



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

Construção de tabuleiros com cimbramentos móveis de elevada produtividade – Da Concepção à Operação

Pedro Pacheco¹

Hugo Coelho²

Igor Soares³

¹ BERD/ CEO/ pedro.pacheco@berd.eu

² BERD/ Produção/ hugo.coelho@berd.eu

³ BERD/ Produção/ igor.soares@berd.eu

Resumo

A construção com cimbramentos móveis se revela uma solução com importantes vantagens de produtividade e relevante potencial de otimização de materiais em viadutos de grande extensão.

O novo M30x2-S é um cimbramento autolançável superior de duplo vão projetado pela BERD. O equipamento é dotado do sistema OPS (Organic Prestressing System).

Ao longo deste artigo se apresenta a evolução do projeto do equipamento, desde a fase de concepção, em que a interação com o projetista dos viadutos e construtora foram determinantes para definição das características gerais da máquina com vista a cumprir os requisitos estruturais, cinemáticos e de rentabilidade na operação, até às fases de projeto de execução de estrutura metálica, acompanhamento de fabrico e realização de ensaios de viabilização cinemática.

Palavras-chave

BERD, M30x2-S, OPS, Cimbramento, Ponte, Viaduto, Concretagem *in-situ*, Fôrma

ASPETOS DA CONCEÇÃO

Um cimbramento autolançável é concebido para, de forma segura e eficiente, permitir a execução do tabuleiro de uma ponte. O cumprimento deste objetivo pressupõe a integração de múltiplos fatores não contemplados no projeto de estrutura metálica corrente.

Os principais fatores de diferenciação face às estruturas metálicas correntes são, na prática, os seguintes: um cimbramento autolançável é uma máquina que incorpora diferentes mecanismos, está sujeito a solicitações cinemáticas, possui diferentes equipamentos elétricos e hidráulicos e está exposto a erros de operação, pelo que todos estes fatores devem ser integrados do ponto de vista da análise estrutural. Adicionalmente, a uma determinada máquina está associado um requisito de desempenho, pelo que não é suficiente garantir a integridade estrutural, é também necessário responder positivamente aos requisitos de produtividade.



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 1 – M30x2-S

No caso concreto do M30x2-S os principais desafios evidenciam-se nos pontos seguintes:

- Traçado complexo da via que resulta em elevadas exigências cinemáticas e introdução de diferentes graus de liberdade na máquina;
- Projeto de execução da Ponte avançou em paralelo com o projeto do equipamento;
- Ciclo de trabalho exigente – 60 metros de tabuleiro em 6 dias – de forma a não comprometer a duração global da obra;
- Forte sobreposição de fabrico e projeto de execução assim como tempo de fabrico da estrutura metálica limitado;
- Fabrico do equipamento em Portugal e operação no Brasil.

A seção transversal da ponte a executar compreende dois tabuleiros paralelos, construídos por dois cimbramentos em simultâneo. O vão tipo tem comprimento de 30 m, medido entre eixos de pilares, e uma largura aproximada de 16 m. Na Fig. 2.1 se apresenta a seção transversal do tabuleiro tipo.

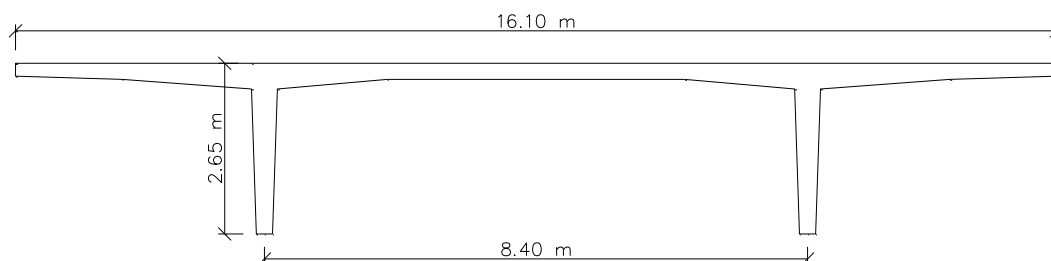


Figura 2.1 – Imagem da seção transversal da ponte a meio vão

O processo construtivo da ponte prevê a concretagem simultânea numa extensão de 60 metros, repartida em tramos de 24, 30 e 6 metros ($4/5 L + L + 1/5 L$), como se representa na



Fig. 2.2. A concretagem simultânea de 2 tramos permite um aumento da produtividade e da segurança operacional da máquina, decorrentes da redução do número de operações de avanço e afinação da fôrma.

