



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Caio Rossatti Battaglia

AVALIAÇÃO DE LIGAÇÕES METÁLICAS COM  
AUXÍLIO COMPUTACIONAL

Relatório de estágio no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil, na área de especialização em Mecânica Estrutural, orientada pelo Professor Doutor Rui António Duarte Simões e pelo Engenheiro Doutor Neven Kostic e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

Setembro de 2022



UNIVERSIDADE D  
**COIMBRA**

Caio Rossatti Battaglia

**AVALIAÇÃO DE LIGAÇÕES METÁLICAS COM  
AUXÍLIO COMPUTACIONAL**

**Relatório de estágio no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil,  
na área de especialização em Mecânica Estrutural, orientada pelo  
Professor Doutor Rui António Duarte Simões e pelo Engenheiro  
Doutor Neven Kostic e apresentada ao Departamento de  
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da  
Universidade de Coimbra**

Setembro de 2022

## **AGRADECIMENTOS**

Um agradecimento especial aos meus orientadores, a começar pelo professor Doutor Rui Simões que não só me inspirou a seguir com a especialização na área de mecânica estrutural e por ter me ensinado muito do que sei hoje sobre estruturas metálicas, mas também por toda a paciência e disponibilidade para me ajudar com o desenvolvimento deste relatório. Gostaria também de agradecer profundamente ao engenheiro Doutor Neven Kostic por ter me providenciado a incrível oportunidade de fazer meu estágio curricular em sua empresa, Dr. Neven Kostic GmbH, uma experiência única que certamente levarei comigo para o resto da minha vida, juntamente com os seus frutos ao longo da minha estadia.

Ao professor Pedro Simão, agradeço pela sua confiança nas minhas capacidades e recomendações ao exterior. Se não fosse por ele, jamais seria possível a oportunidade de fazer o meu estágio curricular em Zurique.

Um obrigado ao meu irmão e aos meus pais que desde sempre estiveram comigo para me apoiar e me confortar nos momentos mais difíceis e também por me ensinarem o verdadeiro significado de perseverança.

Aos meus amigos Fabio Pedrocchi, Miguel Rochinha e Bruno Clemente, um obrigado especial não só pelas boas memórias que temos juntos, mas também pelas noites em claro a estudar para exames e a fazer trabalhos. Gostaria também de agradecer ao Leonardo Pappas, Eduardo Celso e João Campana pela amizade e boa companhia de estudo durante a minha especialização do mestrado.

Um agradecimento muito especial à Laura Cesana por ser a minha base de tudo durante todos esses anos em Coimbra, pois sejam em bons ou maus momentos, sempre pude contar com ela.

A todos os meus outros colegas, especificamente o José Heitor Soares por ter sido um dos primeiros a me receber como um amigo e me guiar durante meu percurso académico, agradeço encarecidamente.

## RESUMO

No âmbito deste estágio curricular, o estudante está encarregue de fazer a modelação computacional em 3D das ligações dos elementos constituintes de coberturas metálicas no software IDEA Statica para projetos já existentes, mas ainda em fase de desenvolvimento. O detalhamento de secções metálicas ocas, a verificação de instabilidade lateral dos elementos, o controle de aparafusamento ou soldaduras e a procura de soluções de modelação para ligações de múltiplos elementos confluentes num mesmo ponto, fazem parte da responsabilidade do estudante neste estágio. A empresa contratante, Dr. Neven Kostic GmbH, já vem desde há muito tempo a trabalhar com outros softwares de elementos finitos como o AxisVM, mas pretende realizar algumas comparações com o software IDEA Statica, o qual também permite a conceção e dimensionamento de ligações metálicas com configurações diversas.

O objetivo do estágio consiste não só na análise comparativa dos resultados de algumas ligações metálicas entre os softwares e/ou a potencialidade de ambos, mas principalmente em conhecer as aplicabilidades do IDEA Statica e aprender como utilizar o software para a sua possível integração na empresa. Quando possível, fazer também a simplificação e otimização de dimensionamento das ligações metálicas (em relação às previstas nos 2 projetos abrangidos neste relatório) que ainda não se encontram em fase final de desenvolvimento. Estes 2 projetos em questão são o edifício em Singapura de betão armado com uma cobertura metálica e o novo parque público Koch Quartier em Zurique. Para ambos os projetos, apenas as suas coberturas metálicas foram estudadas no âmbito deste estágio.

**Palavras-Chave:** Modelação de elementos finitos, ligações metálicas, IDEA Statica

## ABSTRACT

Within the scope of this curricular internship, the student is in charge of performing 3D computational modeling of steel connections for the metallic roofs presented in this report using the IDEA Statica software for existing projects, but still in the development phase. The detailing of hollow steel sections, the verification of lateral instability of the elements, the control of bolting or welding and the search for modeling solutions for connections of multiple confluent elements at the same node, are part of the intern's responsibility at this stage. The contracting company, Dr. Neven Kostic GmbH, has been working with other finite element software such as AxisVM for a long time, but intends to make some comparisons with the IDEA Statica software, which also allows the design and dimensioning of metallic connections with different configurations.

The objective of the internship consists not only in the comparative analysis of the results of some metallic connections between the software and/or the potential of both, but mainly in knowing the applicability of IDEA Statica and learning how to use the software for its possible integration in the company. When possible, also simplify and optimize the dimensioning of steel connections (for the 2 projects that are going to be covered in this report) that are not yet in the final stage of development. These 2 projects in question are the reinforced concrete building in Singapore with a steel roof and the new Koch Quartier public park in Zurich. For both projects, only their metallic roofs were studied within the scope of this internship.

