

DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA METÁLICA E MISTA DA AMPLIAÇÃO DO CENTRO COMERCIAL CRÉTEIL SOLEIL

Hugo Augusto^{a,*}, César Ribeiro^b, David Valério^c, Tiago Ferreira^d, Marco Pereira^e e Filipe Gomes^f

^{a,b,c,d,e,f} *Gabinete técnico de Viseu em parceria com a Faustino & Ferreira SA & Acietec.*

Resumo. A ampliação de um dos maiores centros comerciais em França criou a oportunidade do desenvolvimento de soluções em estrutura metálica e mista de pisos e coberturas com grandes vãos. De entre as estruturas analisadas destacam-se a estrutura em vigas de alma cheia reconstituídas soldadas (PRS) com 1.5m de altura da zona do Mail (zona da restauração), com 25m de vão. E a designada “Toiture Jonction”, que compreende duas vigas de grande vão, com cerca de 30m, também PRS com 2.4m de altura. Serão abordadas as várias fases e desafios inerentes ao projeto, fabrico e montagem, numa vertente técnica da engenharia envolvida, e inumerados os principais pontos a ter em consideração para abraçar um projeto desta natureza.

1. Introdução

O Centro Comercial Créteil Soleil foi inaugurado em meados da década de 70 do século passado, a par de outros grandes centros comerciais que foram construídos nessa altura na região parisiense. O seu enquadramento com a cidade pode ser visto na Fig. 1. Mais tarde por volta do ano 2000 o centro comercial foi renovado aumentando a sua superfície comercial para 124000 m² repartidos por 3 pisos.

Recentemente, em 2018, o Centro Comercial Créteil Soleil iniciou um processo de ampliação, para que em 2020 possua 135700m² de superfície comercial. A ampliação pretende transformar parte da zona de estacionamento atual em zona comercial, como se pode ver na Fig. 2. A intervenção pretende demolir os três pisos de estacionamento originais, ver Fig. 3, para a criação de zonas de estacionamento nos pisos inferiores, zonas de lojas, quiosques, restauração e cinemas, nos quatro novos pisos.

A ampliação do edifício criou a oportunidade do desenvolvimento de soluções em estrutura metálica e mista de pisos e coberturas com grandes vãos, assim como das estruturas de acesso

ao Centro Comercial. No global foram dimensionadas, fabricadas e aplicadas 450 toneladas de aço e 400m² de revestimento em compósito.



Fig. 1: Enquadramento do Centro Comercial Créteil Soleil



a) Maquete do original



b) Maquete com a ampliação

Fig. 2: Comparação entre a maquete do edifício original e o do edifício ampliado

Foram vários os desafios na análise e dimensionamento da estrutura, desde a necessária compatibilização com todas as especialidades, aos requisitos de resistência e funcionais, como os limites de conforto dos pisos e a operacionalidade do restante edifício durante a execução dos trabalhos.

De entre as estruturas analisadas destacam-se a zona do Mail (zona da restauração), localizada no terceiro piso. Cujos critérios de conforto foram garantidos com recurso a modelos avançados de elementos finitos, e às conclusões do projeto de investigação RFCS “Human induced vibration of steel structures (HiVoSS)” [1].

Outra estrutura analisada refere-se à designada “Toiture Jonction”, que integra a laje acessível e cobertura, do piso 3, assim como a fachada de vidro dos pisos superiores. A um nível superior foi analisada a estrutura da cobertura dos cinemas. E para as comunicações verticais e horizontais, entre o estacionamento e edifícios adjacentes e os acessos ao centro comercial, foram idealizadas estruturas exteriores, designadas por passerelles.

Serão abordadas as várias fases e desafios 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, multidisciplinar, com uma elevada complexidade e com a necessidade de compatibilização constante com os restantes intervenientes.



Fig. 3: Vista aérea da zona do estacionamento a demolir e ampliar

2. Conceção e hipóteses de cálculo mais relevantes

A conceção estrutural de um edifício, ou parte dele, tem de garantir, de forma eficiente, a função a que se destina o mesmo. Tem de ser capaz de resistir às ações a que está sujeita e garantir critérios de conforto e de operacionalidade, respeitando a arquitetura e demais especialidades. E apresentar uma relação proporcional entre a dimensão dos elementos da estrutura, as ações e a geometria dos elementos que a compõem, de forma a obter uma otimização dos recursos e custos. Sendo assim, os pontos estruturantes que podem ser considerados na fase de conceção são: a função, a localização e a estruturação [3].