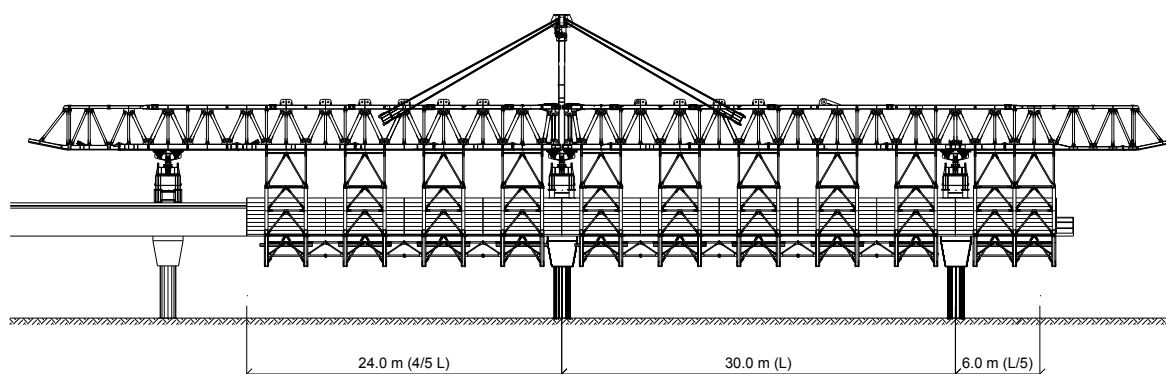


Figura 2.2 – Alçado da máquina

As características funcionais da máquina são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características Gerais do Equipamento

Tipo	Cimbramento Autolanzável Superior
Método Construtivo	Duplo vão de 30 metros
Peso médio do tabuleiro	19ton/m
Gama de inclinações longitudinais	[2.3%; -2.3%]
Gama de inclinações transversais	[6%; -6%]
Máxima velocidade de vento admitida durante o avanço	40km/h
Máxima velocidade de vento admitida durante a concretagem	40km/h
Máxima velocidade de vento de projeto	140km/h
Raio mínimo de curvatura em planta	745m
Raio mínimo de curvatura côncava em alçado	6300m
Raio mínimo de curvatura convexa em alçado	9300m
Equipamento de locomoção	4 Guinchos
Máxima deformação em concretagem	15mm
Peso total de estrutura metálica	480ton
Massa viajante (incluindo fôrma e armadura suspensa)	600ton

A análise estrutural e verificação de segurança do M30x2-S se fundamentaram em modelos de cálculo parciais e globais que traduzem os vários cenários de operação do equipamento. Os modelos de cálculo realizados contemplam as ações e cenários de cálculo fundamentais e simulam as variações de geometria experimentadas pela estrutura ao longo da operação.



DESCRIÇÃO DA MÁQUINA

O equipamento M30x2-S é constituído por três componentes fundamentais:

- Viga principal;
- Estruturas de Apoio – Pórticos de Pilar e Bogies;
- Estruturas Transversais;

Na Figura 3.1 apresenta-se uma vista 3D do equipamento completo.

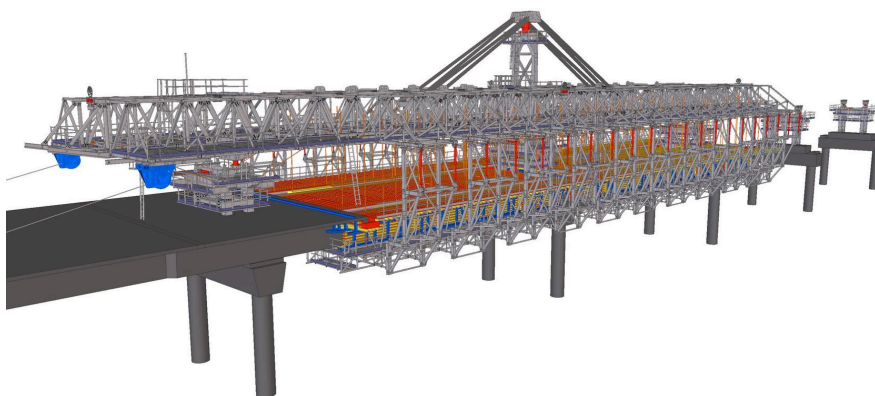


Figura 3.1 – Vista 3D do Equipamento

Viga Principal

A viga principal do equipamento M30x2-S é uma estrutura metálica treliçada que possui uma torre no alinhamento do apoio central. A estrutura metálica da viga principal é reforçada com o Sistema de Pré-Esforço Orgânico (OPS – Organic Prestressing System).