**Keywords:** Finite elements modeling, steel connections, IDEA Statica

---

## ÍNDICE

Agradecimentos .....	1
Resumo .....	2
Abstract.....	3
1 Introdução.....	12
1.1 Enquadramento do tema .....	12
1.2 Objetivos do estágio.....	14
1.3 Organização .....	14
2 Metodologias de análise e de dimensionamento de ligações metálicas .....	15
2.1 Normas europeias .....	15
2.2 Modelo de Elementos Finitos Baseado em Componentes.....	16
3 Projeto do edifício em Singapura .....	20
3.1 Apresentação do projeto .....	20
3.2 Modelação das ligações no IDEA Statica por grupos.....	21
3.2.1 Grupo 1 .....	23
3.2.2 Grupo 2 .....	31
3.2.3 Grupo 3 .....	33
3.2.4 Grupo 4 .....	34
3.2.5 Grupo 5 .....	34
3.2.6 Ligação C3.....	35
3.2.7 Ligação C17.....	36
3.2.8 Ligação C25.....	38
3.3 Modelação completa da cobertura no AxisVM .....	39
3.3.1 Desenho e detalhamento dos elementos .....	39
3.3.2 Carregamento.....	41
4 Parque público Koch Quartier.....	43
4.1 Apresentação do projeto .....	43
4.2 Modelação das ligações no IDEA Statica por grupos.....	45
4.2.1 Grupo D1 .....	48

---

4.2.2	Grupo D6 .....	50
4.2.3	Grupo D10 .....	53
4.2.4	Grupo D13 .....	55
4.2.5	Grupo D16 .....	58
4.3	Modelação do grupo D10 no AxisVM .....	60
4.3.1	Desenho e detalhamento dos elementos .....	61
4.3.2	Carregamento.....	62
5	Conclusões .....	65
	Referências bibliográficas .....	68
	Anexo .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – a) Estação Lisboa Oriente; b) Ponde D. Luis I; c) Torre Eiffel; d) Ponte Golden Gate .....	12
Figura 2 – a) Domo da cobertura de EDGE Amsterdam West; b) Modelação de uma das ligações no IDEA Statica (Retiradas do Endereço Web de referência [2]) .....	13
Figura 3 - Representação do conceito de discretização (Retirado do apontamento de Modelação e Análise Computacional por Elementos Finitos, Tankova, 2021) [4] .....	16
Figura 4 - Componentes de uma ligação metálica com chapas de topo aparafusadas, representadas por molas [5] .....	18
Figura 5 – a) Modelo 3D da ligação (MEF); b) Resultados da verificação de segurança da componente dos parafusos pelo Eurocódigo 3 .....	18
Figura 6 – Exemplo de criação de uma secção transversal genérica, com a configuração pretendida .....	19
Figura 7 – Modelo global do projeto desenvolvido no software AxisVM .....	20
Figura 8 – Numeração das ligações metálicas .....	21
Figura 9 – Diagrama de esforços My da cobertura metálica .....	23
Figura 10 – Tensões de Von Mises máximas nas secções transversais .....	23
Figura 11 – Modelo da ligação C1 para o Grupo 1 .....	24
Figura 12 – Criação da secção transversal U900 no IDEA Statica .....	24
Figura 13 – Dados da secção transversal do perfil U 900 .....	25
Figura 14 – Modelo inicial da ligação C1 para o Grupo 1 sem qualquer operação .....	26
Figura 15 – Ilustração da operação ‘Cut’ no IDEA Statica .....	27
Figura 16 – Ilustração da operação ‘Bolt Grid’ no IDEA Statica .....	27
Figura 17 – Diagrama de momentos My para ligação C5 (Grupo 1) .....	28
Figura 18– Tabela de forças internas do elemento B33 obtido no AxisVM .....	28
Figura 19 – a) Convenção de sinais no software AxisVM [6]; b) Convenção de sinais no software IDEA Statica [4] .....	29
Figura 20 – Resultado da análise da ligação C1 para o Grupo 1 em ELU .....	30
Figura 21 – Resultados detalhados da análise na aba ‘Check’ para o modelo do Grupo 1 a) Modelo 3D da ligação; b) Resultados da verificação de segurança da componente das ancoragens .....	30
Figura 22 – Modelação da ligação C7 para o Grupo 2 .....	31
Figura 23 – Representação em corte da inclinação das vigas secundárias em relação à viga principal HEM 900 (unidades em milímetros) .....	32
Figura 24 – Resultados da análise da ligação C7 para o Grupo 2 em ELU .....	32
Figura 25 – Modelação da ligação C18 para o Grupo 3 .....	33
Figura 26 – Resultados da análise da ligação C18 para o Grupo 3 em ELU .....	33
Figura 27 – Modelação da ligação C2 para o Grupo 4 .....	34

