de uma torre mais leve.

Coefficientes de arrasto menores são uma vantagem do uso de perfis tubulares, resultando em menor carga de vento aplicada na torre, sujeitando-a a forças e deslocamentos a menores.

Os perfis foram calculados com material Q345B (equivalente ASTM A572 GR50). Para as placas de ligação Q235B (equivalente A36).

O dimensionamento da estrutura à flambagem local e às forças globais de estabilidade foi executado de acordo com as normas ASCE 48 e AISC 360, listadas com as seguintes equações:

$$\text{ASCE 48-11:} \quad \left[\left(\frac{P}{A} + \frac{M_x c_y}{I_x} + \frac{M_y c_x}{I_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{VQ}{It} + \frac{Tc}{J} \right)^2 \right]^{1/2} \leq F_t \quad (3.1)$$

$$\text{AISC 360-05:} \quad \text{Quando } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \quad \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (3.2)$$

$$\text{Quando } \frac{P_r}{P_c} < 0.2 \quad \frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (3.3)$$

Onde: P=força normal; A=seção transversal; V=cortante; Mx=momento fletor no eixo x; My= momento fletor no eixo y; Ix=Inércia no eixo x; Iy= Inércia no eixo y; t=espessura; T=momento torçor. Pr = compressão solicitante; Pc=compressão admitida; Mr=flexão solicitante, Mc=flexão admitida.

Para exemplificar o cálculo da estrutura, é demonstrado o montante mais solicitado da estrutura $\phi 1056\text{mm} \times 22\text{H}$ (HTS).

Montante mais solicitado

Compressão máxima	14976 kN
Compressão admissível	18720 kN
Utilização	80% - Ok

Ligação mais solicitada da estrutura:

Esforços na ligação

T (Tração)	7487 kN
N (Compressão)	14976 kN

O tipo de conexão usado nos montantes é o flange, para garantir uma conexão concêntrica e evitar perda significativa da seção líquida da ligação.

Parâmetros da chapa de ligação e parafusos

Flange and Bolt Parameters	
D1 (diâmetro externo)	1326 mm
D2 (diâmetro interno)	1056 mm
Espessura do perfil	22 mm
D0 (diâmetro da linha de parafuso)	1186 mm
Diâmetro do parafuso	39 mm
n (numero de parafusos)	28
t (espessura da chapa)	32 mm

Outra razão para adotar a geometria tubular é ter conexões concêntricas; torres com conexões excêntricas são mais flexíveis e podem gerar mais efeitos de segunda ordem. Conexões excêntricas amplificam os efeitos dinâmicos. Na torre estudada, os efeitos dinâmicos não podem ser desprezados, devido à sua considerável altura e carregamento de vento.

Quatro tipos de ligações foram adotadas para a estrutura:

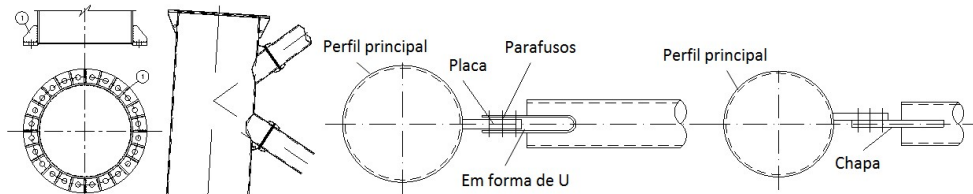


Figura 10: Ligações

Com base na análise da estrutura, os 6 primeiros modos de vibração do modelo em elementos finitos podem ser visualizados a seguir:

