



## PROJETO E PREPARAÇÃO DA ESTRUTURA METÁLICA E MISTA DO CAMPUS ENGIE

David Valério<sup>a</sup>, César Ribeiro<sup>b</sup>, André Sampaio<sup>c</sup>, Filipe Gomes<sup>d</sup> e Gustavo Amaral<sup>e</sup>

<sup>a,b,c,d,e</sup> VISARQENG Architecture & Engineering Solutions Lda em parceria com a Faustino & Ferreira SA

**Resumo.** A nova sede da Engie SA é um exemplo do caminho da descarbonização na indústria da construção. Situado em Paris, o Campus Engie é constituído por 4 edifícios, dispostos em torno da estrutura do “Coeur” cuja cobertura integra um terraço ajardinado notável pela sua biodiversidade. Além das estruturas metálicas nos edifícios, destaca-se a cobertura do “Coeur”, com vigas em perfil reconstituído soldado (PRS) e treliças que apoiam o vigeamento secundário em vãos até 20m. A análise integrada das estruturas e o detalhe das ligações recorre a elementos finitos de barra e planos. Recorre-se ao BIM (Building Information Modeling) para coordenação de especialidades. Serão abordados os desafios de projeto, preparação, fabrico e montagem.

### 1. Introdução

A sede Engie SA, instalada num edifício em altura na zona financeira de La Defense, Paris, será mobilizada para um novo Campus, constituído por 4 edifícios com um máximo de 7 pisos em altura, interligados por um espaço exterior verde, o qual pretende ser um local de encontro aberto aos funcionários e à comunidade em geral. A funcionalidade dos espaços é amplamente alargada, pois além dos escritórios (~ 78.100 m<sup>2</sup>), o Campus apresenta diversas instalações, tais como ginásio (~ 2.200 m<sup>2</sup>), creche (~ 970 m<sup>2</sup>) e espaços para auditórios, salas de conferencia e comércio (~ 6.800 m<sup>2</sup>). O conceito de verticalidade da anterior sede contrasta com o novo conceito de horizontalidade. É, portanto, um novo paradigma de sustentabilidade, no qual a indústria da construção procura alinhar-se com o objetivo, estabelecido no Acordo de Paris, da neutralidade climática.

O novo Campus Engie é erguido nos antigos terrenos da PSA Peugeot Citroen, no bairro La Garenne – Colombes, em Paris, e apresenta uma superfície de terreno cerca de 36.000 m<sup>2</sup> e uma

área total de construção aproximada de 94.000 m<sup>2</sup>. Quando estiver concluído, reunirá até cerca de 6.300 postos de trabalho.



**Fig. 1:** Modelo virtual da arquitetura do Campus Engie (fonte: projeto de arquitetura [1]).

O enquadramento do Campus Engie na malha urbana da cidade pode ser visto na Fig. 2.



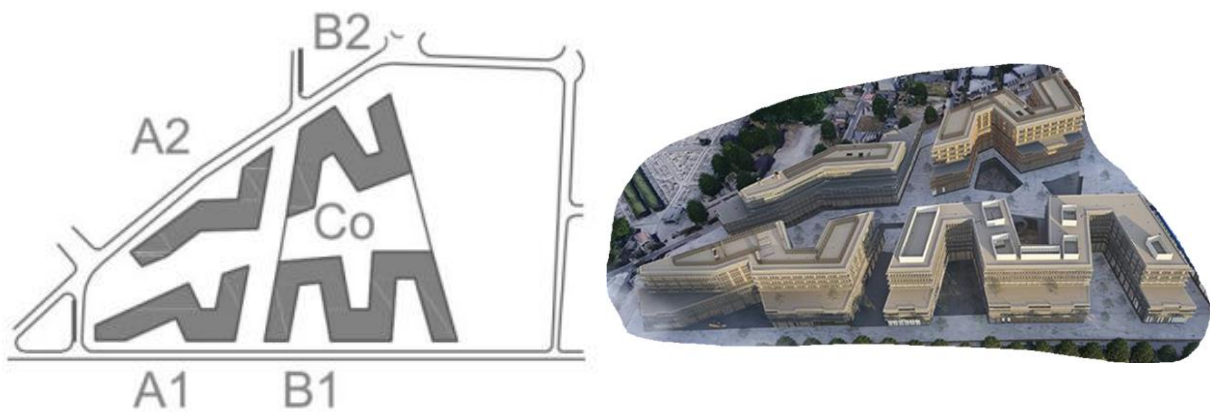
**Fig. 2:** Enquadramento do Campus Engie (fonte: adaptado de projeto de arquitetura [1]).

