

XI CONGRESSO DE
CONSTRUÇÃO
METÁLICA E MISTA

23 e 24 de novembro de 2017
iParque Coimbra - PORTUGAL



MONITORAMENTO E CONTROLE DAS TENSÕES MECÂNICAS ATUANTES NA ESTRUTURA METÁLICA DE COBERTURA EM BALANÇO DO MUSEU DO AMANHÃ DURANTE SEU DESCIMBRAMENTO – RIO DE JANEIRO - BRASIL

Fabio G. Costa 1^a e João Paulo F. M. de Souza 2^b

^{a,b} *Gomes da Costa e Ferreira Martins –*

Eng. GomesTec Eng. & Soluções – gomesteceng@gmail.com

+55 11 9 7422 6537

Resumo. A arquitetura arrojada e monumental do Museu do Amanhã, com seus imponentes balanços de 75 m, foi um dos grandes desafios da engenharia brasileira, em sua concepção estrutural e execução. A etapa final de montagem desta estrutura foi o processo de descimbramento conforme os níveis teóricos de projeto. O controle do alívio dos esforços mecânicos decorrentes do processo de descimbre, em atendimento aos valores teóricos obtidos nas simulações numéricas, se deu através do uso de extensometria eletrônica em pontos específicos da cobertura. Este trabalho tem como finalidade demonstrar que um plano de instrumentação aliado a um projeto executivo permitem garantir a qualidade e a segurança da estrutura e da operação.

a b - Trabalho apresentado representando a empresa Falcão Bauer.

1. Introdução

Parte das obras de revitalização da zona portuária do Rio de Janeiro e do complexo Porto Maravilha, maior operação urbana consorciada do Brasil, o Museu do Amanhã é um museu de ciência e artes construído em 15.000 m², inaugurado em 17 de dezembro de 2015, que se tornou um dos ícones turísticos e culturais do Rio de Janeiro, além de ser um dos principais símbolos arquitetônicos das olimpíadas de 2016. [1]

Sua arquitetura é arrojada e moderna e foi concebida pelo arquiteto espanhol Santiago Calatrava. A sua curiosa cobertura, que lembra ou parece algo da natureza como uma espinha dorsal, consiste em uma estrutura metálica de forma longínea monumental, formada por uma trama principal de perfis tubulares de aço enrijecidos e uma grande treliça espacial auto-estável, coberta por chapas de aço patinável com alta resistência mecânica. A estrutura conta, ainda, com diversos perfis laterais fixos e articuláveis que, de forma inovadora, compõem um sistema de eficiência energética fotovoltaica. [1]

Projetada por Eng. Flávio D'Alambert e construída pela Martifer, a estrutura metálica da cobertura proporciona um peso de 3810 t de aço, é apoiada em uma estrutura de concreto monolítica e ainda impressiona com suas instigantes marquises em balanço de 70 m sobre a fachada frontal, denominada na época da obra como “lado terra”, e 65 m sobre a fachada posterior, o balanço “lado mar”. Estes balanços imponentes, no momento de sua construção, eram os maiores do Brasil e um dos grandes desafios da engenharia brasileira na sua concepção estrutural e na execução. Na figura 01, apresenta-se vista panorâmica de autoria própria, em 05/04/2015, da Praça Mauá, principal acesso do Museu e onde se encontrava parte do canteiro de obras. [1]



Figura 01: Vista panorâmica do Museu do Amanhã na praça Mauá

Para a montagem da estrutura metálica e seus balanços, foi necessária a aplicação de escoras telescópicas e de ponte rolante que sustentaram a estrutura no decorrer dos trabalhos de montagem e soldadura dos perfis e chapas da cobertura, possibilitando, assim, sua construção em atendimento aos níveis e cotas teóricos de projeto. Após a conclusão da montagem, deu-se início ao descimbramento monitorado pela Falcão Bauer, ou seja, a retirada das estruturas auxiliares e escoras utilizadas na montagem.

Para garantir que todo o procedimento fosse controlado com qualidade e segurança, além dos sensores de carga e pressão montados nos macacos hidráulicos e na ponte rolante, foram instalados pela Falcão Bauer sensores de deformação em pontos específicos da estrutura metálica, de forma a monitorar as tensões mecânicas atuantes nas vigas ao longo do processo de descimbramento.