Figura 28– Resultados da análise da ligação C2 para o Grupo 4 em ELU.....	34
Figura 29 – Modelação da ligação C24 para o Grupo 5 .....	35
Figura 30 – Resultados da análise da ligação C24 para o Grupo 5 em ELU.....	35
Figura 31 – Resultados da análise da ligação C3 em ELU.....	35
Figura 32 – Modelação da ligação C3 .....	36
Figura 33 – Modelação da ligação C17 .....	36
Figura 34 – Resultados da análise da ligação C17 em ELU.....	37
Figura 35– Resultados da análise da ligação C17 em ELU (sem excentricidades impostas) ..	37
Figura 36 – Modelação da ligação C25 .....	38
Figura 37 – Resultados da análise da ligação C25 em ELU.....	38
Figura 38 – Modelação 3D da cobertura metálica com elementos finitos .....	39
Figura 39 – Definição dos apoios de superfície para os elementos U900 apoiados em betão .	40
Figura 40 – a) Definição das ancoragens; b) Apoio da ligação C17 .....	40
Figura 41 – Modelação das ancoragens com os elementos vigas de betão .....	41
Figura 42 - a) Sobrecargas no modelo de elementos finitos; b) Sobrecargas no modelo de barras .....	42
Figura 43 – Modelo global da estrutura metálica da cobertura .....	43
Figura 44 – Deformada resultante da estrutura .....	44
Figura 45 - Vista em perfil da cobertura metálica do projeto Koch .....	44
Figura 46 – Numeração das ligações metálicas para o projeto Koch .....	45
Figura 47 – Diagrama de momentos $M_y$ da cobertura metálica.....	46
Figura 48 – Tensões de Von Mises máximas nas secções transversais .....	46
Figura 49 – a) Detalhamento do Grupo D8; b) Detalhamento do Grupo D12 .....	47
Figura 50 – a) Corte 10 - 10 referente à Figura 44 – a); b) Corte 17 - 17 referente à Figura 44 – b).....	47
Figura 51 – Modelação das sapatas .....	48
Figura 52 - Análise da segurança inicial ao esforço de corte no bloco de betão da sapata sem o ‘Shear Lug’ .....	49
Figura 53 - Resultados da análise das sapatas dos pilares para o Grupo D1 em ELU .....	50
Figura 54 – Modelação da ligação C20 para o Grupo D6 .....	50
Figura 55 – Chapa metálica (laranja) soldada entre perfis quadrados.....	51
Figura 56 – Parâmetros da operação ‘Gusset – truss members’ .....	52
Figura 57 – Mapa de tensões instaladas na ligação C20 para o Grupo D6 em ELU.....	52
Figura 58 – Modelação da ligação C11 para o Grupo D10 .....	53
Figura 59 – a) Edição da geometria de chapas metálicas de contato com os varões; b) Edição da geometria de chapas metálicas de contato com as vigas diagonais .....	53
Figura 60 – Comparação da ligação 11 nos modelos globais: a) inicial; b) modificado.....	54
Figura 61 - Resultado da análise da ligação C11 para o Grupo D10 em ELU .....	55
Figura 62 – Modelação da ligação 26 para o Grupo D13.....	55

---

Figura 63 - Criação de uma secção transversal genérica, com a configuração pretendida para simulação do VKT 140.....	56
Figura 64 – a) Detalhamento de Kopf_1; b) Modelação de Kopf_1 no IDEA Statica.....	56
Figura 65 – Geometria da chapa conectora dos varões inclinados.....	57
Figura 66 - Resultados da análise da ligação C26 para o Grupo D13 em ELU .....	58
Figura 67 - Modelação da ligação C31 para o Grupo D16.....	58
Figura 68 – a) Detalhamento de Kopf_1; b) Modelação de Kopf_1 no IDEA Statica.....	59
Figura 69- Resultados da análise da ligação 31 para o Grupo D16 em ELU .....	60
Figura 70 - Modelação 3D da ligação metálica C11 com elementos finitos.....	60
Figura 71 – Vista renderizada em 3D da ligação C11 .....	62
Figura 72 – Representação dos ‘Rigid Links’ .....	62
Figura 73 - Tensões de Von Mises instaladas nos parafusos .....	63
Figura 74 – Mapa de cores das tensões de Von Mises na secção central dos elementos .....	64
Figura 75 - Mapa de cores das tensões das tensões principais na secção central dos elementos .....	64
Figura 76 - Resultado da enquete (IDEA Statica Webinar - 27.04.2022; aos 36 min : 25s)....	65
Figura 77 - Erro por defeito do software na modelação da ligação C11 (Koch).....	66

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Forças internas dos elementos no IDEA Statica.....	30
Tabela 2 – Dados dos casos de carga .....	41
Tabela 3 - Ligações metálicas mais condicionantes para o dimensionamento de cada grupo do projeto Koch .....	45
Tabela 4- Propriedades dos materiais .....	61