O OPS é materializado pelo estaiamento das vigas principais à torre. Os estais são constituídos por monocordões, cuja força instalada é variável em função da carga externa de concreto. A variação da força no sistema de estaiamento ocorre de forma automática, mediante incorporação na estrutura de sistemas de monitorização, controlo e atuação (2).

A diretriz da via considerada no projeto do equipamento compreende raios de curvatura pequenos, pelo que a viabilização da concretagem simultânea de dois tramos implicou a materialização de uma articulação em planta.

Nas Figuras 3.2 e 3.3 se apresentam a viga principal e um detalhe da zona da rótula de eixo vertical, respetivamente.



Figura 3.2 – Viga Principal

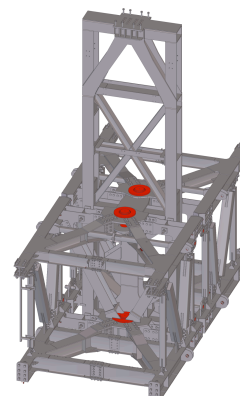


Figura 3.3 – Detalhe da zona da rótula



As Estruturas Transversais (ET's) são constituídas por 3 subconjuntos: Asas, Pendurais e Módulos Inferiores.

As Asas são estruturas fixas que constituem prolongamentos transversais em consola da Viga Principal. Os Módulos Inferiores dão apoio direto à estrutura da Fôrma. Os Pendurais, para além de materializarem a ligação entre Asas e Módulos Inferiores, incorporam cilindros hidráulicos cuja atuação permite a rotação (abertura) conjunta de Pendurais, Módulos Inferiores e Fôrma, viabilizando o avanço da máquina para os vãos seguintes sem colisão com pilares ou tabuleiro adjacente.

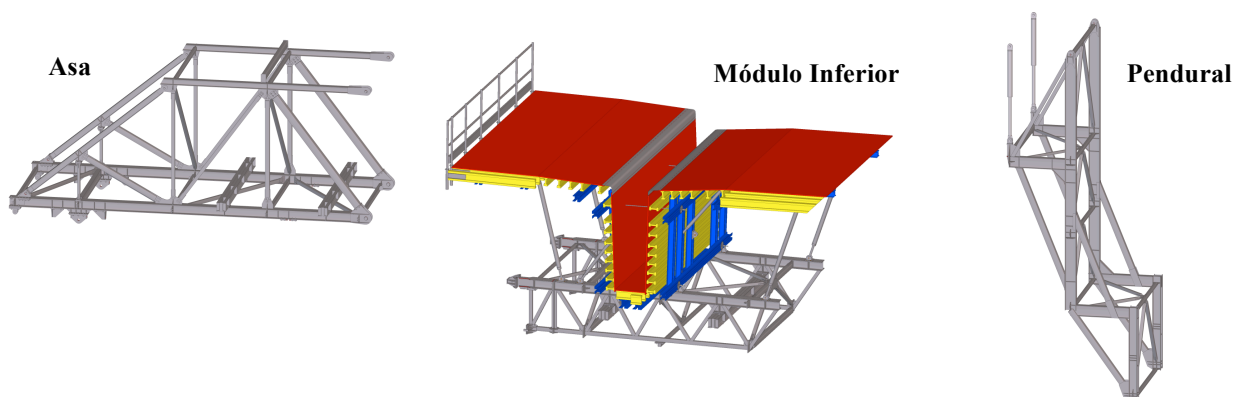


Figura 3.4 – Componentes das ET's do M30x2-S

Na Fig. 3.4 é possível observar cada um dos subconjuntos das estruturas transversais.

As ET's apresentam dois esquemas estruturais de funcionamento distintos. Em fase de concretagem do tabuleiro (i), o sistema de apoio do Módulo Inferior materializa-se pela suspensão direta às Asas, através de varões roscados de alta resistência. Na fase de movimentação do equipamento (ii), o esquema estrutural de apoio dos módulos inferiores é diferente pois estes encontram-se engastados nos Pendurais.