Neste caso particular, como em processos semelhantes realizados em França, a estruturação teve por base o estudo prévio, a arquitetura e os requisitos funcionais, regulamentares ou específicos.

As principais hipóteses de cálculo, aqui definidas de forma sucinta, foram definidas para cada zona estudada, representada na Fig. 4, com o intuito de balizar as ações, os requisitos funcionais e de segurança no dimensionamento dos elementos estruturais:

Em todas as estruturas foram usados o Eurocódigos, e respetivos Anexos Nacionais franceses, para a definição das ações, dimensionamento e requisitos dos vários estados limites e de conforto, assim como regulamentação francesa específica ou bibliografia da especialidade. À exceção de zonas como os cinemas (R30) o requisito de resistência ao fogo é de R90, garantido através de proteção projetada ou em forma de tintas intumescentes.

A zona do Mail, situada no piso 3, é constituída por uma estrutura mista, composta por vigas mistas principais de alma cheia PRS com 1.5m de altura, de secção constante a meio vão e variável junto aos apoios. As vigas vencem vãos com aproximadamente 25m, e são simplesmente apoiadas em vigas de betão armado. Essas vigas suportam as vigas secundárias, também mistas, com secção em IPE ou HE. As vigas suportam lajes mistas colaborantes, garantindo a interação de viga mista através de conetores de cabeça. As principais ações são: a restante carga permanente (além do peso próprio dos elementos estruturais G_0) $G'=5.5\text{kN/m}^2$, a sobrecarga de utilização $Q=5,0\text{kN/m}^2$, as reações das escadas rolantes. A respeitar existem juntas de dilatação quer longitudinais quer transversais. Os critérios de conforto são estabelecidos através do cumprimento da Eq. (1) ou Eq. (2);

$$f \geq 5\text{Hz} \quad \text{para } G_0 + G' + 50\%Q \quad (1)$$

$$HiVoSS[1] \quad \text{para } G_0 + 50\%G' + 30\%Q \quad (2)$$

A zona da Toiture Jonction é constituída por uma estrutura mista, vigas metálicas e laje colaborante, e uma zona em estrutura metálica com revestimento metálico. As vigas em IPE, HEB,

HEM ou PRS distribuem-se ao longo de 76m no limite Este da intervenção, com um vão de 14.5m, servindo de cobertura acessível (na zona da laje mista) ao piso 3. As vigas são simplesmente apoiadas diretamente em vigas e muros de betão armado, ou em duas vigas de grande vão, com cerca de 30m, em PRS com 2.4m de altura, cujas secções se elevam acima da cota dos revestimentos de cobertura. A viga mais a Oeste apoia ainda a fachada cortina de vidro que se estende até à cobertura também ela revestida a vidro. As ações permanentes e sobrecargas de utilização variam de zona para zona, desde 1kN/m^2 a 9kN/m^2 . Como se trata de uma cobertura exterior é necessário contar com a ação do vento e da neve. A existência de juntas de dilatação entre os vários corpos unidos por esta estrutura foram um desafio de conceção e dimensionamento, assim como a integração com os vários atravessamentos da cobertura para as especialidades. Os critérios de conforto são estabelecidos através do cumprimento da Eq. (2) ou Eq. (3);