## **ABREVIATURAS**

MEF – Método dos Elementos Finitos

CBFEM - Component Based Finite Element Model

ELU – Estado Limite Último

SZS – Stahlbau Zentrum Schweiz

SIA – Schweizerischer ingenieur- und architektenverein

BIM - Building Information Modeling

CEN – Comité Europeu de Normalização

UE – União Europeia

EFTA – European Free Trade Association

EN – European Norms

---

## SIMBOLOGIA

$S_{x,i}$  – Tensão normal de deformação  
 $N_x$  – Esforço axial  
 $A_x$  – Área da secção transversal  
 $M_x$  – Momento em x (torção)  
 $M_y$  – Momento em y  
 $M_z$  – Momento em z  
 $I_y$  – Momento de inércia em y  
 $I_z$  – Momento de inércia em z  
 $I_{yz}$  – Momento de inércia em yz  
 $y_i$  – Coordenadas do ponto de tensão em y  
 $z_i$  – Coordenadas do ponto de tensão em z  
 $V_{y,i}$  – Componente da tensão de cisalhamento em y na secção i  
 $V_{z,i}$  – Componente da tensão de cisalhamento em z na secção i  
 $\Phi_y$  – Função de tensão de cisalhamento em y  
 $\Phi_z$  – Função de tensão de cisalhamento em z  
 $\omega$  – Função de deformação  
 $S_{o,i}$  – Tensão de Von Mises na secção i  
 $\sigma_{Ed}$  – Tensão atuante  
 $\gamma$  – Fator de segurança para ELU  
 $Q_{vento}$  – Carga do vento  
 $Q_{neve}$  – Carga da neve  
 $PE_{varões}$  – Pré esforço instalado nos varões  
 $Sob$  – Sobrecargas

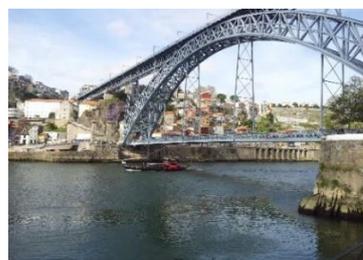
# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do tema

A competitividade das estruturas metálicas vem crescendo consideravelmente na área de engenharia civil por diversas razões. Dentre estas, pode-se citar algumas vantagens no âmbito da economia e da sustentabilidade. O aço reduz consideravelmente os níveis de poluição sonora nas áreas de construção e a área de ocupação dos estaleiros. Além disso, conforme citado por A.D Simões (2014) [1], o aço é um material que pode ser reciclado várias vezes sem perder as suas propriedades, que levam à concepção de estruturas com esbelteza considerável e consequentemente a minimização dos custos de transporte e montagem. Como exemplo de estruturas metálicas clássicas ao redor do mundo, pode-se citar a estação Oriente em Lisboa, a ponte D. Luís I no Porto, Torre Eiffel em França e a ponte Golden Gate nos Estados Unidos (ver Figura 1). Mais especificamente sobre o impacto das ligações metálicas na economia de um projeto, pode referir-se que estas têm uma influência direta no custo global, bem como no comportamento de uma estrutura. Para minimizar os custos, deve ter-se em consideração alguns aspetos como: evitar sempre que possível as ligações por soldaduras em obra, otimização do equipamento de montagem e facilidade de acesso a zonas de solda e/ou aparafusamento. Cabe ao engenheiro projetista a definição da solução destes problemas estruturais e económicos de forma a garantir a segurança necessária da estrutura, sempre de acordo com as normas locais aplicáveis e respeitando todos os condicionalismos impostos pela arquitetura da obra.



a)



b)



c)



d)

Figura 1 – a) Estação Lisboa Oriente; b) Ponte D. Luis I;  
c) Torre Eiffel; d) Ponte Golden Gate

Em resposta ao avanço da ciência por trás da engenharia civil e também à maior complexidade dos projetos arquitetônicos, surge a evolução computacional aplicada nessas áreas. Atualmente é fundamental para um engenheiro projetista a familiaridade com alguns dos programas e softwares disponíveis no mercado, não só pela facilidade e rapidez de construção dos modelos estruturais durante a fase de desenvolvimento de um projeto, mas também pelo alto nível de fiabilidade no cálculo computacional.

Um exemplo atual de uma estrutura complexa, que de certa forma obrigou a utilização de softwares para o dimensionamento das ligações metálicas, é o domo na cobertura do edifício EDGE Amsterdam West (ver Figura 2). Pelas próprias palavras do engenheiro projetista neerlandês Alexander van Beelen:

“Alguns desses cálculos não são realmente possíveis à mão. Quando você tem uma única viga para fazer a ligação, é fácil — você tem um caso de carga, uma situação. Mas quando você tem oito vigas se juntando com forças e momentos diferentes em todas as direções... Sem o IDEA Connection, eu não teria conseguido calcular alguns nós ou ligações com a mesma confiabilidade e precisão.” [2]

Com o EDGE Amsterdam West, o gabinete de projetos ASK Romein ganhou o prêmio IDEA Statica Excellence Award em 2021 na categoria de Grandes Edifícios. Hoje, o EDGE Amsterdam West é um lugar onde história, tecnologia e arquitetura moderna se encontram para se tornar um ambiente de escritório sustentável e inspirador.



**Figura 2 – a) Domo da cobertura de EDGE Amsterdam West;  
b) Modelação de uma das ligações no IDEA Statica (Retiradas do Endereço Web de referência [2])**

## 1.2 Objetivos do estágio

Conforme citado anteriormente, um dos objetivos deste estágio é aprender e desfrutar ao máximo do que o software IDEA Statica tem a oferecer em termos de verificação de segurança das ligações metálicas e avaliação de alguns resultados obtidos pelo CBFEM. Caberá posteriormente à empresa a decisão de implementar este software nas suas licenças e a futura utilização do mesmo em projetos de estruturas metálicas.

