



ANÁLISE, OTIMIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE UM HANGAR COM 80M DE VÃO E 20M DE ALTURA EM PONTE DE SOR

Hugo Augusto^{a,*}, César Ribeiro^b, David Valério^c e Filipe Gomes^d

^{a,b,c,d} *VISARQENG Architecture & Engineering Solutions Lda em parceria com a Faustino & Ferreira SA*

Resumo. O Hangar está localizado no Aeródromo Municipal de Ponte Sor, tem cerca de 80m de vão livre e 20m de altura, e capacidade para pontes rolantes suspensas na cobertura. Estruturalmente os pórticos materializam arcos de 3 rótulas, afastados entre si de 10m, constituídos por treliças planas de eixo aproximadamente curvo materializados por intermédio de segmentos retos, com 3.0m de altura entre cordas, em perfis SHS nas cordas e diagonais. Para a análise da estrutura e dos detalhes de ligações recorreu-se a elementos finitos de barra e planos, numa análise integrada. Em conclusão, serão inumerados os principais pontos a ter em consideração para abraçar um projeto com uma elevada complexidade de conceção e montagem.

1. Introdução

A ampliação do Aeródromo Municipal de Ponte Sor, mais propriamente do Centro de Negócios da Indústria Aeronáutica / Aeroespacial / 2ª Fase, contempla a construção da torre de informação de voo, dois hangares de dimensão semelhante aos que já existem hoje no aeródromo e um hangar com capacidade para manutenção de aeronaves de grande porte, para a aviação civil, militar ou comercial. É da análise, conceção e otimização desta última estrutura a que este artigo se refere. O desafio prendia-se sobretudo com a necessidade de o hangar possuir cerca de 80m de vão livre e 20m de altura, para albergar aeronaves de médio e grande porte. Adicionalmente, para permitir a manutenção das aeronaves, o edifício tinha ainda que estar preparado suportar pontes rolantes suspensas na cobertura. Devido a ser o terceiro hangar a ser executado nesta empreitada foi designado por Hangar C.

O edifício é constituído por uma zona de escritórios de planta retangular, com cerca de 80x15m², ocupando toda a largura do alçado posterior, com 10m de altura. A zona de escritórios

possui R/C, 1º piso e cobertura acessível. O edifício de escritórios serve ainda de suporte a três dos pórticos do hangar, com 45m de vão, que se elevam cerca de 10m acima da cobertura dos escritórios. A restante área é dedicada à nave que apresenta uma cobertura em forma de arco até às fachadas, vencendo os 80m de vão livre. Na empenna, oposta aos escritórios, existe um grande portão, para o acesso das aeronaves, de forma retangular, cuja estrutura se eleva acima da cobertura da nave, nas zonas do arco mais baixas. Os modelos virtuais realizados pela arquitetura, Fig. 1, ilustram a integração das duas zonas do edifício, assim como a zona do portão.



Fig. 1: Modelo virtual da arquitetura do Hangar C.

Convém referir que a estrutura adotada para o edifício resultou de um estudo técnico que visava tornar a solução original, constituída por dupla treliça por pórtico ligada por travessas, em concordâncias curvas, e os respetivos detalhes de ligações, mais adaptados ao processo de preparação e execução de estrutura metálica do construtor. Nomeadamente: minimizar os difíceis acessos para soldadura, decapagem, pintura e proteção ao fogo, que a solução de dupla treliça paralela, cujas faces interiores das cordas distavam apenas cerca de 0.3m, em cada pórtico traziam para o fabrico e para eventuais operações de manutenção futuras. Evitar calandragens de difícil execução transformando as concordâncias em arco em segmentos de reta. Pretendia-se ainda, no que respeita à montagem, minimizar riscos das operações de pré-montagem e elevação. E ainda fazer uma análise integrada à necessidade de proteção ao fogo, para garantir solução de proteção com tinta intumescente para os elementos da estrutura para o requisito R90, através da quantificação de temperaturas críticas, tendo em conta a curva de incêndio padrão.

Para a análise da estrutura e dos detalhes de ligações recorreu-se a modelos de elementos finitos de barra e planos, numa análise integrada.

A conceção, análise e dimensionamento das ligações dos elementos da estrutura metálica, e da estrutura metálica ao betão armado, tem um papel fundamental na estrutura, para permitir a divisão da estrutura em peças compatíveis com o transporte e montagem, assim como permitir idealizar as condições de projeto dos vários elementos que constituem a estrutura, no que concerne à transmissão de esforços e aos graus de liberdade considerados. Neste caso particular,

devido à utilização de secções tubulares, foi necessário recorrer a modelos detalhados de elementos finitos de placa, para permitir a análise mais rigorosa dos nós e garantir a otimização dos elementos envolvidos, assim como a correta transmissão de esforços e evitar instabilidades globais ou locais.