$$f \geq 2.6\text{Hz} \quad \text{para} \quad G_0 + G' + 50\%Q \quad (3)$$

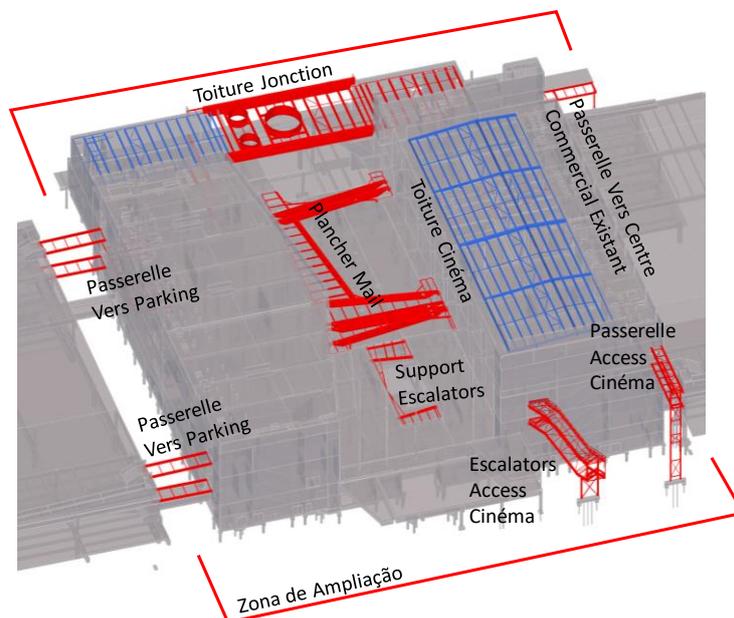
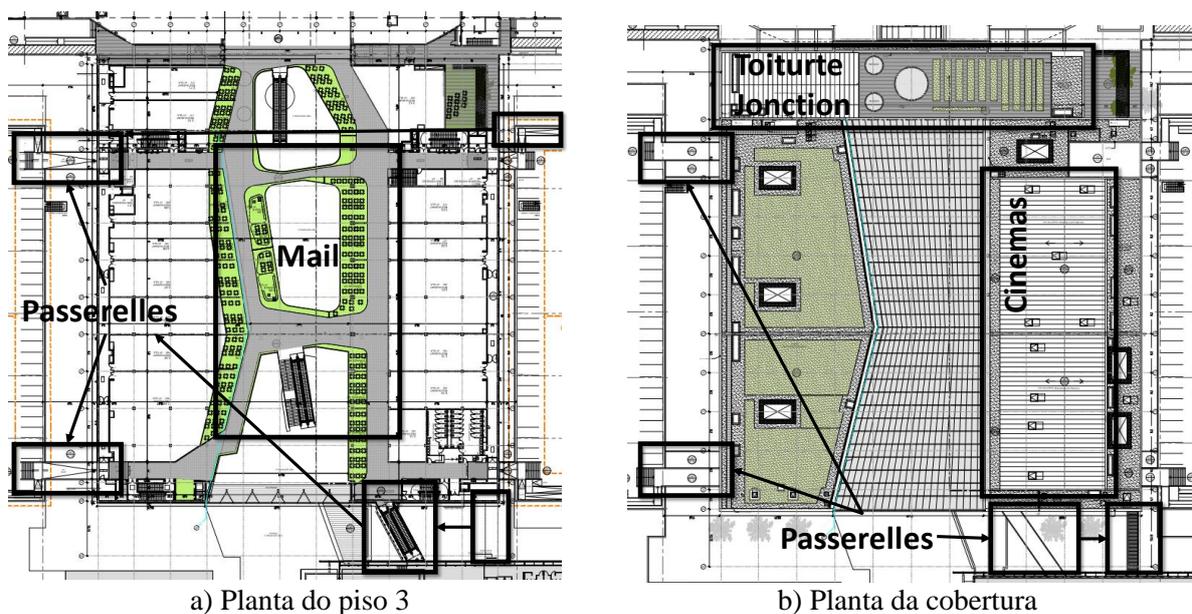


Fig. 4: Enquadramento das estruturas analisadas na zona ampliada



a) Planta do piso 3

b) Planta da cobertura

Fig. 5: Enquadramento das estruturas analisadas na zona ampliada

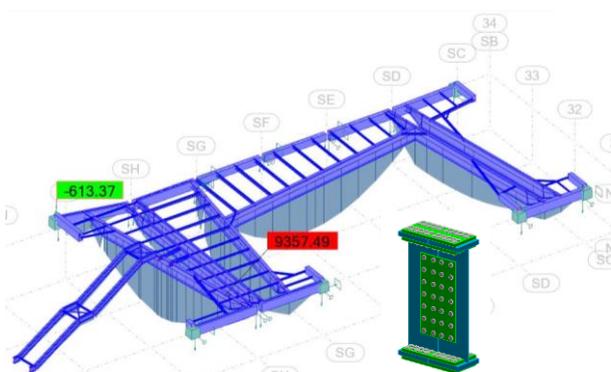
A cobertura dos cinemas situa-se no nível 4C, e é constituída por asnas em IPE suportadas em pilares e muros de betão armado, vencendo vãos de 21m e que se desenvolvem em 65.5m de largura com espaçamentos de 16.4m. O revestimento de suporte metálico está suportado em madres também em IPE, formando duas águas. A estrutura metálica suporta ainda uma laje técnica de betão armado. As ações regulamentares de sobrecarga, neve e vento foram tidas em conta assim como as sobrecargas dos equipamentos. As soluções respeitam ainda as juntas de dilatação longitudinais e transversais da obra ou da solução estrutural adotada.