Virão a ser abordados 2 projetos em desenvolvimento na empresa, que ainda não se encontram em fase final, com alguma margem de aprimoramento das ligações metálicas. Tais ligações a serem estudadas, em ambos projetos, integram-se nas coberturas metálicas presentes nos mesmos. Os projetos aqui em questão são o edifício em Singapura de betão armado com uma cobertura metálica e o parque público Koch Quartier em Zurique, Suíça

## 1.3 Organização

O estudo das ligações metálicas dos projetos da empresa será feito no software IDEA Statica, especializado no cálculo e dimensionamento de ligações metálicas. Para melhor compreensão da marcha de cálculo e procedimentos envolvidos para a verificação de segurança das ligações metálicas, este relatório está subdividido nos seguintes capítulos:

No Capítulo 2 é feita uma breve revisão teórica sobre os métodos adotados pelo IDEA Statica para a verificação da segurança de ligações metálicas e sobre o Eurocódigo 3, que contém os critérios de dimensionamento incorporados no software em questão.

O Capítulo 3 aborda o projeto do edifício em Singapura, contendo uma breve introdução sobre o projeto em si, para além do detalhamento das suas ligações metálicas dimensionadas pelo CBFEM no IDEA Statica. Apresentam-se algumas das dificuldades iniciais e eventualmente a necessidade de se recorrer a outros métodos e programas computacionais para análise das ligações metálicas em estudo.

O Capítulo 4 contém o projeto do parque público em Koch com a mesma estrutura do Capítulo 3, iniciando-se com a introdução do projeto e depois o dimensionamento das ligações metálicas no IDEA Statica (CBFEM) e, posteriormente, uma das ligações no AxisVM (MEF).

Por fim, o Capítulo 5 contém as conclusões obtidas ao longo do período de estágio relativamente ao software IDEA Statica quanto aos seguintes fatores: fiabilidade, facilidade de uso, otimização do tempo, suas limitações e algumas comparações de potencialidades com o software AxisVM.

---

## 2 METODOLOGIAS DE ANÁLISE E DE DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES METÁLICAS

### 2.1 Normas europeias

No que toca a análise dos elementos metálicos, em alguns locais na estrutura como as juntas soldadas, ligações aparafusadas, altura de afunilamento da secção transversal e cargas pontuais, podem ser difíceis e requerer consequentemente uma atenção especial. O comportamento destes é não linear e as não linearidades devem ser respeitadas, como por exemplo: cedência do material das chapas; contacto entre chapas de extremidade ou chapa de base e bloco de betão; ações unilaterais de parafusos e âncoras; cordões de soldadura.

Para tal, existem códigos de projeto, como por exemplo o EN1993-1-8, que oferecem métodos analíticos para a solução destes problemas. Sua característica geral é a derivação para formas estruturais típicas e com carregamentos simples. Para estes cenários, o método das componentes é muito utilizado, segundo qual o comportamento de uma ligação é o resultado da interação entre as diversas componentes que a constituem. Dentre as 20 componentes básicas das juntas apresentadas no quadro 6.1 do EN1993-1-8, pode-se citar, por exemplo: o painel de alma de coluna solicitado ao corte, alma de coluna em compressão transversal, alma de coluna em tração transversal, banzo de coluna em flexão, etc.

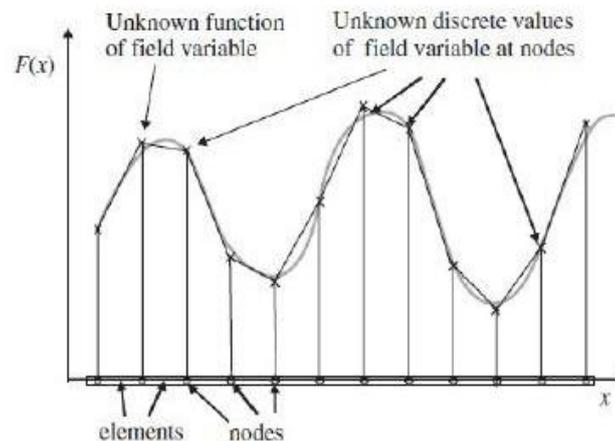
#### Antecedentes do Programa dos Eurocódigos:

Em 1975, a Comissão da Comunidade Europeia optou por um programa de ação na área da construção, baseado no artigo 95º do Tratado. O objetivo do programa era a eliminação de entraves técnicos ao comércio e a harmonização das especificações técnicas. No âmbito deste programa de ação, a Comissão tomou a iniciativa de elaborar um conjunto de regras técnicas harmonizadas para o projeto de obras de construção, as quais, numa primeira fase, serviriam como alternativa para as regras nacionais em vigor nos Estados-Membros e que, posteriormente, as substituiriam. Durante quinze anos, a Comissão, com a ajuda de uma Comissão Diretiva com representantes dos Estados-Membros, orientou o desenvolvimento do programa dos Eurocódigos, que conduziu à primeira geração de regulamentos europeus na década de 80. Em 1989, a Comissão e os Estados-Membros da UE e da EFTA decidiram, com base num acordo entre a Comissão e o CEN, transferir através de uma série de mandatos, a preparação e a publicação dos Eurocódigos para o CEN, tendo em vista conferir-lhes no futuro a categoria de Norma Europeia (EN). Tal, liga, *de facto*, os Eurocódigos as disposições de todas as diretivas do Conselho e/ou decisões da Comissão em matéria de normas europeias. (EN 1993-1-8:2010, p. 9) [3]

A complexidade e fiabilidade das normas europeias fez com que muitos outros países, mesmo que se situem fora do continente europeu, passassem a adotá-las como normas oficiais aplicáveis. Tal é o caso de Singapura, onde se localiza um dos projetos abordados neste relatório. Não obstante, no modelo de barras do AxisVM para a cobertura metálica em Zurique (o segundo projeto abordado neste relatório), foram utilizadas as normas suíças para o dimensionamento global da estrutura, que não se encontram no banco de dados do IDEA Statica, mas apenas os Eurocódigos. Portanto, mesmo que não seja uma prática recorrente em gabinetes de projetos suíços, optou-se por prosseguir com a verificação das ligações metálicas do projeto de Koch no IDEA Statica também com os Eurocódigos, visto que ambas as normas europeias (Eurocódigos) e nacional (SIA) são aceites.

