

metálica

ano 15 · nº 33 · março 2014 · 10 €

revista da
associação portuguesa de
construção metálica e mista



TÉCNICA **IMPACTO EM ESTRUTURAS METÁLICAS**

PROJETOS **BERD M30X2-S – DA CONCEÇÃO À OPERAÇÃO**

BERD M30X2-S – da Conceção à Operação

Igor Soares, Gilberto Alves, Hugo Coelho

Engenheiros Cívís

BERD – Projecto, Investigação e Engenharia de Pontes, S.A



↑ Fig.1 M30x2-S

1. Introdução

O novo M30x2-S é um cembre autolançável superior de duplo vão projetado pela BERD. O equipamento é dotado do sistema OPS (Organic Prestressing System). A máquina está, neste momento, em operação no Estado de São Paulo, Brasil.

Ao longo deste artigo apresenta-se 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 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.

2. Aspetos da concepção

Um cembre 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 cembre 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

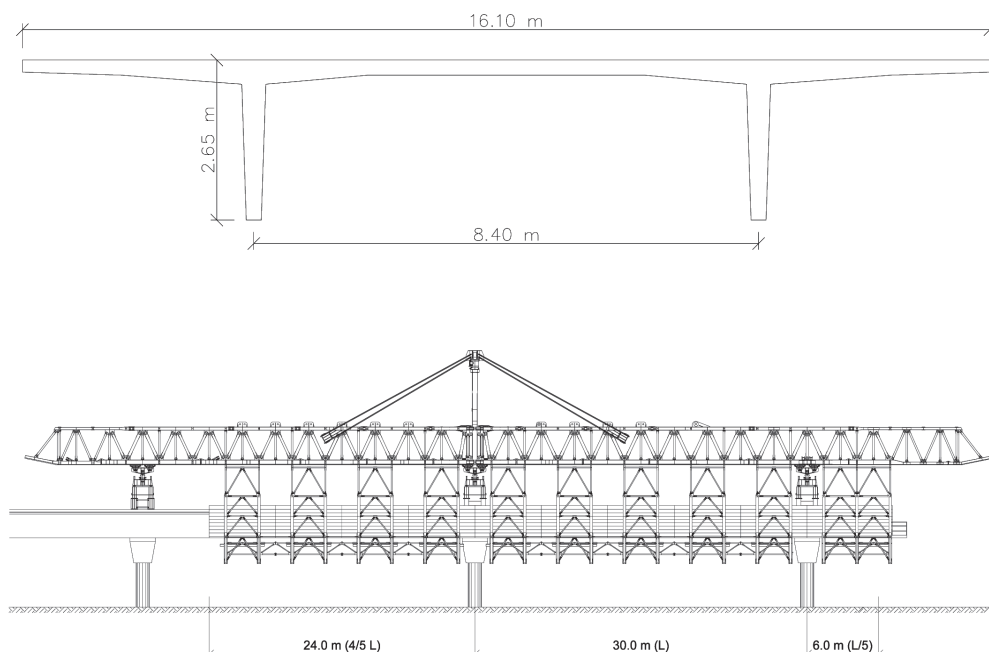
de desempenho, pelo que não é suficiente garantir a integridade estrutural; é também necessário responder positivamente aos requisitos de produtividade. No caso concreto do M30x2-S, os principais desafios evidenciam-se nos pontos seguintes:

- 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 5 dias – de forma a não comprometer a duração global da obra.
- Fortes 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 secção transversal da ponte a executar compreende dois tabuleiros paralelos, construídos por dois cimbres em simultâneo. O vão tipo tem comprimento de 30 m, medido entre eixos de pilares, e uma largura aproximada de 16 m. Para a secção transversal foi adotada uma solução em PI (π) com pré-esforço longitudinal e espessura da laje a variar entre 0.20 e 0.40 m. A alma das vigas tem cerca de 2.65 m de altura. Na Fig. 2.1 apresenta-se a secção transversal do tabuleiro tipo.

O processo construtivo da ponte prevê a betonagem 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 betonagem 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 de cofragem.