Para permitir a comunicação entre o estacionamento e edifícios adjacentes foram criadas passerelles, com vãos compreendidos entre os 12 e 15m. Uma das passerelles de acesso integra na sua conceção um mecanismo de escadas rolantes. As passerelles abertas são constituídas por vigas principais e secundárias mistas (viga laje colaborante). As passerelles fechadas contêm soluções de estrutura metálica envolvendo vigas de piso, que podem ou não ser mistas, e sistemas de montantes e treliças nas fachadas e cobertura, que conferem estabilidade às ações horizontais. Estas passerelles incluem revestimento em vidro e compósito nas suas fachadas. As ações da neve vento foram tidas em conta, assim como $G'=2.5\text{kN/m}^2$ e $Q=5,0\text{kN/m}^2$.

3. Análise e dimensionamento

Devido à independência das estruturas analisadas, foram criados modelos de cálculo individuais para a análise e dimensionamento dos elementos que compõem as estruturas, por norma realizados através do Software *Autodesk Robot Structural Analysis* [4], 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 dedicados e folhas de cálculo desenvolvidas para o efeito.

Para a estrutura do Mail foram utilizados vários modelos cálculo globais e detalhados para a análise e dimensionamento, ver Fig. 6 a). Para a verificação dos critérios de conforto às vibrações induzidas por pessoas, foram incorporados elementos de placa, com as espessuras equivalentes das lajes, discretizadas em elementos finitos. A utilização dos critérios do HiVoSS [1], com um coeficiente de amortecimento de 2% em relação ao crítico, e recorrendo à Eq. (2), ver Fig. 7, permitiram uma considerável otimização das secções das vigas mistas principais PRS. Houve ainda necessidade de realizar análises detalhadas dos apoios e das almas das PRSs com aberturas para atravessamentos de condutas, assim como das secções de altura variável e partições para transporte.