## 2.2 Modelo de Elementos Finitos Baseado em Componentes

Um dos principais conceitos do cálculo numérico destes softwares que possibilitam a modelação estrutural em computadores é o Método dos Elementos Finitos, conforme representado pela Figura 3. Segundo Tankova (2021) [4], este método numérico é implementado dividindo o domínio em pequenos subdomínios de geometria simples, estes que por sua vez são chamados de elementos finitos e consiste na substituição de um problema contínuo (por exemplo, cálculo de uma derivada ou integral) por uma solução aproximada das equações diferenciais governantes que são difíceis de obter analiticamente.



**Figura 3 - Representação do conceito de discretização (Retirado do apontamento de Modelação e Análise Computacional por Elementos Finitos, Tankova, 2021) [4]**

Consequentemente, é de grande interesse da empresa contratante, Dr. Neven Kostic GmbH, a análise de resultados e/ou comparações de softwares de elementos finitos. Destes softwares em questão, têm-se o IDEA Statica, novo software em estudo para a implementação do mesmo, e o AxisVM. Este último já vem a ser utilizado anteriormente pela empresa e possui mais similaridades com o SAP 2000 ou o Robot da Autodesk, visto que permite a modelação global

---

da estrutura, além de também ser possível fazer modelações mais complexas com desenhos manuais de elementos finitos ou criar interligações com outros softwares de especialidades mais específicas. Exemplos destes seriam o próprio IDEA Statica para a modelação de ligações metálicas ou o AllPlan (BIM) para o desenho 3D do modelo. A subdivisão de um domínio geral em partes simples tem diversas vantagens como:

- Representação precisa de geometrias complexas;
- Inclusão de propriedades distintas em materiais dissimilares;
- Identificação de efeitos localizados (concentração de tensões)
- Poupar com modelos físicos de ensaios laboratoriais

De acordo com os apontamentos das aulas de Modelação e Análise Computacional por Elementos Finitos [6], para determinar o equilíbrio e matriz de rigidez global do elemento, as leis físicas conhecidas são então aplicadas a cada subdomínio. A matriz de rigidez global é assemblada garantindo a compatibilidade entre os graus de liberdade dos nós dos elementos adjacentes e as condições de fronteira da estrutura. Todo o processo leva a conjunto de equações algébricas lineares simultâneas para todo o sistema que podem ser resolvidas facilmente para produzir os graus de liberdade nodais necessários.

Como citado anteriormente no capítulo 2.1, apesar do método das componentes ser eficiente para ligações mais recorrentes, este apresenta limitações não só devido à sua natureza analítica, mas também por não abranger outras ligações metálicas com geometrias e cargas generalizadas. A limitação do método das componentes também pode ser justificada pelo não conhecimento do comportamento de algumas componentes, em ligações com geometrias complexas. Não obstante, conforme indicado na introdução ao método CBFEM [5], o IDEA Statica em conjunto com a equipe de projetos do Departamento de Estruturas de Aço e Madeira da Faculdade de Engenharia Civil de Praga e com o Instituto de Estruturas Metálicas e de Madeira da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Tecnologia de Brno, desenvolveu um novo método para projeto avançado de juntas estruturais de aço denominado Modelo de Elementos Finitos Baseado em Componentes, do inglês *Component Based Finite Element Model* (ver Figura 4). Essencialmente o que este método faz é manter maioritariamente o método das componentes e substituir os seus pontos fracos (componentes não conhecidas) pela modelação e análise usando o método dos elementos finitos (MEF). É uma abordagem muito interessante para o dimensionamento de ligações metálicas, pois assim unem-se ambos os métodos mais recorrentes num mesmo modelo. Ou seja: quando a ligação modelada apresentar uma geometria recorrente e que possa ser dimensionada pelo método das componentes, o IDEA Statica adotará

este método analítico para a verificação da segurança. Mas para o caso de uma geometria mais complexa com componentes não conhecidas e que não possam ser dimensionadas pelo método das componentes, o IDEA Statica recorre ao método numérico da modelação de elementos finitos.