Os edifícios A1, B1 e B2 apresentam 7 pisos acima do solo (RDC a R+7) e dois níveis de cave (S2 e S1). O edifício A2 apresenta 6 pisos acima do solo (RDC a R+6) e dois níveis de cave (S2 e S1).

Estruturalmente, os 4 edifícios são compostos por fundações, pilares, vigas, paredes, núcleos rígidos e lajes de betão armado. Do piso R+1 ao piso R+3, existem situações particulares de grandes vãos, onde é necessário recorrer a vigas metálicas para dar apoio às lajes e aos pilares de betão armado, bem como aos pilares de madeira. Do piso R+4 ao último piso, os pilares, as vigas e as lajes são maioritariamente constituídos por elementos estruturais metálicos e de madeira. As coberturas dos edifícios são compostas por vigas metálicas e vigas mistas (aço-betão) que suportam lajes mistas colaborantes. As áreas técnicas das coberturas são igualmente realizadas através de estrutura metálica.

Os elementos estruturais do edifício do “Coeur” são realizados em betão armado, sendo que cobertura, situada ao nível do piso térreo dos edifícios envolventes, é constituída por vigas metálicas e vigas mistas onde se apoiam lajes mistas com espessuras até 220 mm. As vigas metálicas apoiam-se nos pilares e nas paredes periféricas de betão armado. Nas zonas dos auditórios, a cobertura eleva-se acima do piso térreo, formando dois triângulos sobrelevados lateralmente. Nestas zonas sobrelevadas, a estrutura é suportada por pilares metálicos tubulares que se encontram dispostos na fachada. Nas zonas de maiores vãos - até 20m - a cobertura do “Coeur” apresenta vigas de alma cheia em PRS e em treliça.

O enquadramento dos edifícios pode ser visto na Fig. 3.



a) Identificação esquemática dos edifícios

b) Vista de Render de Arquitetura

**Fig. 3:** Disposição dos edifícios estudados (fonte: projeto de arquitetura).



**Fig. 4:** Corte de arquitetura (fonte: projeto de arquitetura [1]).

Foram vários os desafios na análise e dimensionamento da estrutura, desde a necessária compatibilização com todas as especialidades, aos requisitos de resistência e de serviço, como os limites de deformação e de conforto vibratório dos pisos.

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

No final, em jeito de conclusão, serão inumerados os principais pontos a ter em consideração para participar num projeto multidisciplinar, com uma elevada complexidade e com a necessidade de interação e compatibilização constante entre os diversos intervenientes.

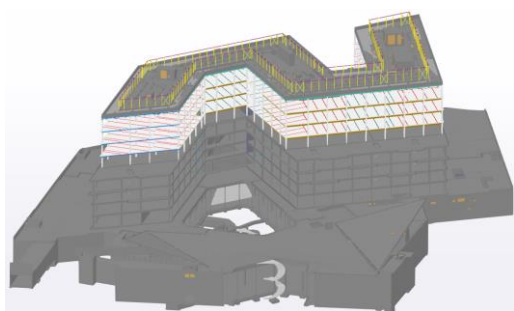
## 2. Conceção, modelação e hipóteses de cálculo mais relevantes

A conceção de uma estrutura deve garantir, de uma forma eficiente, a resistência da estrutura às ações a que está sujeita, bem satisfazer os critérios de conforto e operacionalidade da mesma. No caso particular aqui em estudo, à semelhança de outros processos realizados em França, a conceção respeitou os princípios definidos pelo estudo prévio, bem como a arquitetura e os requisitos funcionais, regulamentares ou específicos.