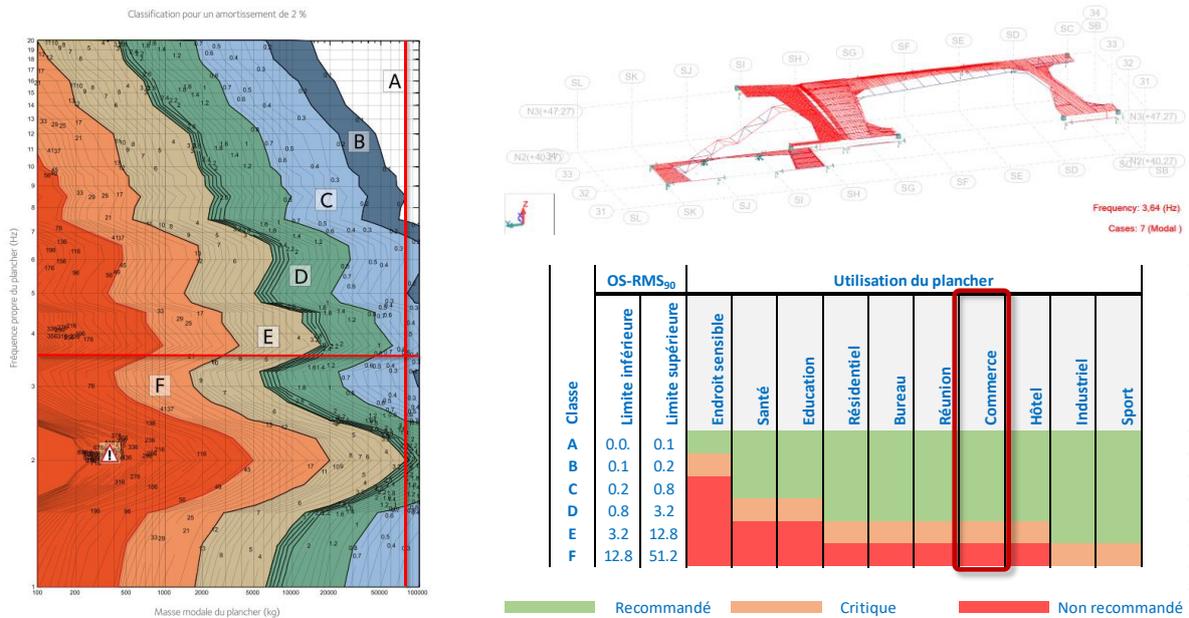
a) Obtenção dos esforços de cálculo



b) Perspetiva das vigas PRS do Mail

Fig. 6: Modelos de cálculo para a análise e dimensionamento da estrutura do Mail

Os procedimentos de cálculo foram semelhantes para todas as estruturas, a menos das especificidades de cada uma. Para a Toiture Jonction, foi necessário proceder a análise de estabilidade do banzo superior das PRS com 30m, devido às vigas possuírem o banzo superior acima do plano da cobertura, e o travamento das vigas de piso ser só parcial. As emendas para transporte, mas principalmente para a montagem, dessas mesmas vigas, foram analisadas tendo em conta a capacidade dos meios de elevação disponíveis. À semelhança da estrutura do Mail também aqui a otimização das vigas PRS foi possível, através da utilização dos critérios do HiVoSS [1], e da Eq. (3).

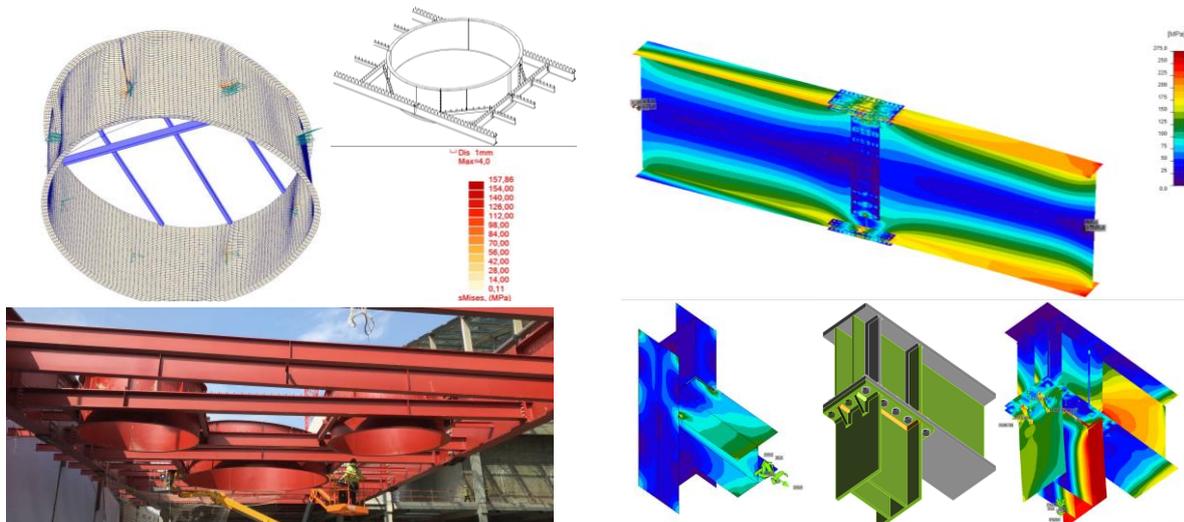


a) Relação entre a frequência e massa modal [2]

b) Determinação da frequência própria de vibração e determinação de critérios de conforto [2]

Fig. 7: Verificação dos critérios de conforto para a estrutura mista do Mail

De entre as análises realizadas convém mencionar a análise das claraboias redondas, com 7m e 4m de diâmetro e 2.5m de altura, pelo MEF, as análises das emendas das PRSs pelo MEF, e a análise dos apoios de muitas das estruturas na interação com a estrutura de betão armado, tendo em conta os seus graus de liberdade, ver Fig. 8.



a) Claraboias da Toiture Jonction

b) Análise por EF de detalhes construtivos

Fig. 8: Análise detalhada de alguns elementos estruturais recorrendo ao MEF.