Serão abordadas as várias fases e dificuldades inerentes à conceção, dimensionamento, detalhe, preparação, fabrico e montagem, numa vertente técnica da engenharia envolvida.

No final, e em jeito de balanço e conclusão, serão inumerados os principais pontos a ter em consideração para abraçar um projeto com uma elevada complexidade de conceção e montagem com os vários níveis de detalhe associados.

2. Conceção, modelação e hipóteses de cálculo mais relevantes

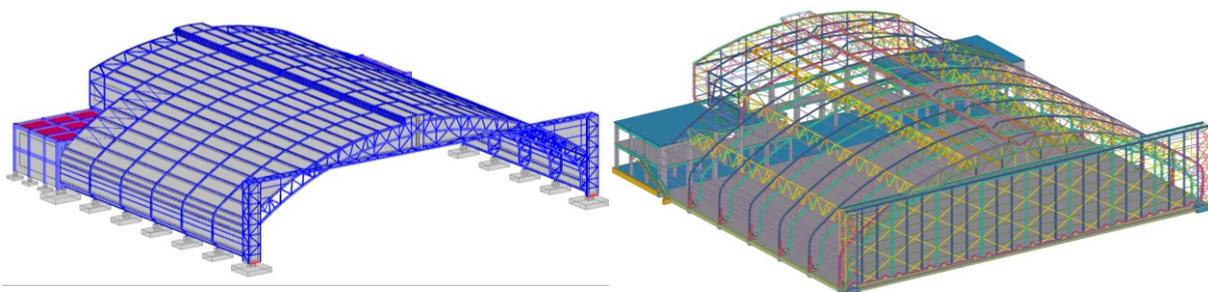
As principais hipóteses de cálculo, aqui definidas, de forma sucinta, foram definidas tendo em conta a localização, altitude, orografia do local, a zona sísmica e a categoria de risco em termos de incêndio, com o intuito de balizar as ações, os requisitos funcionais e de segurança no dimensionamento dos elementos estruturais.

Em todas as estruturas foram usados os Eurocódigos, e respetivos Anexos Nacionais, e a regulamentação nacional aplicável ou bibliografia da especialidade, para a definição das ações, dimensionamento e requisitos dos vários estados limites.

Conforme referido o Hangar C é constituído por uma zona de escritórios, com vãos moderados, materializada em betão armado e uma zona de nave, com grandes vãos, materializada em estrutura metálica. A estrutura dos escritórios é constituída por pórticos regulares de betão armado e fundações diretas. O edifício de escritórios serve ainda de apoio a parte da nave do hangar, os 45m centrais, que se elevam cerca de 10m acima da cobertura dos escritórios. A restante nave é constituída por arcos de 3 rótulas, nas ligações às fundações diretas e a meio vão. As articulações são materializadas por cavilhas com 100mm de diâmetro. Os pórticos vencem cerca de 80m de vão, têm uma altura de 20m e estão afastados de 10m. Os pórticos são constituídos por treliças planas de eixo aproximadamente curvo materializado por intermédio de segmentos retos, com 3.0m de altura, em perfis SHS nas cordas e diagonais. A estabilidade às ações horizontais na direção perpendicular à dos pórticos, é garantida por intermédio de um sistema de contraventamentos horizontais e verticais formados por secções tubulares SHSC.

O modelo de cálculo global adotado para o dimensionamento da estrutura, é um modelo de elementos finitos de barras, para os elementos lineares dos pilares, vigas e treliças, e placas para as lajes de betão armado. O modelo adotado pode ser visto na Fig. 2 a).

Após o dimensionamento e detalhe das ligações a estrutura foi modelada tridimensionalmente, ver Fig. 2b), com o intuito de preparar a estrutura para fabrico, montagem e compatibilizar a estrutura com os vários requisitos estruturais, arquitetónicos e técnicos.



a) Modelo de cálculo integrado da estrutura e fundações b) Modelo 3D para preparação das operações de fabrico e montagem e integração BIM

Fig. 2: Modelos de cálculo e de preparação do Hangar C.

Convém referir que a o edifício está preparado para a suspensão de pontes rolantes na cobertura da nave para a manutenção das aeronaves, conforme ilustrado na Fig. 3.

Devido à existência do portão de grandes dimensões foram consideradas duas hipóteses para a aferição das pressões de vento. Uma situação corrente, considerando o portão fechado e uma situação acidental com o portão aberto. Originando, desta forma, diferentes coeficientes de pressão interna e combinações de ações.