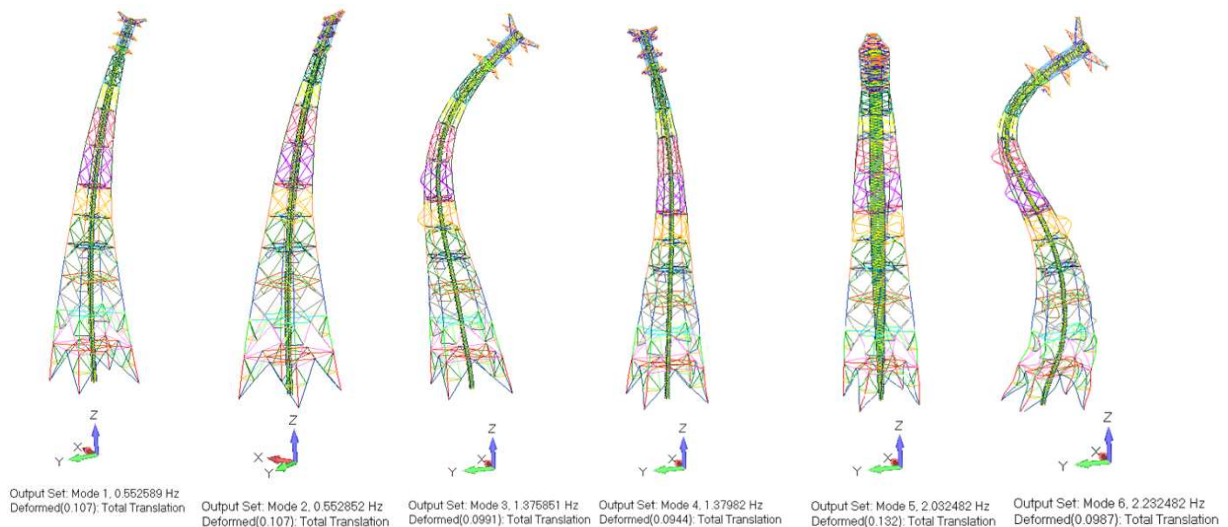


Figura11: Modais de vibração

6.0 - FUNDAÇÃO

A primeira etapa predecessora ao desenvolvimento do projeto das fundação foi a investigação geotécnica no local. A investigação geotécnica teve início dois anos antes da execução da obra, onde com isso teve-se tempo de desenvolver uma boa gama de estudos. Nesta investigação geotécnica foram desenvolvidas sondagens tipo SPT onde para cada área de torre da travessia foram executadas cerca de 10 pontos de sondagens, para a torre “alagável” as profundidades foram executadas em torno de 55 metros de profundidade e para a região seca, as sondagens tiveram profundidade variando até 20 metros de profundidade. De todos os pontos, metro a metro foram recolhidos amostras e analisadas rigorosamente pela equipe técnica onde estão armazenadas em potes hermeticamente fechados e ficarão até a energização do empreendimento. Além das sondagens, foram desenvolvidos provas de cargas estáticas e dinâmicas em 5 estações de testes, com a finalidade de avaliar a capacidade de carga real das fundações de forma a verificar o atendimento das premissas de projeto garantindo o desempenho adequado da estrutura.

Para a torre da área alagável, além da fundação especial, foi previsto um aterro sob solo mole, com isso, foram realizados ensaios adicionais como em ensaios de caracterização, compactação, ensaios de avaliação de compressibilidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento dos materiais.

O projeto de fundação da estrutura OPTS é composto por 4 blocos de concreto armado interligados por vigas de travamento de concreto armado e protendido. Esses blocos são quadrados de dimensões 6,20m x 6,20 metros possuindo uma altura de 4 metros onde cada bloco é composto 25 estacas. As vigas que travam esses blocos são compostas de concreto protendido e composta por 12 estacas cada, sendo duas estacas a cada 6 metros. Sendo assim, cada fundação de torre é composta de 148 estacas.