Dessa forma, com os valores teóricos calculados e obtidos em simulações numéricas, foi possível controlar todo o procedimento, proporcionando maior confiabilidade e segurança no processo, além de avaliar o desempenho da edificação recém-montada por um período de tempo após o seu descimbramento.

2. Fundamentação teórica

2.1 Processo de descimbramento

O termo descimbramento refere-se ao ato de retirada do cimbramento de uma forma, utilizada durante a construção ou montagem de uma estrutura, ou seja, é a retirada das formas de escoramento ou escoras para concreto armado ou estrutura metálica. [2]

Grandes estruturas ou grandes vãos necessitam de descimbramento por escoramento em seu nascimento, que varia de acordo com a tipologia da estrutura. As escoras podem ser tubulares ajustáveis ou torre tubular, com ou sem abraçadeiras, verticais, conjugados com fôrmas do tipo mesas, treliças tubulares em leque, específicas para arcos metálicos, auto lançáveis, telescópicas, entre outros métodos construtivos. [2]

O processo de descimbramento é o inverso do cimbramento, devendo ser realizado com uma sequência previamente estabelecida e muito bem controlada: só deve ocorrer depois que a estrutura puder resistir a todas as cargas atuantes, utilizando equipamentos e ferramentas adequados, devendo-se evitar os movimentos bruscos ou impactos e ser retirada completamente. Para isso, é muito importante a aplicação de técnicas de monitoramento estrutural e do processo como um todo e, ainda, implementar rigorosamente todo o sistema de segurança da operação e da equipe envolvida. [2]

No processo de descimbramento dos balanços do Museu do Amanhã, foi aplicado o alívio compassado dos macacos hidráulicos nos topos de cada torre de escoras, de modo a permitir que a estrutura em balanço adquirisse seu estado de projeto original de forma equilibrada e controlada, sem que ocorressem falhas ou deformações permanentes. O seu cimbramento se deu através do uso de escoras telescópicas.

Na figura 02, apresenta-se vista superior da cobertura do Museu e indica-se o posicionamento das linhas de escoras dos balanços lado mar e lado terra, sendo estas denominadas G-4 e G-5 do lado terra e G+4, G+5 e G+6 do lado mar. Na figura 03, apresentam-se fotos dos alinhamentos das escoras G-4 e G-5.

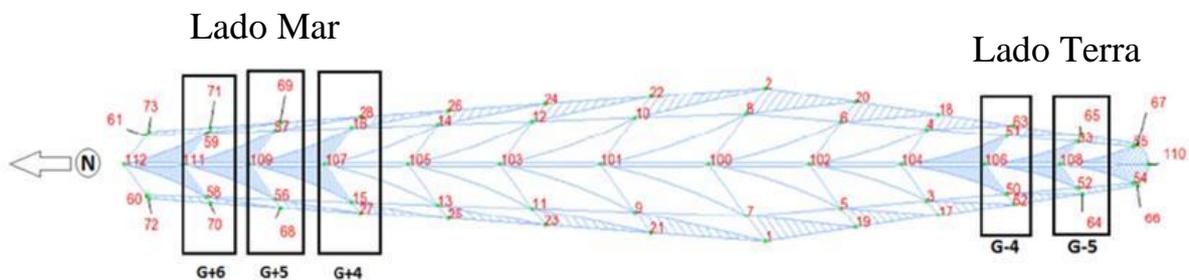


Figura 02: Numeração dos nós referentes e localização do escoramento dos balanços

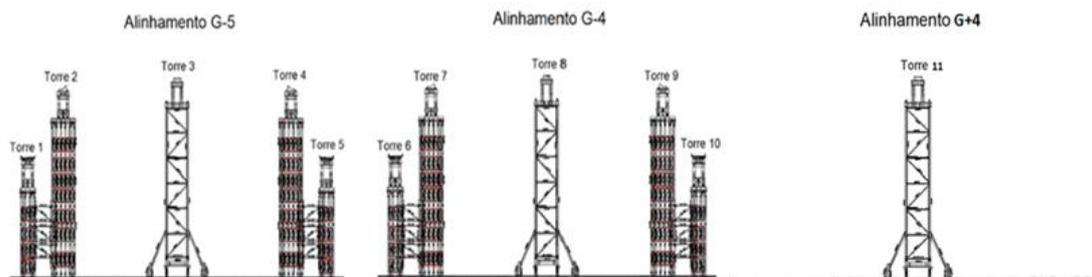


Figura 03: Esquemas com numeração torres escoramento referentes ao Lado terra, alinhamento G-5 e G-4.