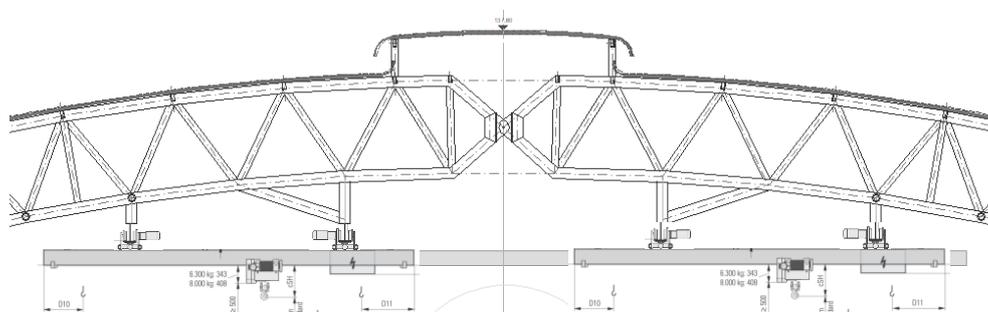


Fig. 3: Vista em corte do sistema previsto no cálculo das pontes rolantes

Em termos de ação sísmica, o edifício está localizado numa zona sísmica moderada. A ação sísmica não costuma ser relevante em naves industriais, devido à sua reduzida massa. No entanto, neste caso, a ação sísmica foi incluída devido à existência do edifício de escritórios em betão armado, mas também para analisar a estrutura da nave devido ao elevado vão dos pórticos, onde a ação vertical poderia ser relevante. Adicionalmente, a ação sísmica poderia ser ainda relevante para o dimensionamento dos sistemas de contraventamentos, que concentram a massa proveniente de vários pórticos em zonas localizadas.

3. Análise e dimensionamento

3.1 Análise global da estrutura metálica

Em termos de análise, a estrutura metálica foi dividida em cinco tipos de pórticos distintos, consoante a localização no edifício. Na Fig. 4 estão representados três pórticos tipo interiores: pórtico corrente da nave com 78.25m de vão, representativo dos pórticos entre os escritórios e o grande portão; um pórtico de transição entre a nave e os escritórios; e o pórtico corrente que apoia na estrutura de betão dos escritórios.

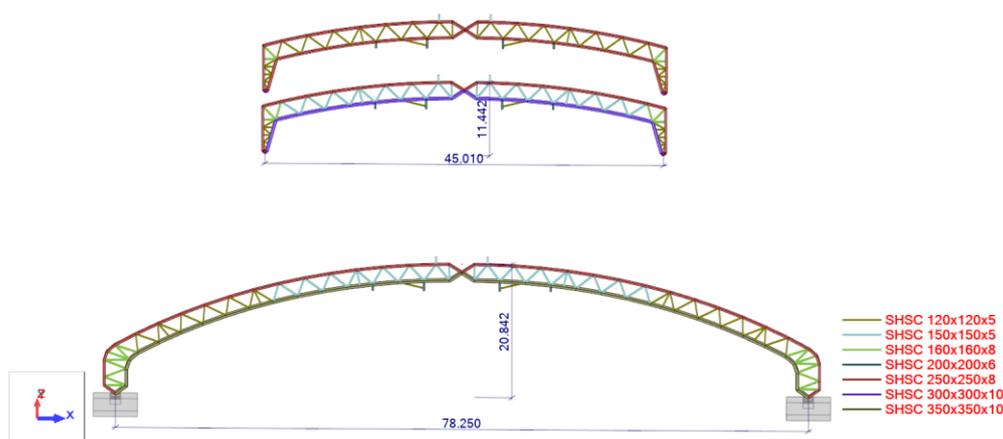


Fig. 4: Pórticos tipo do interior do edifício

Adicionalmente, foram considerados dois pórticos nas empenas do edifício: o pórtico do portão, que é constituído por uma treliça, semelhante à do pórtico corrente integrada com a estrutura de suporte do grande portão que se desenvolve até 2m à frente da treliça. E o pórtico plano da empena do lado dos escritórios, que é constituído por pilares e vigas em IPE, ver Fig. 5.