4. Fabrico e montagem

Todas as estruturas em analisadas fazem parte de um pacote em conceção-construção a cargo da parceria ACIETEC (coordenação em França), Faustino & Ferreira S.A (fabrico) e gabinete técnico associado às duas. Em França é prática corrente o construtor assumir a execução do projeto.

Muitos foram os desafios que se puseram durante o projeto para ter em conta, quer os meios disponíveis em fábrica, os meios de transporte quer 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	Processos de fabrico disponíveis <ul style="list-style-type: none"> ▪ Em fábrica – adoção de soluções estruturais compatíveis ▪ Em obra – possibilidade de soldadura em obra (ex. conetores)
	Adoção de soluções que minimizem processos manuais <ul style="list-style-type: none"> ▪ Soldaduras ▪ Entalhes (inclui preparação de chanfres)
Montagem	Transporte <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ligações adicionais ▪ Aprovisionamento ▪ Planeamento e otimização das cargas (distância fabrico / obra)
	Meios de elevação disponíveis <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fixos na obra → alcance/capacidade de carga → partições da estrutura ▪ Móveis ou manuais
	Necessidade de estruturas de apoio temporárias
	Estabilização da estrutura durante a betonagem
Compatibilização com as estruturas de suporte da estrutura metálica	

Na Fig. 9 podem observadas alguns elementos em fabrico com elevados graus de complexidade, no entanto adaptadas e otimizadas para os processos disponíveis. E na Fig. 10 algumas operações de montagem, condicionadas pela disponibilidade dos meios comuns da obra, pela hora permitida para a montagem e o faseamento dos elementos de suporte.



a) Processo automático para a execução de negativos

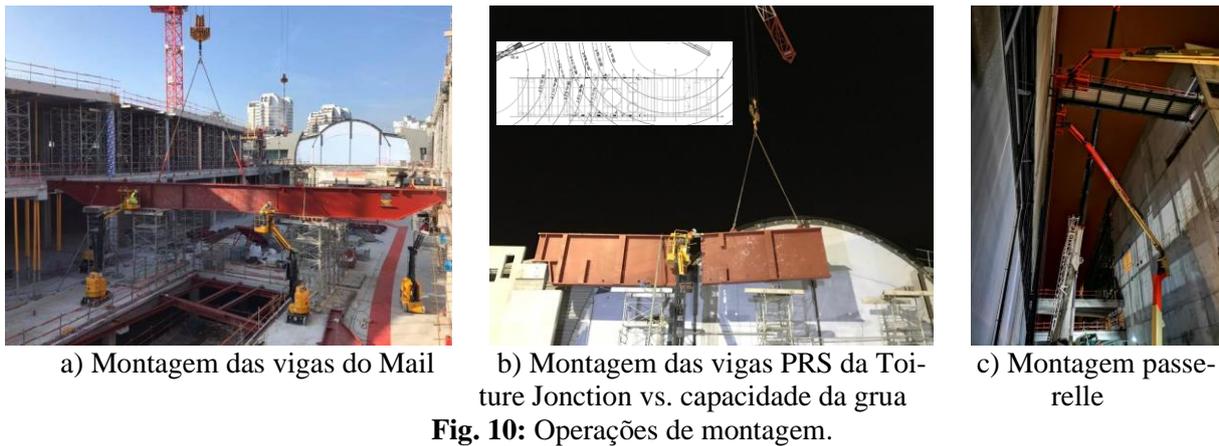


b) Fabrico e transporte de pórtico para apoio de piso em betão



c) Processos manuais de soldadura (ex. vigas dos Cinemas)