Com o processo de cimbramento, a operação do descimbramento foi executada em duas etapas, uma etapa em cada balanço, lado terra e lado mar. Nas figuras 04 a 09, apresentam-se

imagens da época da construção dos balanços, com momentos como o cimbramento, a montagem e o descimbramento da cobertura metálica.



Figura 04: Vista do balanço lado terra sendo montado com parte da cobertura ainda no chão e parte do cimbramento montado – Data: 10/01/15.

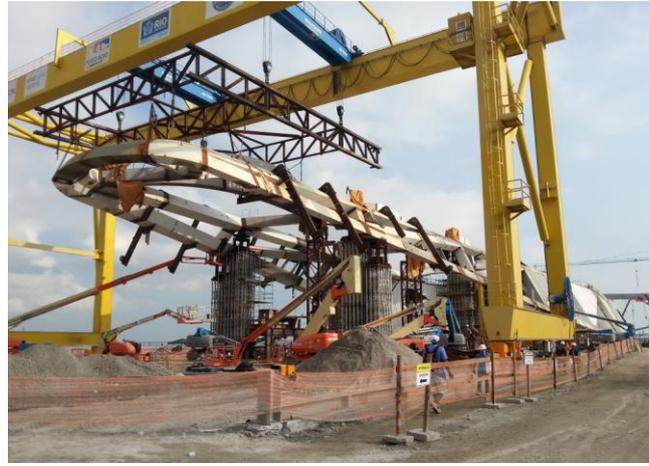


Figura 05: Vista do balanço terra. Ponta da cobertura já içada e em processo de soldadura; todo o cimbramento montado – Data: 14/02/15.



Figura 06: Vista parte da estrutura do Museu do Amanhã do lado terra, no momento do descimbramento – Data: 20/02/15.



Figura 07: Vista do Museu do Amanhã após descimbramento e retirada das escoras. Cobertura em fase final de montagem – Data: 05/04/15.



Figura 08: Vista do balanço lado mar do Museu do Amanhã, ainda em fase de montagem – nota-se a montagem de algumas escoras – Data: 10/01/15.



Figura 09: Vista do balanço lado mar do Museu do Amanhã, durante o descimbramento – notam-se as escoras em atividade – Data: 09/04/15.

2.2 Extensômetria eletrônica

O monitoramento das deformações e tensões durante o descimbramento foi realizado através da técnica de extensometria eletrônica (strain gages). Extensômetro é um transdutor capaz de medir deformações mecânicas através da queda de tensão elétrica em função do estímulo mecânico a medir (deformação), que altera a resistência elétrica que compõe o sensor. [3][4]

O principal objetivo de medir as deformações mecânicas de um elemento estrutural é a avaliação das tensões mecânicas, as quais vão indicar as tensões em função dos esforços que estão atuando nas peças estruturais. A medição desta tensão mecânica não é simples em condições operacionais de obra e indústria pesada. Algumas técnicas estão em desenvolvimento, baseadas em raios X, ótica a laser e outras, porém a extensometria eletrônica ainda é a mais comumente utilizada. [3][4]

A extensometria é considerada um método prático para a determinação de tensões mecânicas em materiais. É baseada na lei de Hooke, que determinou a relação entre a tensão suportada pelo material e a deformação resultante na superfície do objeto. Desde de o final do século XIX, estudiosos vêm desenvolvendo técnicas para medir tal deformação. Na primeira metade do século XX, utilizando a teoria de Charles Wheastone do circuito de ponte de 1843, que relaciona a variação de resistência elétrica a um estímulo mecânico, a extensometria eletrônica com grade colada foi inventada por Arthur Claude Ruge. [3][4][5]

Este modelo se aproxima dos utilizados nos dias de hoje e conta com uma grade composta por um único fio de Constantan que a percorre em diversos eixos paralelos entre dois terminais. A grade é colada na superfície a ser medida e, quando esta se deforma, a grade acompanha a deformação e, por consequência, a resistência elétrica do fio se altera, gerando variação de tensão e possibilitando transformar esta variação em unidades de medidas. [3][4]

Nas figuras 10 e 11, apresentam-se as pontes de Wheastone – $\frac{1}{4}$ de ponte e ponte completa, respectivamente –, circuitos utilizados na ligação da extensometria. Na figura 12, apresenta-se extensômetro uniaxial e, na figura 13, a roseta triangular (0° , 45° e 90°), que capta a deformação nos três eixos.