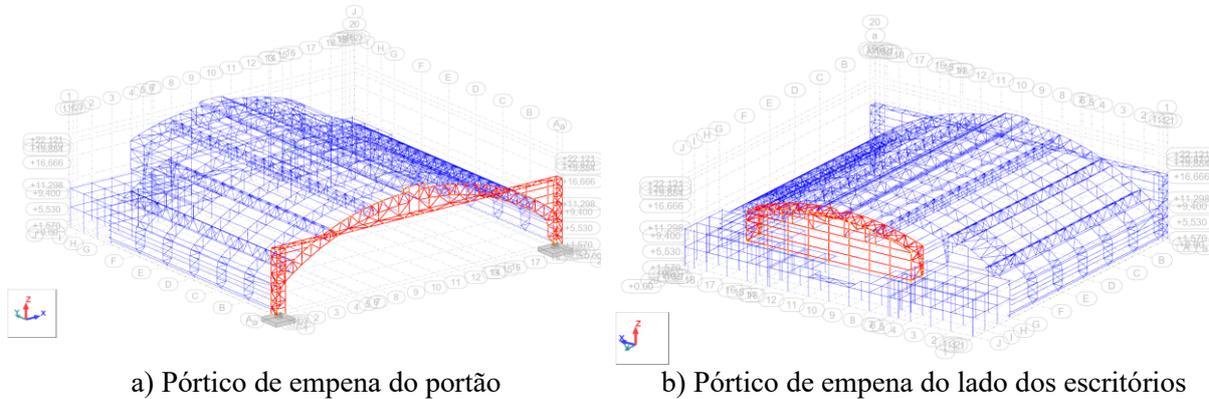


Fig. 5: Pórticos das empenas do edifício

Dadas as condições geométricas do edifício, torna-se especialmente relevante a realização de uma análise que inclua os efeitos de segunda ordem, pelo que na análise dos pórticos principais do edifício foi realizada uma análise não linear P- Δ (global).

A análise e dimensionamento da estrutura foi realizada através do software *Autodesk Robot Structural Analysis* [1], que permite a realização de análises lineares ou não-lineares geométricas por modelos de barras ou placas utilizando o método dos elementos finitos (MEF).

No sentido perpendicular aos pórticos foram consideradas madres de cobertura e fachada, para suporte do sistema de revestimento (em perfis tubulares RHS), que sendo rotuladas nas suas extremidades, vencem vãos de 10m entre pórticos e trabalham entre as cordas superiores das treliças que constituem os pórticos, conferindo-lhes travamento à instabilização fora do plano do pórtico, o que possibilita a obtenção de secções mais esbeltas, comparativamente à secção da corda inferior. Adicionalmente, foram consideradas treliças tridimensionais, para estabilização das cordas inferiores das treliças dos pórticos principais e conferir rigidez à estrutura na direção perpendicular aos pórticos, como se pode ver na Fig. 6.

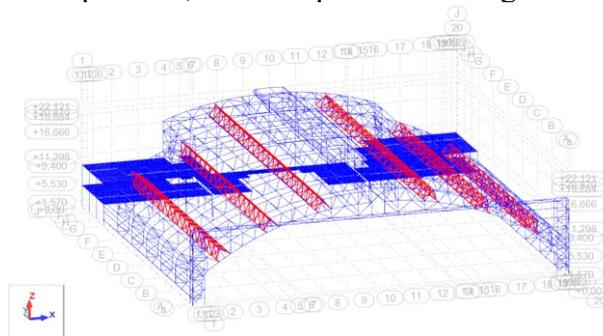


Fig. 6: Treliças de travamento transversais

Na Fig. 7 podem ser vistas grande parte dos elementos que constituem a estrutura do Hangar C, durante a sua montagem. Nomeadamente, o edifício dos escritórios, o pórtico de empena, os pórticos principais em treliça, assim como as madres e algumas treliças transversais. Entre os pórticos de empena e os pórticos subsequentes foram previstas linhas de contraventamentos em treliças constituídas por diagonais em SHS, considerando as madres como montantes e para as

cordas os próprios pórticos principais. Este sistema de contraventamento conduz os esforços diretamente para a estrutura de betão dos escritórios ou para as fundações.



Fig. 7: Vista parcial da estrutura do Hangar C durante a sua montagem

A segurança dos elementos, quer metálicos quer de betão, é verificada tendo em conta os requisitos da EN1998-1 [2], para a ação sísmica, tendo sido realizada uma análise conjunta da estrutura metálica e da estrutura de betão, para uma análise mais realista do comportamento da estrutura (período/frequência). Também a segurança dos elementos de fundação em betão armado é verificada tendo em consideração todas as exigências regulamentares das EN1997-1 [3] e EN1992-1-1 [4] no que se refere quer aos Estados Limites Últimos quer para os Estados Limites de Serviço, tendo por base as conclusões do relatório geotécnico fornecido.