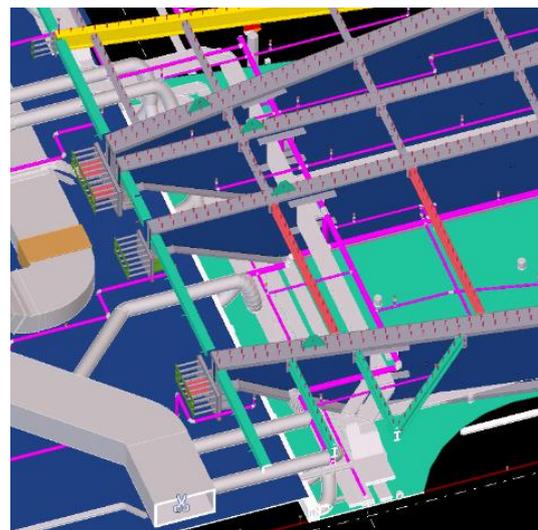
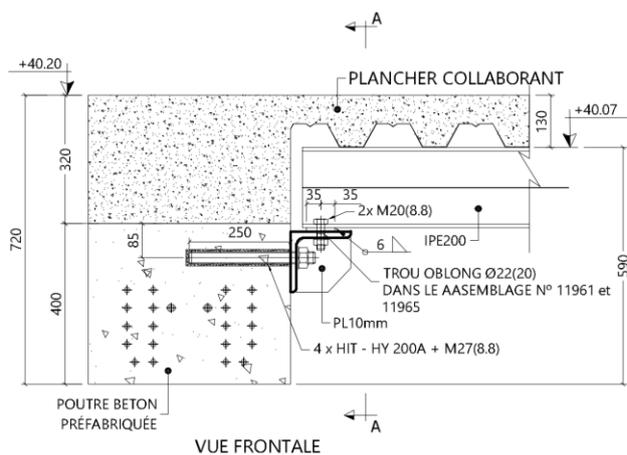
Fig. 9: Operações de fabrico.



5. Integração e compatibilizações

Existem vários fatores que influenciam a conceção para permitir a compatibilização da estrutura com a envolvente e as demais especialidades, ver Fig. 11 a Fig. 13, são eles:

1. Integração com as restantes estruturas de suporte (estrutura de betão armado), e com as estruturas suportadas (revestimentos, claraboias, fachadas, etc.);
2. Compatibilização com as armaduras, processos e faseamentos construtivos, como por exemplo ancoragens de espera para o apoio da estrutura metálica;
3. Integração com as restantes especialidades, através de ferramentas BIM, como a arquitetura, especialidades técnicas (ventilação, redes de águas e esgotos, *sprinklers*, etc.);
4. Compatibilização com os revestimentos, tendo em conta as suas limitações funcionais;
5. Compatibilização com os condicionalismos impostos na obra, como os meios de elevação, armazenamento e o faseamento construtivo, assim como a possibilidade de utilização de estruturas de apoio temporárias que têm de ser compatibilizadas com as estruturas que as apoiam.



- a) Integração da fixação com os cabos de pré-esforço e faseamento das betonagens

- b) Compatibilização das vigas de piso do Mail com condutas, tubagens e tetos falsos

Fig. 11: Integração e compatibilização das estruturas metálicas com outras especialidades.

Há ainda que ter em conta que a otimização da estrutura está relacionada com as ferramentas disponíveis, como a utilização métodos avançados ou a utilização de resultados da investigação

e desenvolvimento, como aconteceu no caso da avaliação do conforto a vibrações para a estrutura do Mail e da Toiture Jonction.

A capacidade de adaptação a imprevistos em obra, em tempo útil, é outro fator preponderante na resposta às solicitações, integração e compatibilização.



a) Compatibilização da montagem da estrutura metálica com os meios de elevação e os equipamentos já montados.



b) Compatibilização da fachada cortina de vidro com a estrutura metálica

Fig. 12: Integração e compatibilização das estruturas metálicas com outras especialidades.