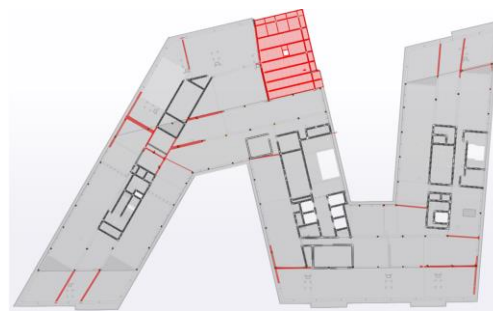
As principais hipóteses de cálculo, aqui são enunciadas de forma breve, foram definidas para cada um dos edifícios estudados. Os Eurocódigos e respetivos Anexos Nacionais franceses, foram considerados para a definição das ações, bem como para estabelecer os critérios de veri-

ficação dos vários estados limites últimos e de serviço. Relativamente à proteção ao fogo, adotam-se meios de proteção passiva, quer por intermédio de tintas intumescentes, quer através de argamassa projetada, em função das exigências arquitetónicas de cada zona. Cada edifício apresenta um zonamento dos requisitos de resistência ao fogo (em geral, nas zonas estudadas, é R60) que, cruzado com a análise de temperaturas críticas dos perfis, permite obter a quantidade de proteção requerida.

A estrutura metálica dos edifícios A1, A2, B1 e B2, até ao piso R+3, é constituída essencialmente por vigas metálicas isostáticas que, pontualmente, substituem as vigas de betão nas zonas de maior vão, quando por compatibilização com as restantes especialidades, exista a necessidade de reduzir a altura das vigas. Em alguns casos, de forma a respeitar o pé direito, e a evolução da arquitetura, vigas inicialmente previstas com perfis comerciais são substituídas por PRSs. As vigas metálicas são suportadas na estrutura de betão armado (vigas, pilares e paredes). É sobretudo no piso R+3, devido ao arranque de múltiplos pilares de madeira desalinhados com os pilares de betão, que se verifica a maior necessidade de prever vigas metálicas. A título de exemplo, podem-se observar na Fig. 5, a vermelho, as vigas metálicas introduzidas no piso R+3 do edifício B2. Este piso apresenta a particularidade de possuir um terraço realizado por intermédio de laje mista colaborante, na qual se apoia a fachada envidraçada da zona do Hall.



a) Modelo 3D para preparação da estrutura



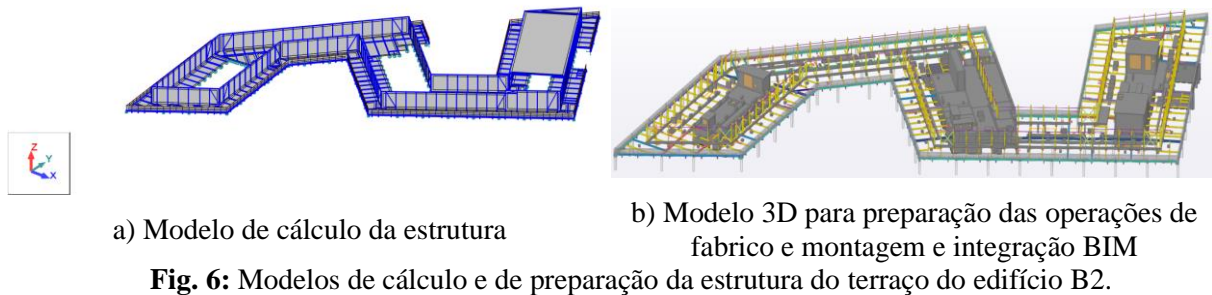
b) Vista em planta do Modelo 3D – piso R+3

**Fig. 5:** Edifício B2.

As ações a ter em consideração nos pisos dos edifícios A1, A2, B1 e B2 são, genericamente, ações correntes dependentes da utilização dos pisos. A maioria das zonas onde se adotam vigas metálicas, são destinadas a escritórios. Às cargas distribuídas no piso, acrescem as reações da base dos pilares que se apoiam nas vigas metálicas. Nos terraços ajardinados, há ainda que considerar a ação do peso das terras.