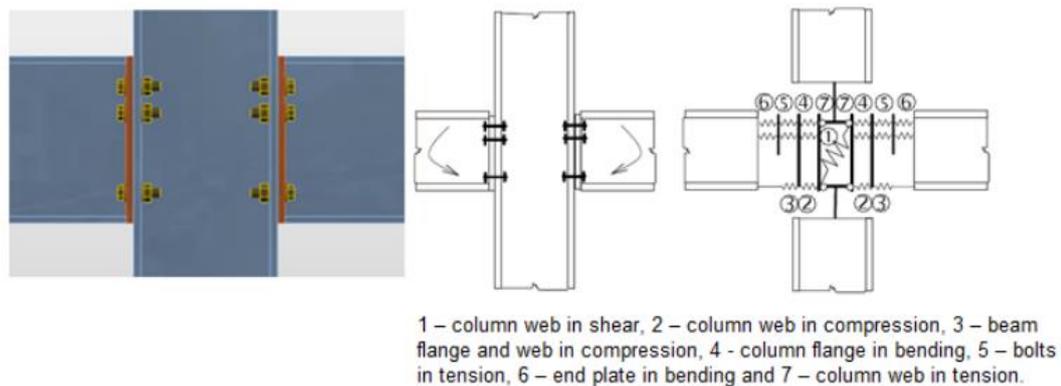


Figura 4 - Componentes de uma ligação metálica com chapas de topo aparafusadas, representadas por molas [5]

Na Figura 5, encontra-se um exemplo de como funciona na prática o método CBFEM do IDEA Statica para o dimensionamento de uma ligação por parafusos genérica entre uma viga e pilar com uma chapa de topo e stiffeners nos banzos inferiores e superiores da viga. Na aba ‘Check’ do software, pode-se encontrar os resultados da análise, onde tem-se o modelo em 3D da ligação com elementos finitos e ao lado encontram-se listadas as verificações de segurança do EN 1993-1-8 feitas pelo método das componentes para os parafusos.

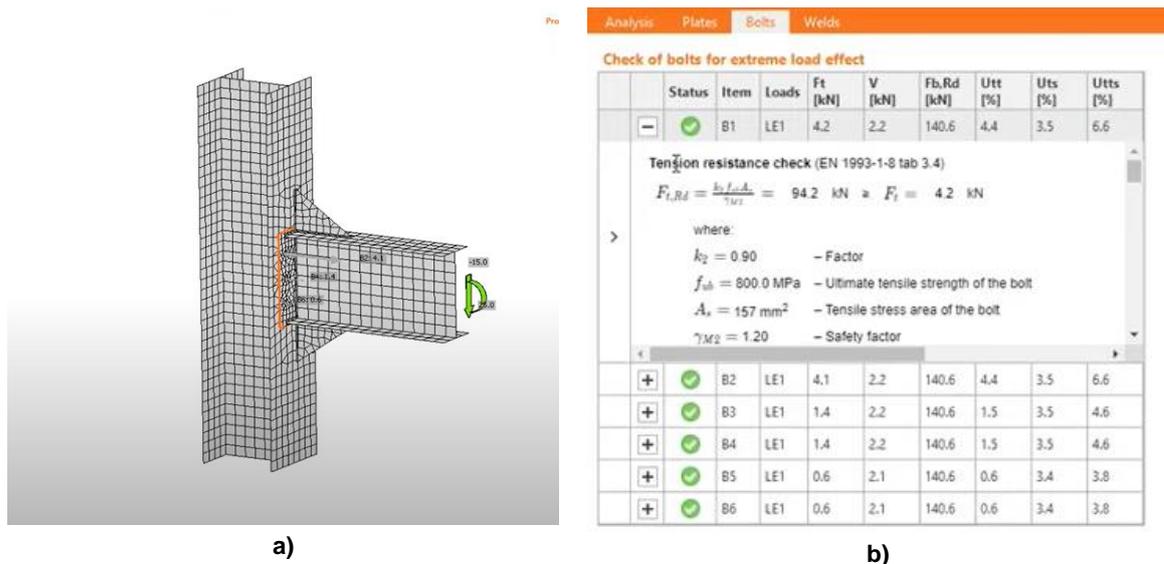


Figura 5 – a) Modelo 3D da ligação (MEF);  
 b) Resultados da verificação de segurança da componente dos parafusos pelo Eurocódigo 3

Além da facilidade de cálculo, o software já vem com um extenso banco de dados de secções transversais dos elementos metálicos. Dentre as secções, alguns exemplos recorrentes a serem citados são:

- Perfis HE e IPE,
- Perfis quadrados, circulares e retangulares ocios (enformados a frio incluídos)
- Varões de aços.

Também existe a possibilidade de criar uma secção transversal genérica, com a configuração pretendida, com a ferramenta inserida no próprio software com muita facilidade, conforme representado pela Figura 6. Como algumas das ligações metálicas em ambos os projetos deste relatório possuem secções transversais que não se encontram no banco de dados do IDEA Statica, esta ferramenta terá grande utilidade para o desenvolvimento do trabalho apresentado neste relatório.