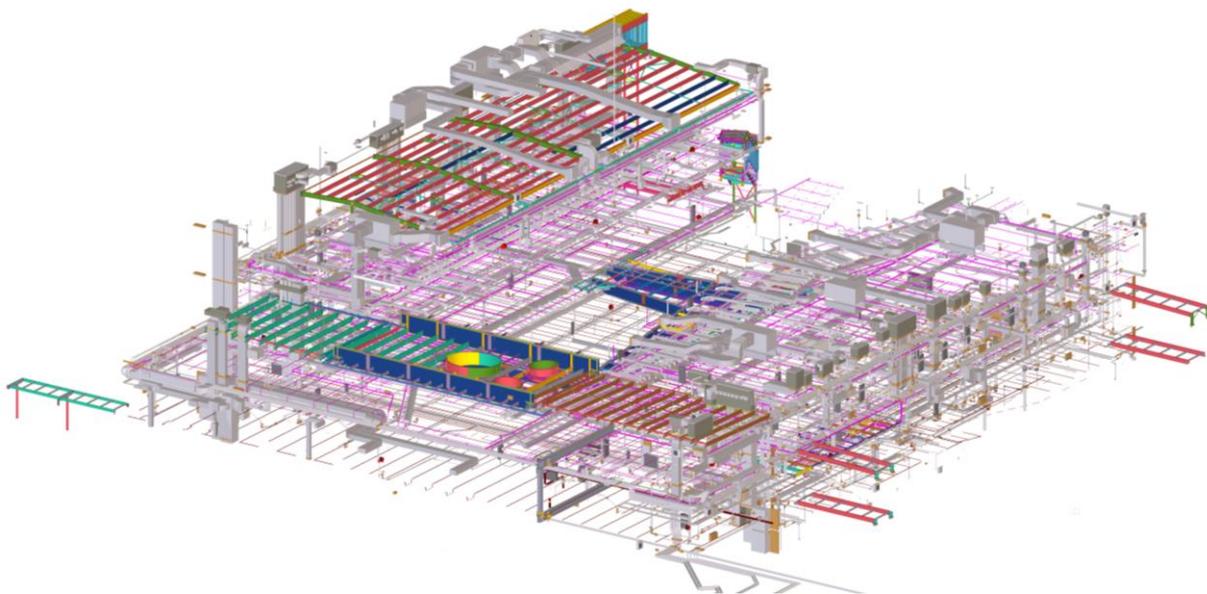


Fig. 13: Integração BIM, entre a estrutura metálica e as especialidades técnicas.

6. Principais conclusões

A conceção e compatibilização da estrutura metálica e mista pesada da ampliação do Centro Comercial Créteil Soleil 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 complexos:

1. A conceção e dimensionamento de estruturas em edifícios é multidisciplinar;
2. A integração e interação com as várias especialidades requer uma grande envolvimento e exige capacidade de idealizar várias soluções em tempo real;
3. Existem múltiplas ferramentas capazes de ajudar nas tarefas de compatibilização, dimensionamento e detalhe → BIM e integração com softwares de cálculo e modelação, com partilhas periódicas de modelos com a evolução da modelação;
4. O agente terá de potenciar o seu uso e a sua adequação às necessidades e complexidade das situações;
5. A utilização de modelos avançados e o recurso aos resultados de investigação atual permitiu a otimização da estrutura no que respeita aos critérios de conforto;
6. 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;
7. A produção das peças do projeto devem conter a informação necessária e suficiente para uma correta interpretação, das metodologias e opções tomadas, quer nas peças escritas quer nas peças desenhadas, que cada vez mais devem ser integradas e compatibilizadas, em consonância com o ponto 3. Exigindo rigor e capacidade administrativa tendo em conta todo o processo de fiscalização, validação e aprovação pelas várias entidades envolvidas, principalmente à luz das práticas do mercado Francês.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a colaboração e apoio da ACIETEC constructions & revêtements métalliques e da Faustino e Ferreira Sociedade Construções Metálicas, S.A. e às respetivas equipas envolvidas: Mário Silva, Ricardo Faustino, Élio Simões, Patrick Pinheiro, Bruno Silva e demais envolvidos neste projeto.

Referências

- [1] M. Feldmann, Ch. Heinemeyer, M. Lukic, E. Caetano, Á. Cunha, A. Goldack, A. Keil, M. Schlaich, S. Hicks, A. Smith, O. Hechler, R. Obiala, F. Galanti, P. Waarts. *Human-induced vibration of steel structures (Hivoss)*, Final report, EUR 24183, ISBN 978-92-79-14146-1, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010
- [2] Feldmann M, Heinemeyer Ch., Völling B. *Design Guide for Floor Vibrations*, ArceorMittal Europe – Long Products, technical brochures, Luxemborg.
- [3] Augusto H. *Conceptual Design of a Basketball Sports Hall for Académica – Intensive Use of Structural Tubes*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2011.
- [4] Robot Structural Analysis Professional 2018. *Software*. São Rafael, California, USA: Autodesk, Inc.