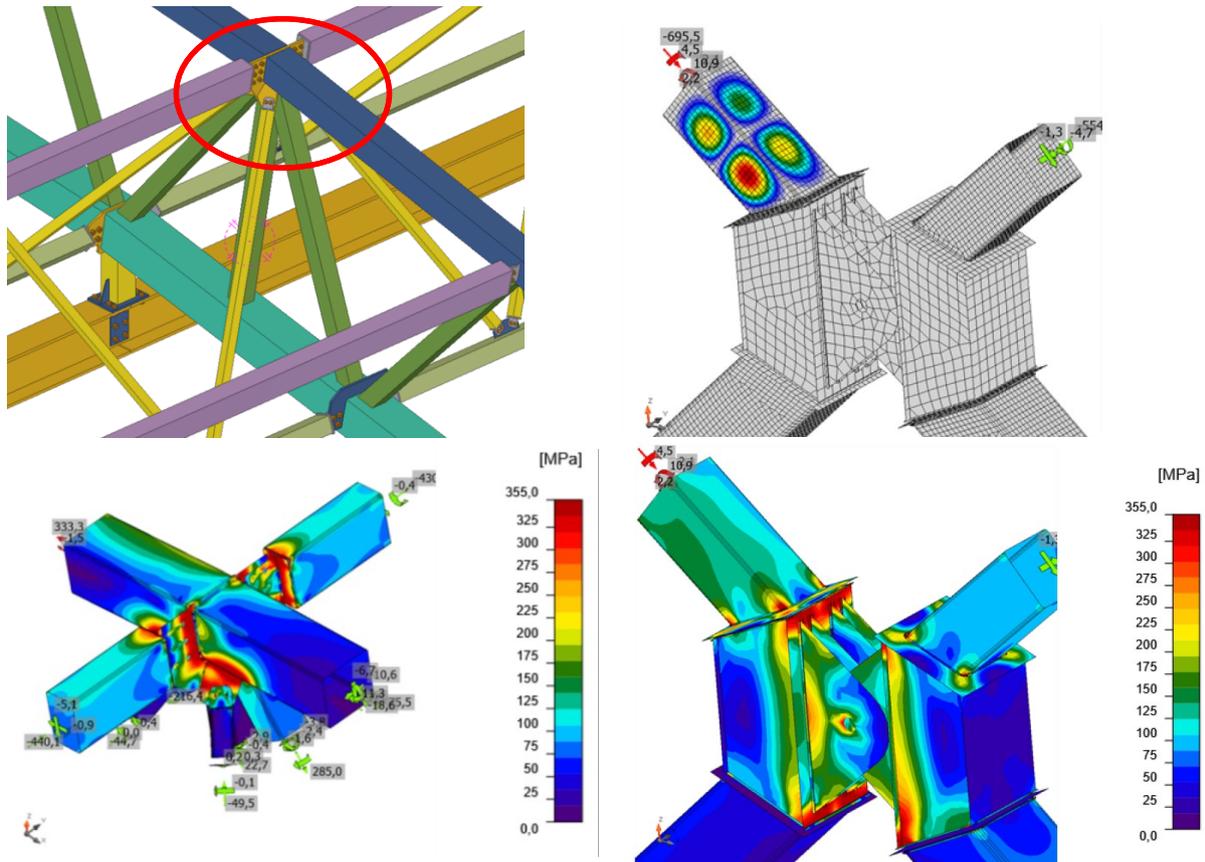
3.2 Detalhes estruturais e ligações

Após o dimensionamento da estrutura, realizado em modelos lineares de barras, traduzidas pelos eixos das peças, é necessário proceder à materialização e verificação do detalhe de ligações, e interligação dos elementos que constituem a estrutura. Pretende-se seccionar a estrutura em peças compatíveis com o transporte e montagem, assim como permitir idealizar as condições de projeto dos vários elementos que constituem a estrutura, respeitando [5]:

1. A arquitetura, deverão estar enquadrados com os conceitos de conceção, e serem proporcionais às solicitações e restante estrutura;
2. As condições da sua análise e dimensionamento, ou seja, capacidade de transferência dos esforços, idealização de articulações e rigidez adequada, compatível com as deformações consideradas, ver algumas dessas análises na Fig.8;
3. Os requisitos funcionais, não podendo interferir nem os vãos livres definidos para as operações do hangar, os requisitos funcionais das pontes rolantes e equipamentos do portão ou os requisitos dos revestimentos.

Devido à complexidade acrescida de alguns nós, própria de ligações entre elementos tubulares, e da necessidade de otimizar o consumo de material e os processos de fabrico, tais como a soldadura, a análise e dimensionamento das ligações foi realizada com auxílio do Software *IDEA StatiCa* [6], que através de uma análise de elementos finitos integrada com os requisitos regulamentares presentes na EN1993-1-8 [7] permite verificar, de uma forma detalhada, a resistência das ligações e realizar análises complexas material e geometricamente não lineares,

assim como aferir a rigidez axial e rotacional das ligações, garantindo a integridade dos nós das treliças e das ligações.



a) Modelação e análise de nó onde concorrem madres e diagonais das treliças princ. e secundárias b) Análise de tensões e instabilidade da ligação cavilhada a meio vão dos pórticos principais

Fig. 8: Análise e dimensionamento de ligações metálicas

Houve ainda que ter em conta a preocupação de compatibilização da estrutura metálica com a estrutura de betão armado dos escritórios, como se pode ver no detalhe da Fig. 9, onde as armaduras foram compatibilizadas com o chumbadouro e o “shear key” da chapa base.