↓ Fig.2.1 Imagem da secção transversal da ponte a meio vão.



↑ Fig.2.2 Alçado da máquina.

Tabela 1 Características Gerais do Equipamento.

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

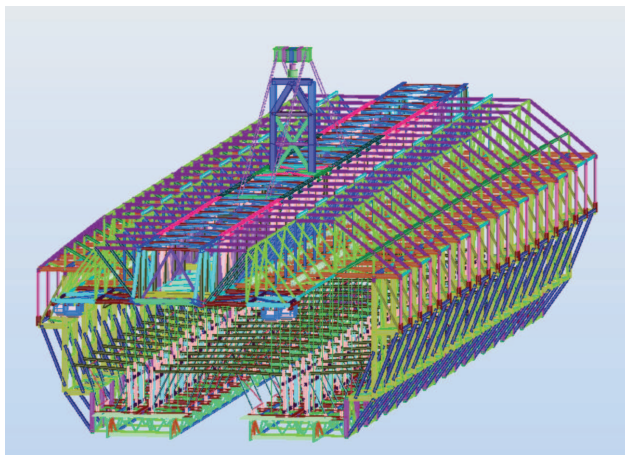
O tabuleiro é construído com vigas retas entre pilares, sendo a curvatura teórica materializada pela sobrelargura das consolas da laje superior.

Para além do traçado e estrutura dos viadutos, existiram outros fatores relacionados com a implantação com impacto marcante na conceção da máquina, nomeadamente a limitação da altura máxima do equipamento (de forma a evitar desmantelamento de linhas elétricas) e a limitação do atravancamento máximo abaixo da cota do tabuleiro (de forma a minimizar e, em alguns casos, evitar necessidades de escavação).

As características funcionais da máquina são apresentadas na Tabela 1.

A análise estrutural e verificação de segurança do M30x2-S fundamentou-se 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. Na Fig. 2.3 é possível observar uma configuração do modelo de cálculo global construído ⁽¹⁾.

↓ Fig.2.3 Modelo de cálculo global do M30x2-S.



3. Descrição da máquina

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

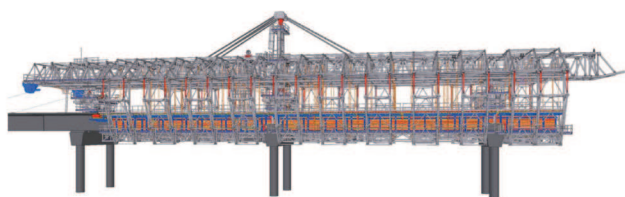
- Viga principal;
- Estruturas de Apoio – pórticos de pilar e bogies;
- Estruturas Transversais;

Nas Fig. 3.1 e Fig. 3.2 apresentam-se vistas 3D do equipamento completo. A Fig. 3.3 apresenta o equipamento no local da obra.

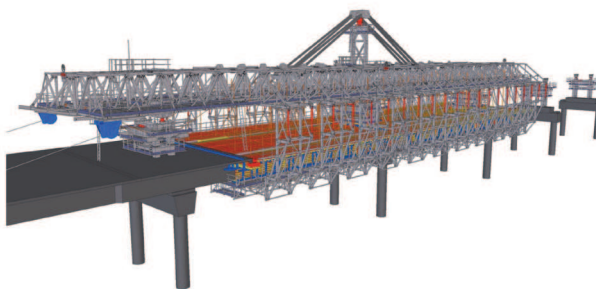
3.1. Viga Principal

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 atirantamento das vigas principais à torre. Os tirantes são constituídos por monocordões, cuja força instalada é variável em função da carga externa de betão. A variação da força no sistema



↑ Fig.3.1 Vista 3D do equipamento_A.



↑ Fig.3.2 Vista 3D do equipamento_B.