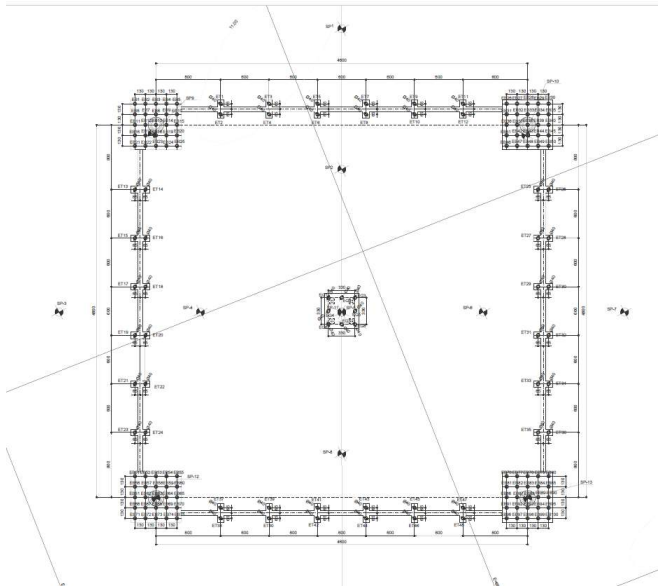


Figura 12: Fundação da torre OPTS em planta

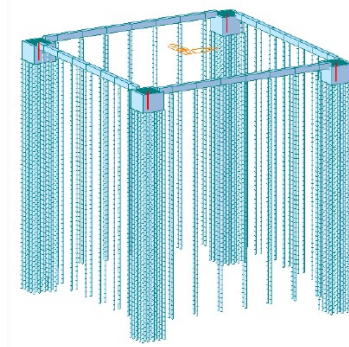


Figura 13: Modelagem numérica do conjunto da fundação da torre OPTS

Como cada torre está localizada em terrenos com características geotécnicas distintas, sendo uma torre na parte mais baixa com característica de zona temporariamente alagável em época de cheia, composta de solo mole (predominância de solo argiloso) e a outra torre locada em terreno mais alto com característica de solos mais resistente (areia siltosa), optou-se por ter duas soluções distintas de estacas, sendo a localizadas em solos moles foi dimensionado para estaca metálica com profundidades maiores e a da região com terreno de suporte de carga melhor com estaca raiz, ambas de diâmetro de 400mm cada estaca. Para a estaca metálica, as profundidades foram dimensionadas em torno de 55 metros de profundidade sendo que para as estacas raízes em torno de 20 metros de profundidade cada estaca.

7.0 - Construção

A linha de transmissão esta localizada em uma região classificada geologicamente como sendo uma planície aluvionar, onde durante o periodo de cheia, o Rio Amazonas ultrapassa o seu leito, elevando seu nível de água e alagando as planícies em seu entorno. Este evento acontece entre os meses de março a junho.

Após o mês de junho, as águas começam a baixar, o Rio Amazonas volta ao seu leito normal e, as áreas antes alagadas possibilitam a movimentação por terra quase que em toda a sua extensão onde esta prevista a implantação do traçado da linha de transmissão.

Durante o período de seca, embora seja possível se movimentar em quase toda área com terra, existem alguns pontos em que a faixa de terra as margens do rio amazonas é mais alta, provocando o represamento de água, impedindo, mesmo em período de seca, a movimentação de veículos.

O canteiro central do projeto recebe todo o material basicamente via transporte fluvial, onde os semi-reboques de cargas navegam sobre balsas (chatas). O transporte de cargas também se fazem sobre convés e nos porões das balsas. A seguir é mostrado o transporte dos tubos das fundações.



FIGURA 14: Movimentação de balsas com o uso de uma escavadeira hidraulica

Para o transporte das estruturas de aproximadamente 1500 toneladas/torre foi utilizado navio de carga geral, e as estruturas acondicionadas em porões, livres de intempéries, sobrepostas e protegidas por calços de madeira, cobertas por uma manta especial para garantia da integridade da carga, evitando danos a galvanização e a pintura das estruturas. O tempo estimado de trânsito foi de em média 60 dias.



FIGURA 15: Transporte Torre OPTS

Para efeito do Projeto Executivo, adotou-se a expressão de “trecho alagável”, a parte da linha de transmissão compreendida que, durante a cheia do Rio Amazonas, ficam submersas, com nível de água acima de 02 metros. Para a torre com a solução em estaca metálica, localizada neste trecho alagável, foi executado como primeira etapa construtiva um aterro sob solo mole envolto com pedra de enrocamento. A área de platô foi maior do que a área total da torre, com uma altura acima da máxima cheia histórica para que fosse usada de apoio a montagem da estrutura. Feito este platô com dimensões superiores a área da torre, pois foi previsto área de estocagem de material, área de vivência dos trabalhadores, área de trânsito de equipamentos, iniciou-se a cravação dos tubos metálicos, em seguida a execução dos blocos e por fim as vigas de travamento. Durante a execução da obra, uma equipe especializada em fundações profundas esteve presente, assim como soldadores especializados para realizarem ensaios em toda a solda dos tubos cravados. Nas figuras abaixo podem ser observados o platô com a fundação pronta assim como a fundação da torre na área seca com os tubos da estruturas prontos para serem montados.