Na Figura 3.5 apresenta-se a geometria das ET's durante a fase de concretagem do tabuleiro e no início da movimentação da máquina para o novo tramo.

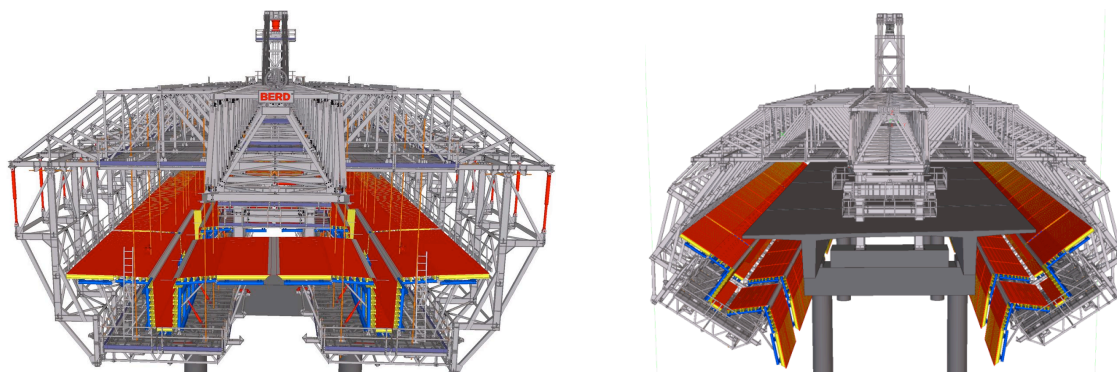


Figura 3.5 – Operação do equipamento



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:



Estruturas de apoio

As Estruturas de Apoio da Viga Principal são materializadas por conjuntos de Pórticos e Bogies (Figura 3.6).

Os Bogies são estruturas de interface entre os Pórticos e a Viga Principal e estão equipados com rollers que viabilizam a locomoção longitudinal do equipamento e permitem ripar transversalmente a Viga Principal no topo do Pórtico, de modo a permitirem a orientação do cimbramento de acordo com a curvatura em planta.

De modo a permitir a adaptação da Viga Principal a variações da inclinação longitudinal, os rollers dos Bogies são ajustáveis altimetricamente por atuação em cilindros hidráulicos garantindo, dessa forma, a colinearidade dos apoios da Viga Principal durante a movimentação e minimizando os esforços hiperestáticos induzidos por deslocamentos impostos. Na Fig. 3.6 é, também, possível observar os cilindros de ajuste altimétrico sob os Bogies.



Figura 3.6 – Estrutura de Apoio

ASPETOS DE FABRICO

Coordenação

Um dos desafios do fabrico do M30x2-S foi a forte sobreposição entre as fases de Projeto de Execução dos Viadutos, Projeto de Execução do Equipamento e Fabrico do Equipamento.

As incertezas inerentes ao desenvolvimento simultâneo do Projeto dos Viadutos e do Equipamento construtivo foram contornadas dotando o Equipamento de versatilidade e estabelecendo as interfaces numa fase preliminar do projeto.

Por outro lado, houve uma forte articulação entre o planeamento de Projeto e o Plano de Produção do fabricante, que integrou, para além das tarefas produtivas, a pré-montagem quase total da estrutura e a realização de ensaios cinemáticos à escala real, tarefas que consomem uma área muito significativa do espaço produtivo.



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:



O projeto foi integralmente modelado em TEKLA pela equipa de projeto, reduzindo ao máximo os trabalhos de modelação e interpretação da estrutura por parte do fabricante tendo minimizado erros e acelerado o arranque do fabrico. Na Fig. 4.1 se apresenta um diagrama do projeto e fabrico de estrutura metálica.