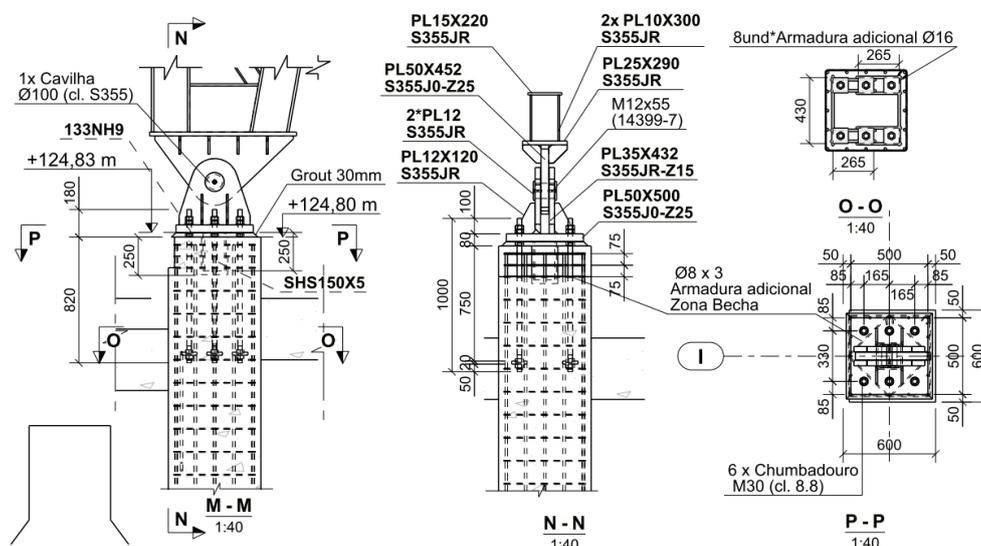


Fig. 9: Detalhe de ligação e compatibilização da base dos pórticos a um pilar de betão armado

4. Fabrico e montagem

O desenvolvimento e otimização das soluções e a respetiva construção fazem parte da parceria Faustino & Ferreira S.A (fabrico) e VisArqEng Architecture & Engineering Solutions Lda (gabinete de projeto associado). Baseado nas premissas enunciadas em [5] e [8] com as considerações a ter em conta durante a conceção e o dimensionamento, foram delineadas as operações de fabrico e montagem.

Devido às dimensões das peças envolvidas, principalmente da estrutura metálica da nave, houve necessidade de subdividir as treliças em peças compatíveis com o transporte. E, conseqüentemente, realizar pré-montagem no solo, recorrendo à soldadura das cordas e diagonais em obra, ver exemplo de desenho conjunto dos módulos a soldar na Fig. 10. Soldaduras essas realizadas em estações próprias e em ambiente devidamente controlado. Na Fig. 11 podem ser observados alguns elementos em fabrico com elevado grau de complexidade, no entanto adaptados e otimizados para os processos disponíveis em fábrica e em obra.

Quanto à montagem da estrutura metálica foram realizados vários estudos prévios para definir, juntamente com a equipa responsável pela direção de obra, e face aos meios disponíveis, quais as formas mais adequadas e seguras para realizar a operação. Uma vez que as meias treliças são assembladas na horizontal, existiu necessidade de avaliar os pontos de elevação necessários para a verticalização da treliça, por forma a minimizar quer as deformações quer as tensões nos elementos.