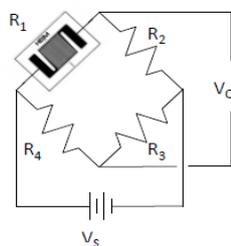


Figura 10: Ponte de Wheastone – $\frac{1}{4}$ de ponte

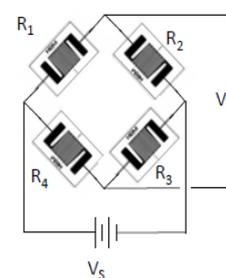


Figura 11: Ponte de Wheastone – ponte completa

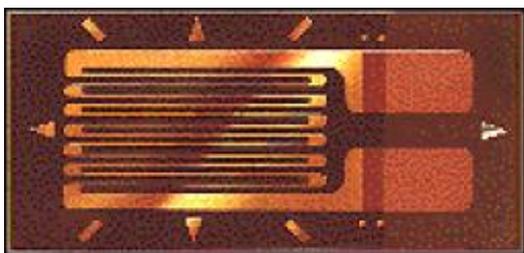


Figura 12: Extensômetro uniaxial

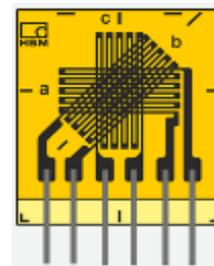


Figura 13: Roseta triangular 0° , 45° e 90° HBM

2.3 Plano de instrumentação

3. Materiais e métodos

3.1 Equipamentos

O sistema de medição utilizado nas atividades aferidos e aprovados e pela equipe técnica da Falcão Bauer é composto por uma unidade de aquisição de dados produzida pela Lynx tecnologias (modelo ADS-2000-IP), dotada de placas condicionadoras de sinais modelo AI2161-VB de 32 canais e softwares especializados. Já os softwares utilizados para a aquisição dos sinais e para o tratamento dos dados foram o AqDados (versão 7.2) e o AqDAnalysis, respectivamente.

3.2 Sensores

Foram utilizados extensômetros elétricos de 10 mm (Strain gages) fabricados pela Excel Sensors, modelo PA-06-250BA-120L. Esses sensores apresentam as seguintes características técnicas:

- Filme metálico de Constantan sobre base de poliamida;
- Auto-compensação para temperatura;
- Resistência nominal: 120 Ω ;
- Fator de Sensibilidade (gage factor): 2.1
- Dimensões da grelha (fole): (6,5 x 3,05) mm.

Esses transdutores foram instalados seguindo o procedimento de medição descrito no item a seguir.

3.3 Procedimento

Os trabalhos definidos em conjunto com equipe de engenheiros da Falcão Bauer, foram divididos nas seguintes etapas executivas:

- a) Inspeção e análise dos extensômetros previamente instalados;
- b) União dos extensômetros aos cabos de medição;
- c) Conexão dos cabos dos extensômetros ao sistema de aquisição de dados;
- d) Comunicação entre sistema de aquisição de dados e Software de controle;
- e) Início da coleta de dados;
- f) Monitoramento durante o período de execução do descimbramento;
- g) Monitoramento no decorrer do período de 6 h após o término de descimbramento.

A análise dos esforços medidos baseou-se na Lei de Hooke, expressa conforme a equação 01, a qual relaciona a tensão σ gerada no material com a deformação resultante ϵ , através de um fator multiplicativo E – do módulo de elasticidade do material.

$$\sigma = E\epsilon \quad (1)$$

O módulo de elasticidade utilizado para o aço é 210 GPa. As deformações foram coletadas em 08 (oito) pontos instrumentados com extensômetros eletrônicos ao longo de 13 h para o balanço lado terra e em 08 (oito) pontos no balanço lado mar por 15 h, utilizando-se uma taxa de aquisição de 60 Hz. Tais informações foram tratadas em software específico para as devidas correções de sinais.