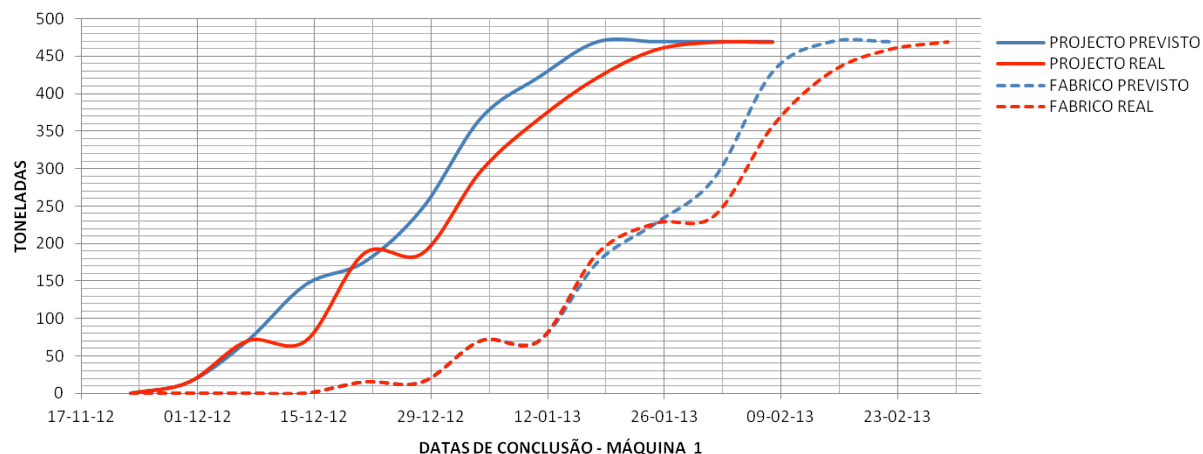


Figura 4.1 – Diagrama de projeto e fabrico de estrutura metálica

Nas Figuras 4.2 e 4.3 se apresentam componentes do equipamento em fase de fabrico.

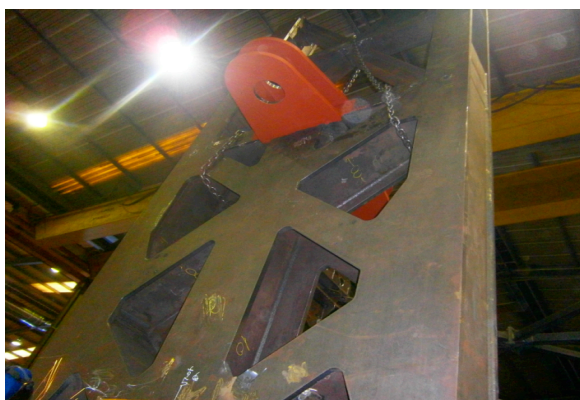


Figura 4.2 – Torre



Figura 4.3 – Módulos de Viga

Controlo de Qualidade

Para além das exigências comuns à generalidade das estruturas metálicas – salvaguardadas pelas Especificações Técnicas de Fabrico e pelo Plano de Inspeção e Ensaio (PIE) – o controlo geométrico e o controlo de funcionalidade assumem uma importância vital na fase de fabrico.

As medidas decorrentes do PIE são complementadas com um acompanhamento intensivo do Fabrico por parte da equipa de Projeto, com um plano exaustivo de Pré-Montagens em larga escala e com Ensaios Integrados (3).

As operações críticas de cinemática da estrutura foram verificadas em Ensaios Integrados realizados à escala real, com montagem conjunta de estrutura metálica, equipamentos e fôrma (Fig. 4.4).



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 4.4 – Ensaio de cinemática do equipamento



Figura 4.5 – Ensaio aos cilindros hidráulicos

Para além de garantir uma adequada integração dos diferentes componentes, os ensaios permitem testar a funcionalidade da máquina, o que constitui a base da produtividade e versatilidade em fase operacional.

Por outro lado, no caso de equipamentos hidráulicos com forte interação com a estrutura, cujo comportamento estrutural não fica completamente caracterizado em fase de projeto, são efetuados ensaios integrados com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural conjunto e a capacidade de carga (Fig. 4.5).

Transporte

A estrutura foi desenhada de forma modular e todos os seus componentes com seccionamento compatível com as dimensões de contentores OpenTop 40', para que os custos de transporte fossem racionalizados.

ARRANQUE DAS OPERAÇÕES

Montagem

Uma boa montagem é crucial para que o equipamento tenha o comportamento previsto na fase de projeto.

São fornecidos, à equipa de montagem, desenhos e listas de verificação de todas as especialidades envolvidas (Estrutura Metálica, Óleo-Hidráulica, Eletricidade e OPS) com os dados relevantes para uma correta montagem.

Ao longo desta fase são realizadas inspeções, afinações e ensaios (estes 2 últimos incidem essencialmente nos mecanismos e nos componentes óleo-hidráulicos) que validam a montagem.

A Fig. 5.1 apresenta o equipamento M30x2-S em fase de montagem no local da obra.