A cobertura dos edifícios A1, A2, B1 e B2 constitui um terraço técnico, composto por vigas metálicas e mistas de secção do tipo IPE, HEA e HEB, que suportam uma laje mista colaborante. As vigas apoiam-se nos pilares de madeira e nos elementos do núcleo rígido de betão armado. Na periferia de toda a cobertura, existe a viga de bordadura que dá suporte ao revestimento de fachada, bem como ao equipamento para a manutenção da mesma. Verticalmente, a viga de bordadura apoia-se nos pilares de madeira, sendo esta travada horizontalmente pelo diafragma da laje. As vigas secundárias são perpendiculares e rigidamente ligadas à viga de bordadura. Deste modo, os efeitos de torção, gerados devido à excentricidade das cargas de fachada, são absorvidos por flexão das vigas secundárias, aliviando os esforços de torção na viga de bordadura.

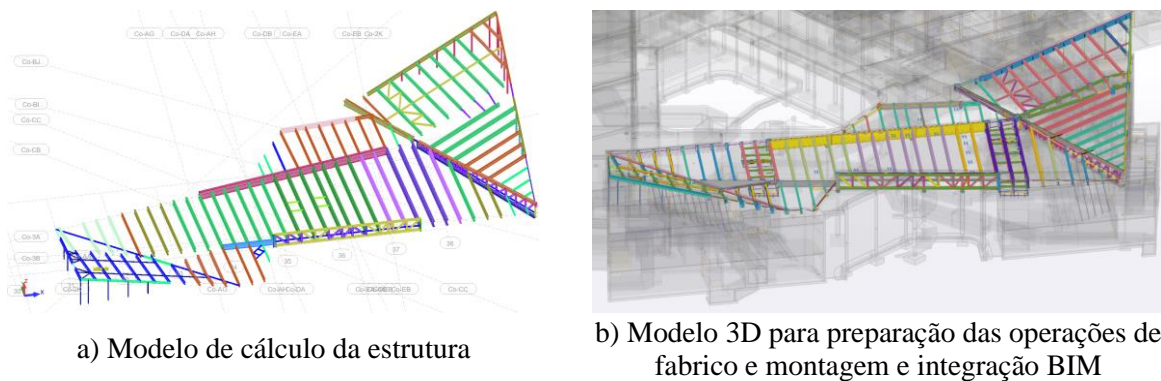
Nos terraços técnicos dos edifícios, existe ainda uma estrutura constituída por pilares metálicos em consola, apoiada nas vigas de piso. Estes pilares servem de suporte à estrutura secundária do revestimento que garante a barreira acústica dos equipamentos técnicos ali instalados. Além do peso dos equipamentos, a ação do vento e a ação da neve na cobertura são duas importantes ações a considerar nestas estruturas.



**Fig. 6:** Modelos de cálculo e de preparação da estrutura do terraço do edifício B2.

De entre as estruturas analisadas, destaca-se o edifício do “Coeur”, constituído por vigas principais com secções em IPE, HEB, PRS ou em treliça, e por vigas secundárias geralmente em secção IPE, HEA ou HEB, que suportam a laje mista. Para a conexão das vigas metálicas à laje mista, adota-se a solução tipo *stud*, amplamente conhecida como conectores tipo *Nelson*. A estrutura metálica está geralmente ligada à estrutura de betão armado (vigas, pilares e paredes) que a suportam. Quando relevante para a repartição de cargas, os elementos da estrutura de betão são incluídos no modelo de cálculo global da estrutura metálica.

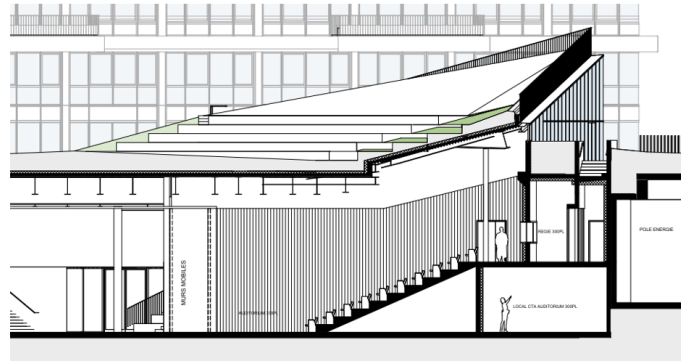
Nas zonas dos auditórios, a cobertura eleva-se acima do piso térreo, formando dois triângulos sobrelevados lateralmente, o que de ponto de vista da análise estrutural, constitui um desafio, já que, sendo uma cobertura ajardinada com peso considerável, uma parcela desse peso é decomposta no plano da cobertura, conduzindo à necessidade de prever uma treliça horizontal para resistir a esse efeito. Nas fachadas sobrelevadas, a estrutura é suportada por pilares metálicos tubulares. 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