Tratados os dados, geram-se os gráficos de deformação específica ao longo do tempo para visualização global das deformações ocorridas no decorrer do monitoramento. Após a aplicação da Lei de Hooke, geram-se os gráficos de tensão mecânica em (MPa) x tempo em (h). Os valores negativos indicam tensões compressivas e os valores positivos indicam tensões trativas.

3.4 Critério de análise

Os dados obtidos pela Falcão Bauer em tempo real foram acompanhados pelo Projetista e pelo fabricante para eventuais tomadas de decisões na obra para cada fase do descimbramento. Na figura 17, apresenta-se vista do modelo numérico, por elementos finitos, fornecido pelo Projetista, que originou as tensões mecânicas superficiais para controle do descimbramento. Tais tensões, foram denominadas como tensões previstas e utilizadas como máximo ponto de atenção no decorrer do processo. Caso as tensões obtidas atingissem estes valores, o procedimento seria avaliado pela engenharia para dar continuidade ou não ao processo do descimbramento.

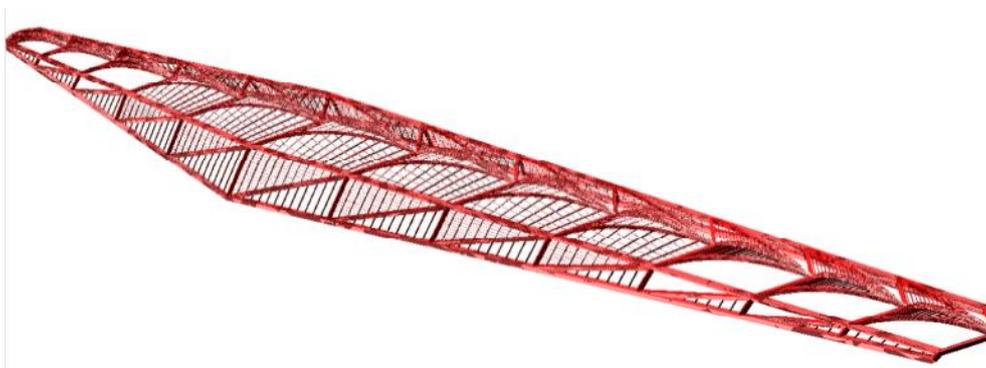


Figura 17: Vista do modelo numérico, por elementos finitos, utilizado para obter as tensões mecânicas previstas de controle e monitoradas pela equipe da Falcão Bauer;

4. Dados obtidos e discussão dos resultados

Na tabela 01, apresentam-se as tensões previstas calculadas no modelo numérico para o balanço terra e mar e as tensões obtidas após 6 h do término do descimbramento para ambos os balanços.

Tabela 01: Tensões previstas e obtidas na instrumentação da Falcão Bauer após 6 h do fim do descimbramento

Lado Terra				Lado Mar			
PONTO	PERFIL	TENSÃO PREVISTA (MPa)	TENSÃO MEDIDA (MPa)	PONTO	PERFIL	TENSÃO PREVISTA (MPa)	TENSÃO MEDIDA (MPa)
E1	BI2	-110,04	-46,37	E1	BI2	-175,76	-73,83
E2	BI2	-110,04	-28,91	E2	BI2	-175,76	-73,02
E3	BS4	102,56	38,80	E3	BS4	203,25	48,40
E4	BS4	102,56	29,36	E4	BS4	203,25	59,72
E5	BI3	58,43	-9,37	E5	BI3	133,88	5,08
E6	BI3	58,43	2,87	E6	BI3	133,88	9,75
E7	BS4	28,33	-34,20	E7	BS2	26,91	-1,18
E8	BS4	28,33	-26,68	E8	BS2	26,91	9,51

Nas figuras 18 e 19, apresentam-se os gráficos da variação de temperatura em função do tempo no decorrer do monitoramento e do período de 6 h após o término do descimbramento para os dois balanços. Nas figura 20 e 21, apresentam-se as tensões em (MPa) em função do tempo dos referidos extensômetros instalados na estrutura nos balanços dos lados terra e mar.