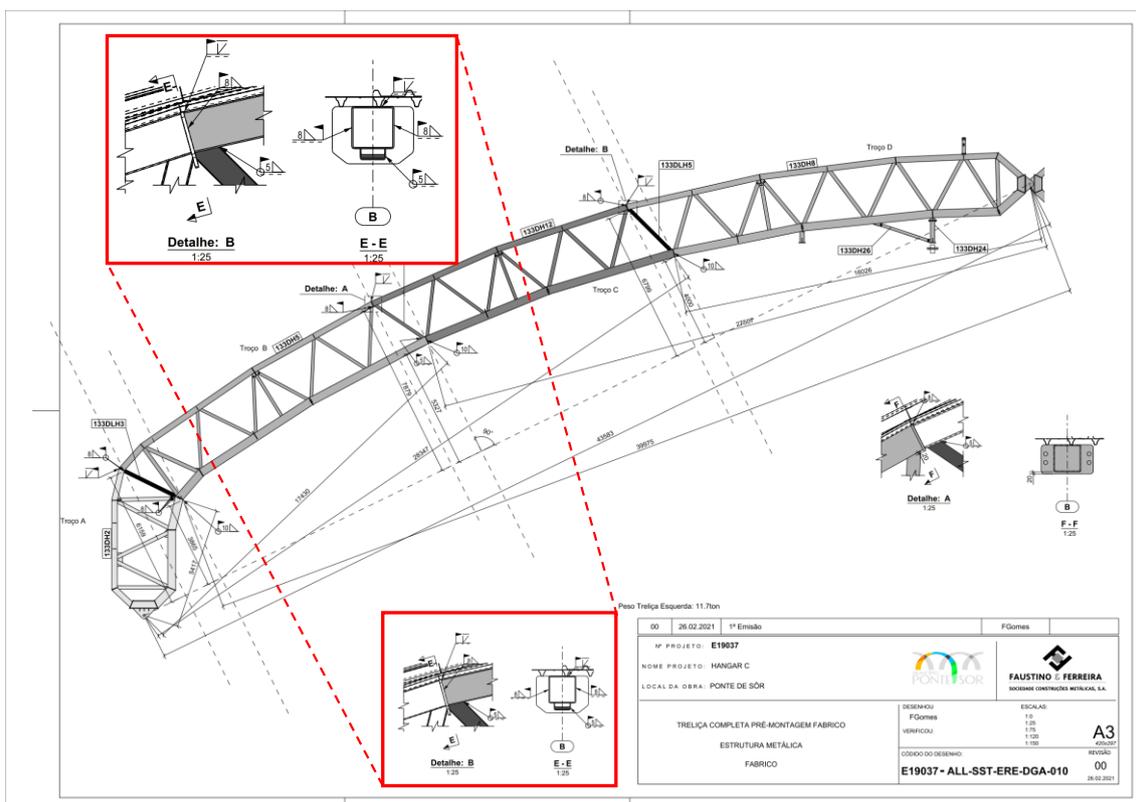


Fig. 10: Exemplo de desenho de conjunto das partições de meio pórtico e os respetivos detalhes de soldadura em obra

Na Fig. 12 são mostradas algumas imagens do processo de montagem do Hangar C, ainda em desenvolvimento a quando da redação deste artigo, como tal não foi possível incluir imagens da estrutura completamente montada.