**Fig. 7:** Modelos de cálculo e de preparação da estrutura do “Coeur”.

Nas treliças, a estabilização das cordas comprimidas é conseguida através um sistema de contraventamento constituído pelas vigas mistas secundárias e pelo diafragma da laje. No caso da treliça TR1, cuja corda superior se eleva acima do nível do piso, o travamento da corda é formado por elementos diagonais que são ligados diretamente às vigas do piso.

Os pontos de apoio da estrutura metálica nos elementos de betão são modelados como apoios fixos ou moveis, não estando previstas juntas de dilatação na estrutura do “Coeur”. Nesta estrutura, além das ações correntes em coberturas, chama-se à atenção para a importância do peso das terras, observável na Fig.8. Devido à acessibilidade da cobertura, é necessário considerar sobrecargas adicionais específicas, tais como a sobrecarga nos caminhos de evacuação dos bombeiros. O local da obra está inserido numa zona de baixa sismicidade, de acordo com o zonamento sísmico francês, para o qual não são definidas exigências regulamentares.



**Fig. 8:** Corte de arquitetura do edifício “Coeur” (fonte: adaptado do projeto de arquitetura [1]).

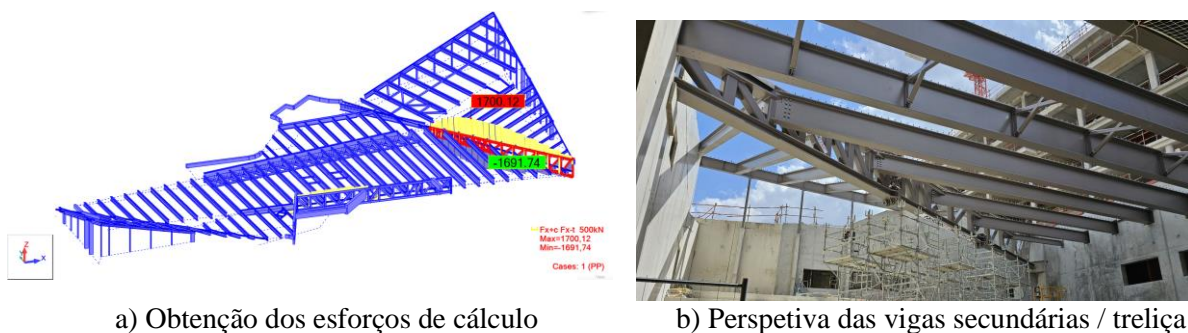
### 3. Análise e dimensionamento

#### 3.1 Análise global da estrutura metálica

Devido à independência das estruturas analisadas, foram realizados modelos de cálculo individuais para a análise e dimensionamento dos elementos que compõem as estruturas, por norma através do Software Autodesk Robot Structural Analysis [2], que permite a realização de análises lineares ou não-lineares geométricas por modelos de barras ou placas utilizando o método dos elementos finitos (MEF). Para análises específicas de vigas e lajes mistas, ligações e detalhes construtivos foram utilizados outros softwares, tais como o *IDEA StatiCa* [3], e folhas de cálculo desenvolvidas para o efeito.

A segurança dos elementos metálicos, é verificada tendo em conta as exigências regulamentares da EN1993-1-1 [4], no que se refere quer aos Estados Limites Últimos quer para os Estados Limites de Serviço. Quando se justifica, é necessário realizar verificação dos fenómenos de “shear-lag” no banzo e a encurvadura na alma das vigas PRS, de acordo com a EN 1993-1-5.