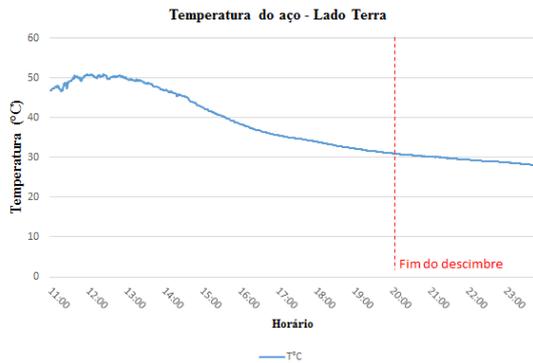


Figura 18: Temperatura descimbre – lado terra

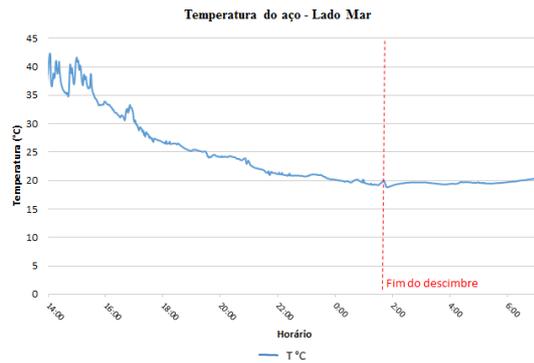


Figura 19: Temperatura descimbre – lado mar

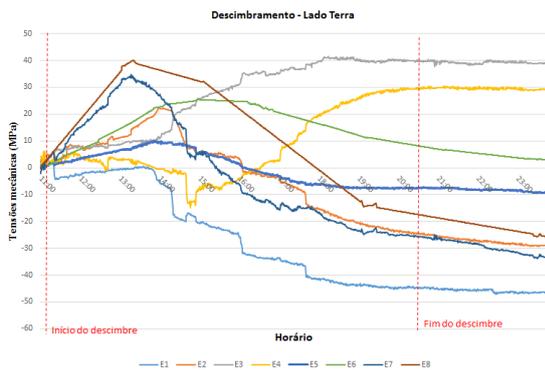


Figura 20: Tensões mecânicas – lado terra

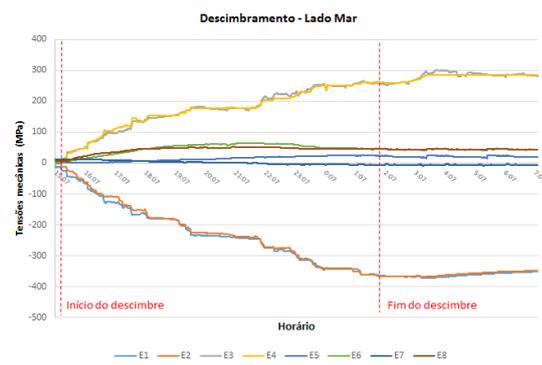


Figura 21: Tensões mecânicas – lado mar

De acordo com os dados obtidos no descimbramento do lado terra, nota-se que os sensores acompanharam as movimentações e deslocamentos ocorridos na estrutura. Nas primeiras duas horas, todos os pontos oscilaram de forma crescente. Após às 14 h, os valores passaram a se comportar de forma mais estável em seus patamares e, aproximadamente às 16 h, houve considerável variação de valores e alteração no sinal. No período pós descimbramento, após às 21 h, os valores atingem valores estáveis e contínuos.

As maiores variações se concentraram nos pontos E1, E2, E3 e E4, os quais foram confirmados pelo Projetista por serem os de maiores solicitações de esforços mecânicos e, compressivos para E1 e E2 e trativos para E3 e E4. Ao analisar as curvas do gráfico da figura 28, nota-se que, entre 14 h e 16 h, os pontos E1 e E2 apresentaram sinais inversos, sendo o ponto E1 (-) e o ponto E2 (+). O mesmo acontece com os pontos E3 e E4, sendo o ponto 03 (+) e o ponto 04 (-), confirmando que houve assincronismo no início do descimbre.