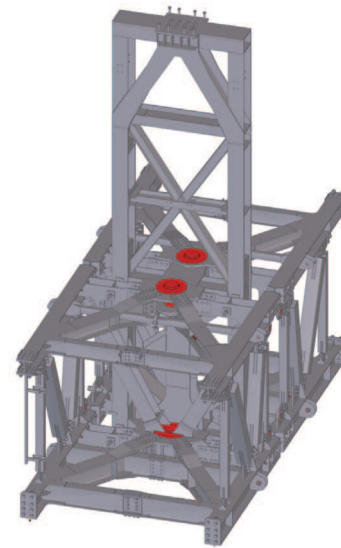
↓ Fig.3.3 M30x2-S em obra.



↓ Fig.3.4 Viga Principal.



↓ Fig.3.5 Detalhe da zona da rótula.



de atirantamento 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 betonagem simultânea de dois tramos implicou a materialização de uma articulação em planta.

Nas Fig. 3.4 e Fig. 3.5 apresenta-se a viga principal e um detalhe da zona da rótula de eixo vertical, respetivamente.

3.2. Estruturas Transversais

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 Cofragem.

Os Pendurais, para além de materializarem a ligação entre Asas e Módulos Inferiores, incorporam cilindros hidráulicos cuja atuação permite a rotação (abertura)

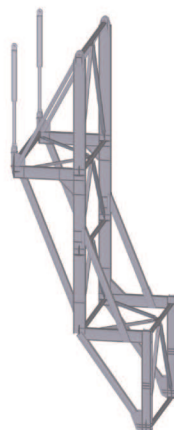
conjunta de Pendurais, Módulos Inferiores e Cofragem, viabilizando o avanço da máquina para os vãos seguintes sem colisão com pilares ou tabuleiro adjacente.

A ligação dos Módulos Inferiores aos Pendurais permite o deslize vertical dos Módulos Inferiores, possibilitando um rápido reposicionamento da Cofragem em função da variação da inclinação transversal do tabuleiro.

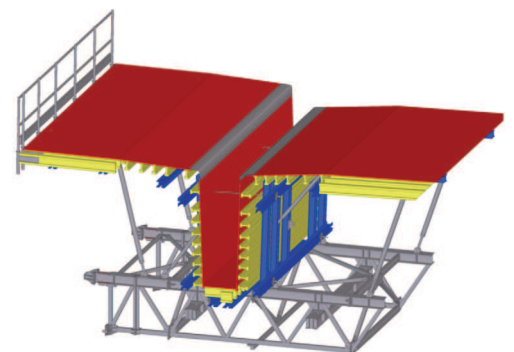
Na Fig. 3.6 é possível observar cada um dos subconjuntos das estruturas transversais.



[Asa]



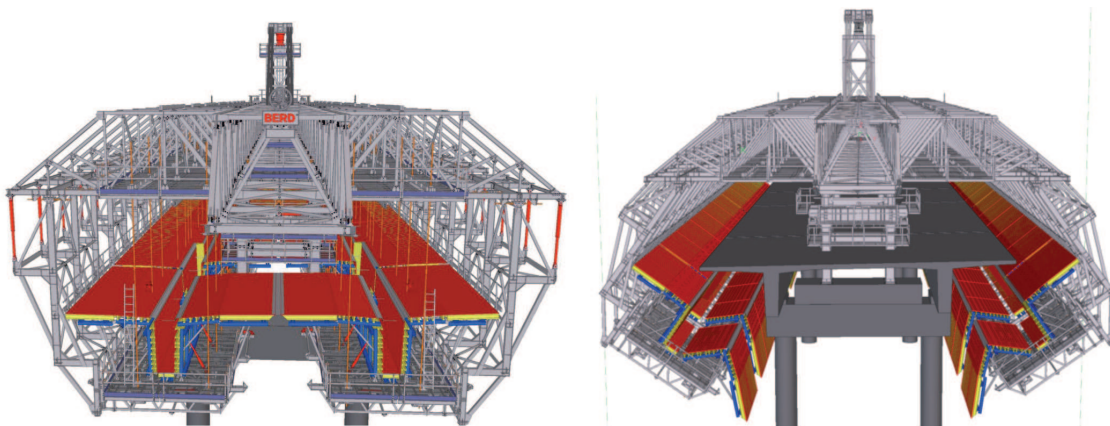
[Pendural]



[Módulo Inferior]

↑ Fig.3.6 Componentes das ET's do M30x2-S.