Em particular na estrutura do “Coeur”, foram utilizados vários modelos cálculo globais e detalhados para a análise e dimensionamento, ver Fig. 9 a). Para a verificação dos critérios de conforto às vibrações induzidas por pessoas, foram realizadas análises modais para determinar as frequências próprias de vibração das vigas de piso. Houve ainda necessidade de realizar análise dos aparelhos de apoio, nos nós da estrutura com elevadas reações. Quanto à sua tipologia, existem apoios fixos, apoios unidirecionais e apoios bidirecionais. A localização, caracterização e detalhe dos aparelhos apoios é apresentada nos desenhos de projeto, conforme ilustrado na Fig. 11.



a) Obtenção dos esforços de cálculo

b) Perspetiva das vigas secundárias / treliça

**Fig. 9:** Modelos de cálculo para a análise e dimensionamento da estrutura do “Coeur”.

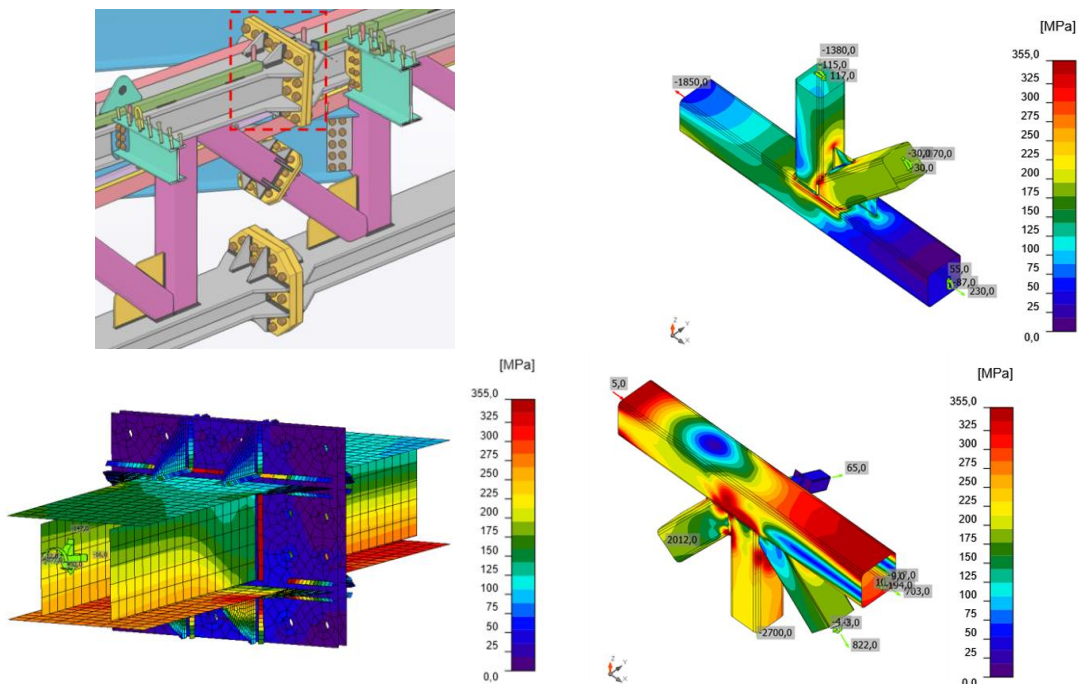
Os procedimentos de cálculo foram semelhantes para todas as estruturas, a menos das especificidades de cada uma.

### 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 sectionar 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.10;
3. Os requisitos funcionais ou os requisitos dos revestimentos.

A complexidade de certos nós, inerente à ligação entre elementos tubulares, bem como a necessidade de otimizar o consumo de material e os processos de fabrico, tais como a soldadura, instigou que a análise e dimensionamento das ligações seja realizada com auxílio do Software *IDEA StatiCa*, que permite uma análise de elementos finitos integrada com os requisitos regulamentares presentes na EN1993-1-8 [6]. Deste modo, é possível, através de uma análise geométrica e material não-linear, garantir a resistência das ligações, bem como avaliar se as rigidezes axiais e rotacionais obedecem às condições impostas no modelo de análise global da estrutura. O conjunto desta análise, refere-se como análise da integridade dos nós.