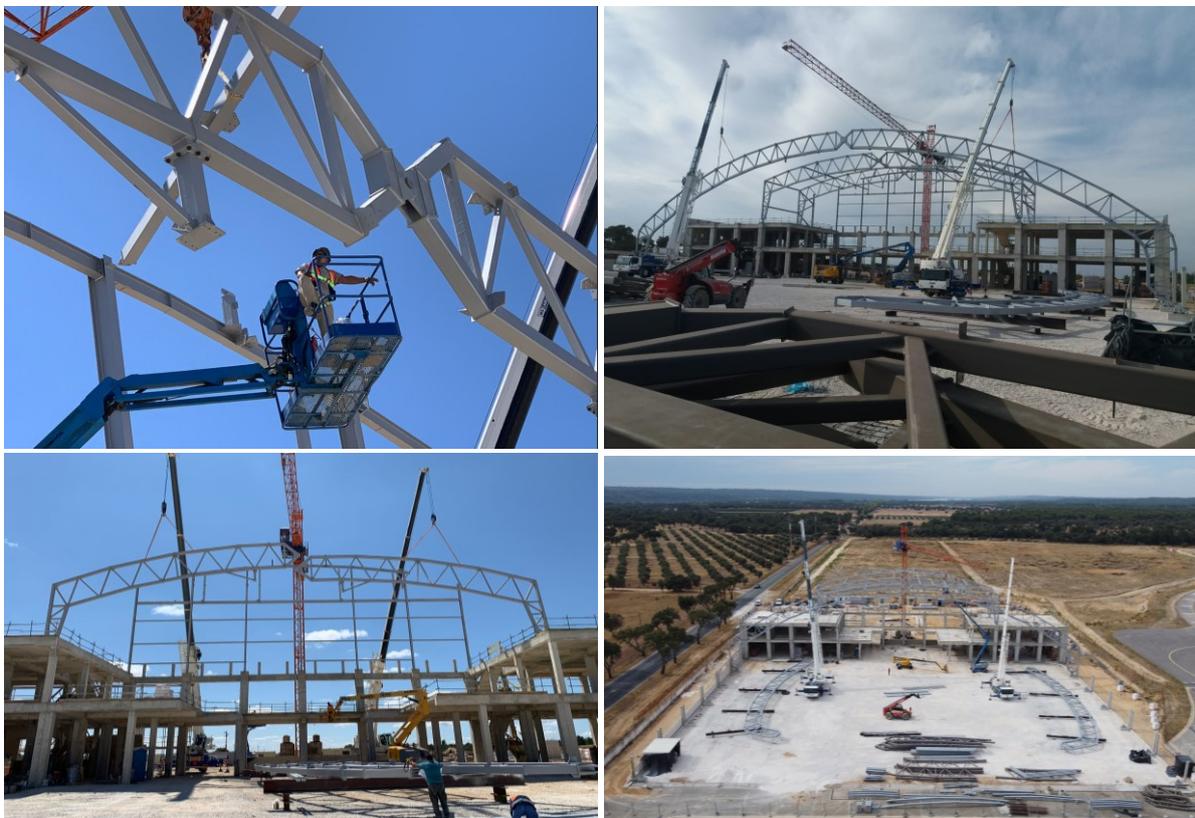


a) Armazém e preparação de segmento de treliça e transporte

b) Armazém e soldadura de chapa de ligação

c) Cabine de soldadura em obra das treliças principais pré montadas no solo

Fig. 11: Operações de fabrico



a) Operação de montagem dos primeiros pórticos

b) Montagem dos pórticos com 80m de vão

Fig. 12: Operações de montagem

5. Principais conclusões

A análise, otimização e dimensionamento da estrutura de um hangar com 80m de vão e 20m de altura em ponte de sor, levado a cabo pela equipa de projeto e preparação, e em estreita colaboração com as equipas de fabrico e montagem, representou um desafio e uma oportunidade de colocação em prática da capacidade técnica das equipas envolvidas.

Em jeito de conclusão, enumeram-se de seguida, os principais fatores a ter em conta em projetos complexos:

1. A conceção e dimensionamento de estruturas em edifícios é muitas vezes condicionada pela necessidade de otimização da estrutura e recursos;
2. A integração e interação entre vários esquemas estruturais, materiais e requisitos funcionais dos edifícios e de equipamentos específicos, requer uma grande envolvimento e exige capacidade de idealizar soluções compatíveis;
3. Existem múltiplas ferramentas capazes de ajudar nas tarefas de análise, dimensionamento, detalhe e compatibilização → tecnologia BIM e integração com softwares de cálculo e modelação, que permitem ter uma visão mais detalhada das soluções adotadas, e uma integração dos elementos envolvidos;
4. A utilização de modelos avançados permitiu a otimização da estrutura metálica e dos detalhes dos nós e ligações;
5. É importante ter em consideração na fase de conceção as limitações existentes em obra nomeadamente os meios de elevação, acessos e possibilidade de colocação de estruturas de apoio temporárias;
6. A integração com as várias equipas técnicas envolvidas é fundamental para o correto funcionamento, como por exemplo a integração com a equipa da mecânica dos mecanismos do grande portão.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a colaboração e apoio da Faustino e Ferreira Sociedade Construções Metálicas, S.A. e às respetivas equipas envolvidas: Ricardo Faustino, Élio Simões, Bruno Silva, Luis Pedrosa, Tiago Ferreira e demais envolvidos neste projeto.

Referências

- [1] Robot Structural Analysis Professional 2018. *Software*. São Rafael, Califórnia, USA: Autodesk, Inc.
- [2] EN 1998-1. *Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos – parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2010.
- [3] EN 1997-1. *Eurocódigo 7: Projeto geotécnico – parte 1: Regras gerais*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2010.
- [4] EN 1992-1-1. *Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de betão – parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2010.
- [5] Augusto H, Ribeiro C, Valério D, Ferreira T, Pereira M, Gomes F. “Desafios na conceção da claraboia metálica móvel do novo campus SBE da universidade nova em cascais”, *Proceedings of the XII Congresso de Construção Metálica e Mista* (Eds.: L. Simões da Silva, P. Vila Real, J.O. Pedro, L. Laím), Coimbra, Portugal, 215-224, 2019.
- [6] Idea Statica. *Software*. Sumavska, Czech Republic: <https://www.ideastatica.com/>.
- [7] EN 1993-1-8. *Eurocódigo 3: Projeto de estruturas de aço – parte 1-8: Projeto de ligações*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2010.
- [8] Augusto H, Ribeiro C, Valério D, Ferreira T, Pereira M e Gomes F. “Expansion of Créteil Soleil shopping centre in Paris: design and construction of steel and composite structures”. *ce/papers*, 3: 63-72, 2019. <https://doi.org/10.1002/cepa.1182>