↓ Fig.3.7 Operação do equipamento.



As ET's apresentam dois esquemas estruturais de funcionamento distintos. Em fase de betonagem 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 (iii), o esquema estrutural de apoio dos módulos inferiores é diferente pois estes encontram-se encastrados nos Pendurais.

Na Fig. 3.7 apresenta-se a geometria das ET's durante a fase de betonagem do tabuleiro e no início da movimentação da máquina para o novo tramo.

3.3. Estruturas de Apoio

As Estruturas de Apoio da Viga Principal são materializadas por conjuntos de Pórticos e Bogies (Fig. 3.8).

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 cembre 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 hiperstáticos induzidos por deslocamentos impostos. Na Fig. 3.9 é possível observar os cilindros de ajuste altimétrico sob os Bogies.

Na fase de movimentação, as cargas verticais da Viga Principal são transmitidas aos Pórticos de Apoio através dos Bogies.

Na fase de betonagem, a Viga Principal está apoiada em 3 alinhamentos. Nos alinhamentos extremos a carga vertical é transmitida aos Pórticos através dos bogies. No alinhamento central, a carga vertical é transmitida ao Pórtico através de cilindros hidráulicos que ligam a Torre diretamente ao Pórtico. Os Pórticos apoiam diretamente sobre as travessas dos pilares.

4. Aspetos de fabrico

4.1. 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.



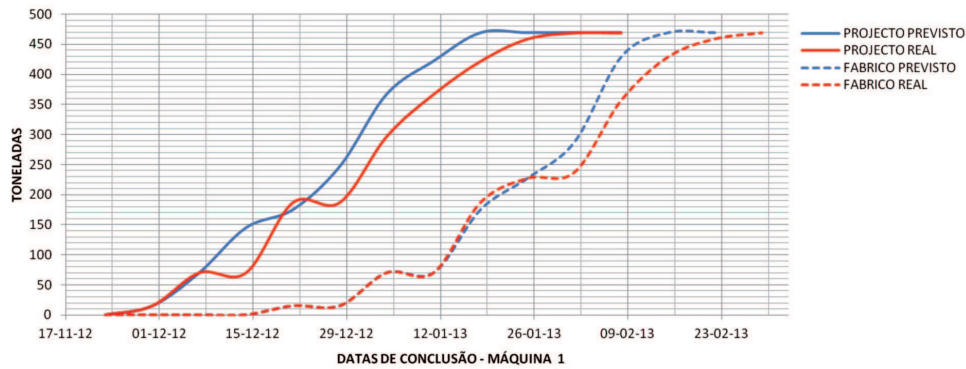
↑ Fig.3.8 Estrutura de Apoio_A.



↑ Fig.3.9 Estrutura de Apoio_B.



↓ Fig.4.1 Diagrama de projeto e fabrico de estrutura metálica.



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.

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 apresenta-se um diagrama do projeto e fabrico de estrutura metálica.

Nas Fig. 4.2, Fig. 4.3 e Fig. 4.4 apresentam-se componentes do equipamento em fase de fabrico.

4.2. 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 cofragem (Fig. 4.5).

↑ Fig.4.2 Torre em fase de fabrico.



↑ Fig.4.3 Módulos de viga em fase de fabrico.

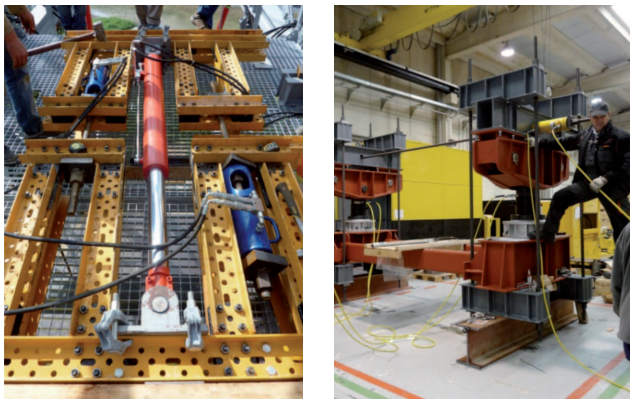


↑ Fig.4.4 Fabrico de uma ligação.