a) Modelação e análise por EF da ligação de emenda da corda superior da treliça TR2 (20m de vão) na zona do “Coeur”

b) Análise por EF da integridade dos nós da treliça TR1 na zona do “Coeur”

**Fig. 10:** Análise e dimensionamento de ligações metálicas

Nas ligações ao betão armado, é fundamental compatibilizar os modelos da estrutura metálica com os modelos de betão armado. A título de exemplo, como se pode ver no detalhe da Fig. 12, por vezes as ligações das vigas metálicas às paredes de betão armado implicam a necessidade de criar “reservas”, respeitando as tolerâncias geométricas da norma EN 1090-2 [7].

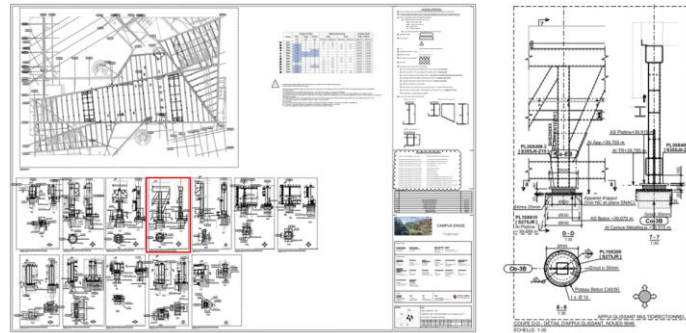


Fig. 11: Desenho de projeto com a tipologia e o detalhe dos aparelhos de apoio.

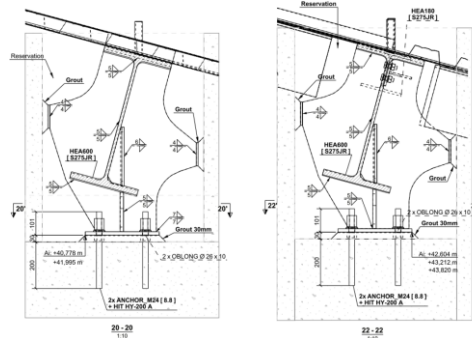


Fig. 12: Desenho de projeto com detalhe de ligação da viga metálica à parede de betão armado

#### 4. Fabrico e montagem

A conceção, dimensionamento, otimização, fabrico e montagem de todas as estruturas analisadas são responsabilidade da parceria VisArqEng Architecture & Engineering Solutions Lda (gabinete de projeto), Faustino & Ferreira S.A (fabrico), e ACIETEC (montagem e coordenação em França). À semelhança de outras obras realizadas em França, o construtor assume a execução do projeto.

Muitos foram os desafios que se puseram durante o projeto para ter em consideração os meios disponíveis em fábrica, os meios de transporte e os meios no estaleiro. A Tabela 1 sintetiza as considerações a ter em conta durante a conceção e o dimensionamento.

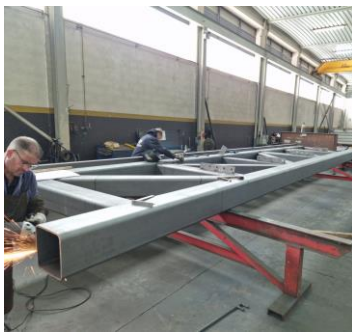
**Tabela 1:** Considerações durante a conceção e dimensionamento das estruturas

Fabrico	Adoção de soluções estruturais compatíveis com processos disponíveis
	Adoção de soluções que minimizem processos manuais
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Soldaduras</li> <li>▪ Corte, furação e entalhes (inclui preparação de chanfres)</li> </ul>
	Preferência por soluções aparafusadas
Montagem	Transporte
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ligações adicionais</li> <li>▪ Aprovisionamento</li> <li>▪ Planeamento e otimização das cargas (distância fabrico / obra)</li> </ul>
	Meios de elevação disponíveis
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fixos na obra → alcance/capacidade de carga → partições da estrutura</li> <li>▪ Móveis ou manuais</li> </ul>
	Necessidade de estruturas de apoio temporárias
	Estabilização da estrutura durante a betonagem
Compatibilização com as estruturas de suporte da estrutura metálica	



Na Fig. 12 podem observados alguns elementos adaptados e otimizados para os processos disponíveis e mais eficientes em fabrico. Na Fig. 13 são apresentadas algumas operações de montagem e o seu enquadramento com as restantes estruturas, metálicas, betão armado ou madeira. As operações de montagem são sobretudo condicionadas pela disponibilidade dos meios da obra e pelo faseamento construtivo.