Após 16 h, no mesmo instante, os pontos E2 e E4 inverteram o sinal e se aproximaram dos pontos E1 e E3, respectivamente, estabilizando-se em seguida. Ao término do período monitorado, notou-se que os pontos E1 e E3, ou seja, o lado esquerdo da estrutura, apresentavam tensões maiores do que aquelas apresentadas pelos pontos E2 e E4, levando-nos a concluir que o lado esquerdo recebe mais carga do que o lado direito. Este fato foi confirmado pela topografia, de acordo as informações coletadas pelo Projeto Alpha e Consorcio Porto Rio. Confirmou-se pela engenharia, ainda, que, no período pós descimbre, os pontos E2 e E4 não estavam completamente aliviados, o que contribuiu na diferença.

De acordo com os dados obtidos no decorrer do período do descimbramento no lado mar, nota-se que os sensores acompanharam as movimentações e deslocamentos ocorridos na estrutura. Nas primeiras quatro horas, todos os pontos variaram de forma crescente. Após 19 h, os valores passaram a se comportar de forma mais estável em seus patamares, período este em que houve reparos nas escoras e o procedimento de descimbre ficou paralisado.

Aproximadamente às 22 h, houve considerável variação crescente de valores, atingindo um patamar estável na medida em que o descimbre aproximava-se do final.

Nota-se que as maiores variações se concentraram nos pontos E1, E2, E3 e E4, os quais foram confirmados pelo Projeto Alpha como sendo os de maiores solicitações de esforços mecânicos. Os pontos E1 e E2 apresentaram predominantemente sinais negativos, que indicavam esforços compressivos, enquanto os pontos E3 e E4 apresentaram sinais positivos, indicando esforços trativos, confirmando o comportamento das tensões previsto pelo modelo.

Os valores apontados pelos sensores E1 e E2, que são simétricos nos banzos inferiores, e pelos sensores E3 e E4, também simétricos nos banzos superiores, apresentaram-se próximos e variaram de forma sincronizada na medida em que o balanço se carregava com o peso próprio. Este fato comprova que o alívio da pressão nos macacos hidráulicos se deu de forma equilibrada e balanceada.

De forma global, todas as variações de tensões mecânicas e suas magnitudes estão abaixo das tensões previstas de acordo com a tabela 01 e, ainda, bem abaixo das tensões de limite de escoamento para aço ASTM A572, que é da ordem de 350 MPa. As tensões obtidas estabilizaram no patamar de até 40% das tensões previstas e no seu sentido de deformação, conforme o modelo estrutural indicou.

5. Conclusão

De acordo com os resultados obtidos e análises realizadas com equipe de engenheiros da Falcão Bauer, conclui-se que as tensões mecânicas captadas no decorrer das etapas de descimbramento são de baixa magnitude, indicando que, no período monitorado, a estrutura trabalhou dentro do regime de elasticidade do aço e das condições previstas em projeto.

Atividade de extensometria eletrônica para este caso, confirma a eficiência e precisão desta metodologia para o controle de qualidade de um processo construtivo, conferindo à toda a equipe de engenharia, confiabilidade e agilidade nas tomadas de decisões no decorrer das atividades e contribuindo para segurança da operação.

Agradecimentos

- Diretora Presidente Vera Lucia Falcão Bauer Lorenço - Grupo Falcão Bauer;
- Diretor Técnico Roberto Jose Falcão Bauer - Grupo Falcão Bauer;
- Engenheiro Flavio Correia D'Alambert - Projeto Alpha;
- Eng^a. Marcella Fanchin e Eng^o. João Carlos Albuquerque - Consórcio Porto Rio;
- Técnicos Mecatrônicos Fernando F. de Oliveira e Marco C. Borges – Grupo Falcão Bauer.

Referências

- [1] **ESTRUTURA: O Museu do Amanhã.** São Paulo: Abece, v. 1, 1 jul. 2016. Mensal.
- [2] **INFRAESTRUTURA: Cimbramento de Grandes Estruturas.** São Paulo: CEHOP – Companhia Estadual de Habitação e Obras Públicas. v 1, 13 fev. 2009. Disponível on line: acesso em agosto de 2017.
- [3] **INSTRUMENTAÇÃO DE ENSAIOS, Strain Gage.** Florianópolis: Labeec, Departamento de Engenharia Civil, Disponível on line: acesso em agosto de 2017.
- [4] **RILEY, W. F. Instrumentation For Engineering Measurements John Willey & Sons Inc.,** 1993, ISBN 0-471-60004-0.
- [5] **CALLISTER, W. D, Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução.** 5ª Edição, LTC, São Paulo – 2002.