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 5.1 – Montagem do equipamento



Operação

É na fase de Operação que a máquina é colocada à prova, não só ao nível da funcionalidade mas também da produtividade. Para que tudo o que foi desenvolvido na fase de projeto se materialize, é emitida documentação técnica de apoio à operação:

- Manual de Operações (4);
- Listas de Verificação de Operação (5);
- Plano de Segurança e Análise de Risco (6).

Apesar da existência desta documentação, é usual a equipa de projeto acompanhar os primeiros ciclos da máquina, supervisionando e formando os operadores para que todos os procedimentos sejam interiorizados.

Possuir uma equipa de operação com experiência neste tipo de equipamentos pode ser decisivo na produtividade e segurança da operação.

A sequência de operação do equipamento para execução de um tramo tipo resume-se, sinteticamente, nos seguintes pontos:

- Concretagem
- Protensão do tabuleiro
- Descimbramento
- Abertura das Estruturas Transversais (Fig. 5.2)
- Ajuste planimétrico do equipamento para movimentação longitudinal
- Movimentação longitudinal para execução do novo tramo
- Ajuste planimétrico para execução do novo tramo
- Fecho e posicionamento das estruturas transversais
- Afinação da fôrma
- Montagem de armadura ordinária e armadura de protensão do novo tramo

Uma particularidade do equipamento M30x2-S é a possibilidade de transportar e posicionar as armaduras de alma (ordinárias e de protensão) das vigas principais do tabuleiro. Esta característica tem influência direta na rentabilidade dos trabalhos, uma vez que permite a pré-fabricação destes elementos. Na Fig. 5.3 é possível observar a colocação das armaduras de alma das vigas principais na fôrma.



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 5.2 – Abertura das Estruturas Transversais

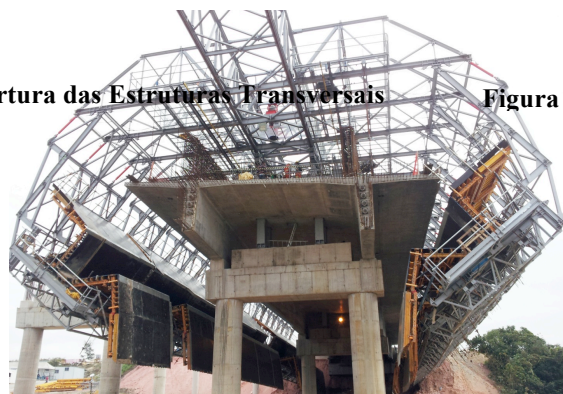


Figura 5.3 – Colocação das armaduras pré-fabricadas



CONCLUSÕES

Neste tipo de equipamento é exigida uma articulação forte entre os diversos departamentos (Projeto, Fabricação, Logística, Montagem e Operação). O planejamento, a monitorização constante da qualidade, a avaliação dos riscos em cada fase e a capacidade de decisão são essenciais para que os objetivos sejam alcançados. O elevado risco associado a este tipo de estruturas - comparativamente com outras mais correntes - aliado a prazos exigentes, assim o exige. No caso concreto do M30x2-S, a forte variabilidade na geometria do tabuleiro, conduziu a um equipamento com diversos graus de liberdade. Este fato obrigou a uma forte atenção aos mecanismos e respectivas operações de cinemática durante a fase de projeto e operação.

Os equipamentos atingiram uma produtividade pico de 2 vãos em sete dias, cada equipamento. Os equipamentos atingiram uma produtividade cruzeiro de 2 vãos em 7 dias, cada equipamento. Significa que os 2 equipamentos tiveram uma produtividade cruzeiro conjunta de 500 m de viaduto por mês.

AGRADECIMENTOS

A BERD agradece a toda a colaboração da Contern e da Enescil.

REFERÊNCIAS

- (1) BERD.16293.WP.01.01.DD.01 - Memória de Cálculo M30x2-S, 2013.
- (2) P. Pacheco. Pré-Esforço Orgânico – Um Exemplo de Sistema Efectivo. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto, 1999.
- (3) BERD.16293.WP.08.03.TD.00 - Plano de Pré-Montagens, 2013.
- (4) BERD.16293.WP.05.300.DD.02 - Manual de Operações, 2013.
- (5) BERD.16293.WP.05.51.DD.03 - Listas de Verificação de Aperto dos Parafusos, 2013.
- (6) BERD.16293.WP.05.315.DD.01 - Plano de Segurança e Análise de Risco, 2013.