Com o objetivo de assegurar a montagem adequada da estrutura metálica foram realizados estudos prévios para garantir a estabilidade da estrutura metálica durante toda a operação, bem como definir, juntamente com a equipa responsável pela direção de obra, quais as formas mais adequadas e seguras para realizar a operação, face aos meios disponíveis.



a) Armação da treliça TR1 do “Coeur”

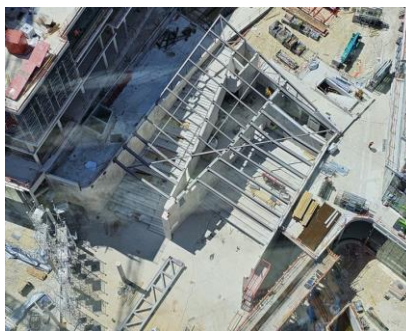


b) Armação de uma PRS do “Coeur”



c) Soldadura da treliça TR2 do “Coeur”

**Fig. 12:** Operações de fabrico.



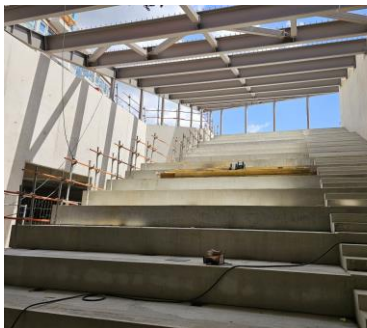
a) Vista aérea da montagem da estrutura do “Coeur”



b) Estabilização da treliça TR1



c) Montagem das vigas do “Coeur”



d) Perspetiva da treliça horizontal vista de um dos auditórios do “Coeur”



e) Montagem da estrutura metálica na cobertura de um dos edifícios



f) Colocação de chapa colaborante e armação de laje na cobertura de um dos edifícios

**Fig. 13:** Operações de montagem.

## 5. Principais conclusões

A conceção da estrutura metálica e mista do Campus Engie em Paris, levado a cabo pela equipa de projeto, preparação, fabrico e montagem, representou um desafio e uma oportunidade de colocação em prática da capacidade técnica da equipa envolvida.

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

1. A conceção e dimensionamento de estruturas em edifícios é multidisciplinar;
2. A integração e interação de várias especialidades requer sinergia de todos os envolvidos, quer durante a fase de conceção, dimensionamento e preparação, quer no acompanhamento da fase de fabrico e de montagem;
3. A tecnologia BIM permite ter uma visão detalhada e compatibilizada das soluções adotadas pelas diversas especialidades;
4. A utilização de modelos avançados de cálculo 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 produção das peças do projeto, quer nas peças escritas quer nas peças desenhadas, deve conter a informação necessária e suficiente para uma correta interpretação, das metodologias e opções tomadas.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a colaboração e apoio da Faustino e Ferreira Sociedade Construções Metálicas, S.A. e da ACIETEC e às respetivas equipas envolvidas e demais envolvidos neste projeto.

## Referências

- [1] Campus Engie, ART & BUILD Architect, 2021.
- [2] Robot Structural Analysis Professional 2021. *Software*. São Rafael, California, USA: Autodesk, Inc.
- [3] Idea Statica. *Software*. Sumavska, Czech Republic: <https://www.ideastatica.com/>.
- [4] EN 1993-1-1. *Eurocódigo 3: Projeto de estruturas de aço – 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] EN 1993-1-8. *Eurocódigo 3: Projeto de estruturas de aço – parte 1-8: Projeto de ligações*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2010.
- [7] CEN, EN 1090-2 (2008). *Execution of Steel Structures and Aluminium Structures - Part 2: Technical Requirements for Steel Structures*. European Committee for Standardization, Brussels, 2011.