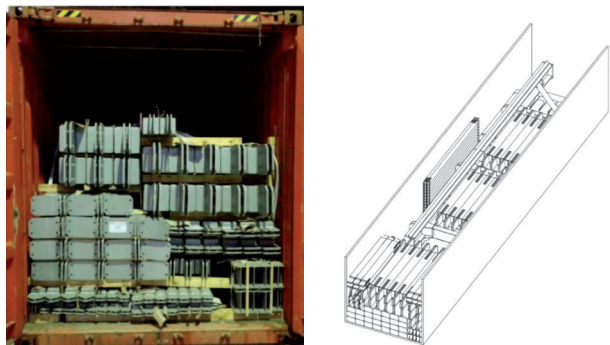
↓ Fig.4.5 Ensaio de cinemática do equipamento.



↓ Fig.4.6 Ensaio aos cilindros hidráulicos.



↓ Fig.4.7 Controlo da contentorização.



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. 4.6).

4.3. 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. Na Fig. 4.7 pode observar-se a contentorização de componentes do equipamento.

Engenharia
BERD, PROTECNA, STRENG

Fabrico de Estrutura Metálica
METALOVIANA

Revisão de Projeto
AdF

5. Arranque das operações

5.1. 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.

5.2. 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:



↑ Fig.5.1 Montagem do equipamento.

↓ Fig.5.2 Abertura das estruturas transversais.



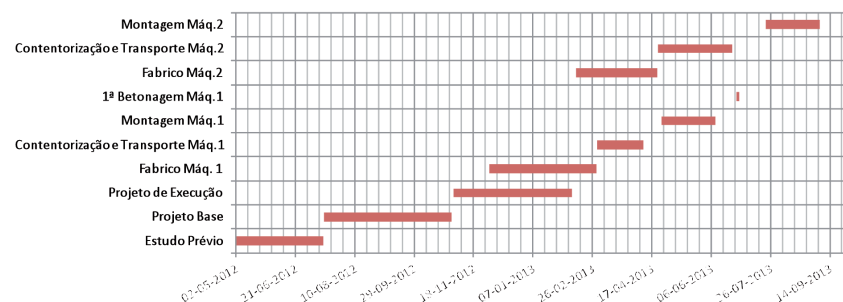
↓ Fig.5.3 Movimentação longitudinal do equipamento.



↓ Fig.5.4 Colocação das armaduras pré-fabricadas.



↓ Fig.6.1 Cronograma dos trabalhos.



- Betonagem
- Pré-esforço do tabuleiro
- Descimbramento
- Abertura das estruturas transversais (Fig. 5.2)
- Ajuste planimétrico do equipamento para movimentação longitudinal
- Movimentação longitudinal para execução do novo tramo (Fig. 5.3)
- Ajuste planimétrico para execução do novo tramo
- Fecho e posicionamento das estruturas transversais
- Afinação da cofragem
- Montagem de armadura ordinária e armadura de pré-esforço do novo tramo

A variação de curvatura em planta e alçado do equipamento para adaptação à geometria do traçado da via é realizada quando a viga principal se encontra sobre duas estruturas de apoio. Esta operação ocorre numa fase intermédia da movimentação longitudinal do equipamento.

Uma particularidade do equipamento M30x2-S é a possibilidade de transportar e posicionar as armaduras de alma (ordinárias e de pré-esforço) das vigas principais

do tabuleiro. Esta característica tem influência direta na rentabilidade dos trabalhos, uma vez que permite a prefabricação destes elementos. Na Fig. 5.4 é possível observar a colocação das armaduras de alma das vigas principais na cofragem.

6. Datas do M30X2-S

O cronograma integral do projeto apresenta-se na Fig. 6.1.

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 Efeitor*. 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.

ASSINATURA ANUAL 36€
4 números



assine a Revista Metálica na nossa loja em **www.cmm.pt**