FIGURA 16: Fundações prontas área alagavel e área seca



FIGURA 18 :Início da montagem da torre na area seca

A montagem iniciou-se pela torre da área seca. Na figura ao lado é mostrado a montagem da torre OPTS.

8.0 - Conclusão:

O projeto da LT 230 kV (CD) ORIXIMINÁ - JURUTI – PARINTINS está representando uma ampla gama de desafios. A equipe atuante no projeto tanto em construção como na engenharia, grande parte atuou na primeira travessia do Rio Amazonas e pode trazer consigo a experiência melhorando os aspectos positivos de todas as etapas do empreendimento. Nos estudos preliminares, teve-se o tempo de desenvolver grandes estudos geotécnicos tanto ao longo da linha como no ponto da travessia em si, podendo desenvolver projetos mais enxutos com um grau de confiabilidade maior. Na parte de planejamento da obra, redução de prazos, trabalhando com antecipação de pontos críticos que podem impactar significativamente o cronograma de execução da obra. Os aspectos ambientais foram especialmente considerados pois a linha atravessa um dos biomas mais importantes e preservados do mundo.

Com base em estudos estruturais, a estrutura apresenta uma geometria adequada, incluindo vantagens claras quando comparado com outras geometrias mencionadas neste artigo. A

torre em perfis tubulares de aço foi recomendada para este projeto, pois a torre OPTS tinha uma grande altura, grandes cargas. A estrutura de tubular de aço tem boa rigidez e propriedades de alta resistência. O comportamento estrutural está de acordo com as melhores práticas de engenharia, comprovando a eficiência do projeto.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- (1) Hui, Y., Liu, Y. and Zhao, D. – Geometric nonlinear analysis of transmission tower with continuous legs". Proceedings of International Conference on Advances in Steel Structures, Hong Kong, 1996.
- (2) CAO, J., PACKER, J. A. Design of Tension Circular Flange Joints in Tubular Structures. Engineering Journal, American Institute of Steel Construction.vol.34, n.1, p.17-25, First Quarter 1997.
- (3) Q/GDW384. The manufacturing code for transmission line steel tubular tower, 2009.
- (4) EN Publication 50341 - Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV, 2012
- (6) R.L.S. Nogueira, E. Cavalcanti, J. Rocha, J.N.M. Motta, S.M.M. Felix, R.M. Souza, A.A. Menezes, Amazon River Crossing and Rainforest Issues in Brazil- The Tucuruí - Jurupari – Macapá- OHTL System - Design Optimization, Sustainability and Overall Challenges, Cigré Canada Conference 2014.
- (7) LIN Zhitian, ZHANG Dachang, DAI Gangping, LI Buhui, WANG Chaosheng, ZHAO Wenbo - Design, Fabrication and Erecting of the Long Span Transmission Tower for Crossing the Amazon River of 500kV TL Tucuruí–Xingu–Jurupari–Oriximiná - Cigré Canada Conference 2014.

DADOS BIOGRÁFICOS



Raphaella Oliveira de Araujo, possuo formação em engenharia civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora, mestrado em engenharia estrutural pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Desde a minha formação em 2009, atuo na area de construção de linhas de transmissao e subestação. Atuei em importantes projetos como Travessia do Rio Amazonas pela Isolux, projeto Belo Monte pelo grupo State Grid (CET Brazil) e a segunda maior travessia do Brasil (empresa atual). Atualmente, trabalho como Coordenadora Tecnica de Projetos Civis em uma multinacional da area de energia.

(2) JULIANA NOBRE DE MELLO MOTTA
Engenheira civil, mestre e doutora em estruturas pela UFF. Trabalha na Marte Engenharia como supervisora da área de estruturas para linhas de transmissão e subestação faz 8 anos. Atuando no dimensionamento de estruturas metálicas, detalhamento e verificações dos tipos: Torres, galpões, pórticos, suportes e coberturas. Trabalha na estimativa de peso de toda a série de estruturas da Linha de Transmissão e especificações de projeto (no estudo de série de estruturas, árvores de carregamento, normas a serem adotadas, ensaios e procedimentos).