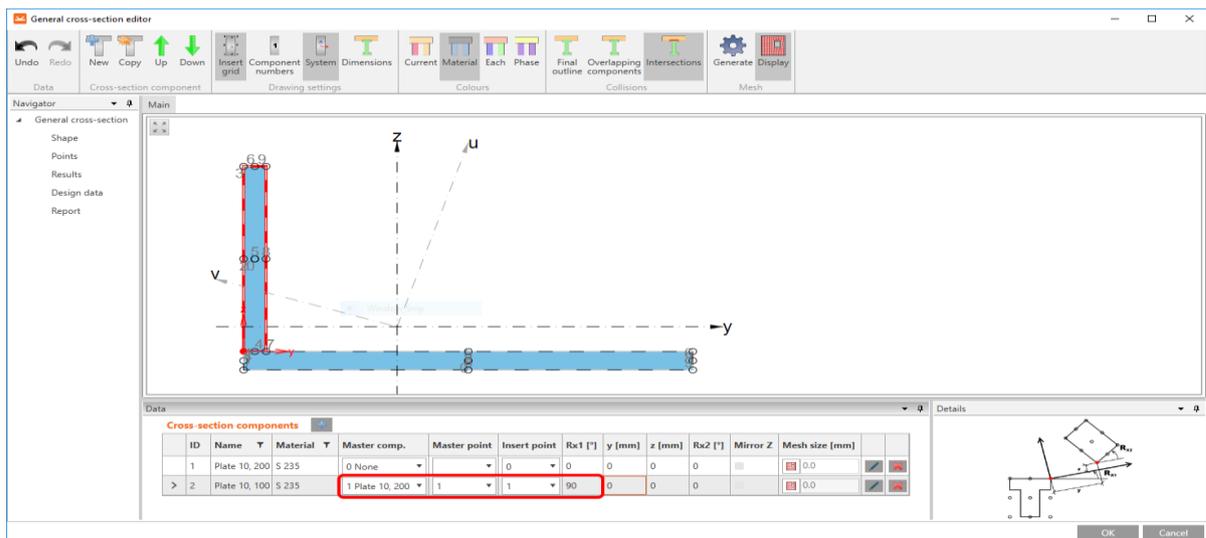


Figura 6 – Exemplo de criação de uma secção transversal genérica, com a configuração pretendida

Apesar do IDEA Statica também permitir interligações com outros softwares para a importação direta das forças internas e das secções transversais, um dos intuitos principais deste estágio também é aprender a usar e desfrutar o IDEA Statica ao máximo, o que inclui modelar os elementos constituintes das ligações metálicas (perfis, chapas e/ou parafusos) desde o princípio e inserir manualmente os valores das forças internas (como ver-se-á mais a frente no capítulo 3.2.1).

### 3 PROJETO DO EDIFÍCIO EM SINGAPURA

#### 3.1 Apresentação do projeto

O primeiro projeto da empresa a ser estudado neste relatório é o edifício em Singapura. A estrutura é constituída maioritariamente em betão armado, mas com uma cobertura metálica (representada em vermelho na Figura 7) a integrá-la. Desta, suas ligações metálicas serão modeladas e analisadas no IDEA Statica. A cobertura tem as dimensões em planta de 26.22 m x 10 m com perfis metálicos de secção em U nos elementos de borda e perfis de secção I nos elementos internos. É importante referir que este projeto se refere uma renovação do edifício já existente e não a construção por completo de um novo. A construção do atual edifício foi concluída em 1987. No entanto, após aproximadamente 35 anos de utilização num clima tropical, tornou-se necessário planear uma renovação para realizar melhorias no edifício para padrões contemporâneos e modernos e adaptando-a para requerimentos funcionais, tecnológicos e de segurança atuais.

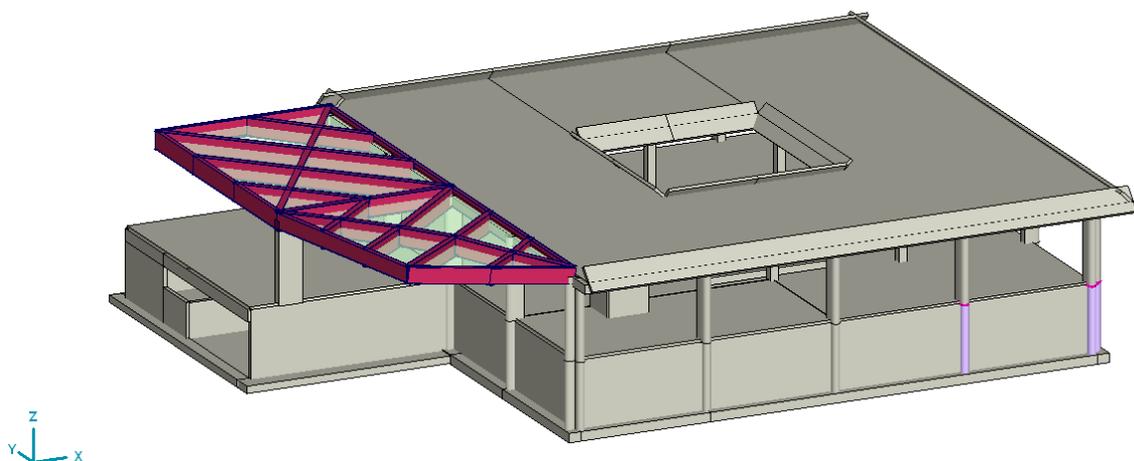


Figura 7 – Modelo global do projeto desenvolvido no software AxisVM

Algumas das considerações iniciais a se fazer no início é o facto de termos a cobertura metálica apoiada numa viga de betão numa de suas arestas de extremidade e noutro lado oposto, apenas um pilar ao meio para conferir suporte extra; caso contrário a cobertura toda funcionaria como um elemento em consola. Como todas as ligações metálicas são feitas por soldaduras, existirá a princípio uma facilidade muito grande em modelar no IDEA Statica com a execução de poucos comandos (como ver-se-á mais a frente no capítulo 3.2.1). Além disso, pode se esperar que o software recorra preferencialmente ao método das componentes, visto que as geometrias das ligações não são muito complexas e são de componentes conhecidas.

### 3.2 Modelação das ligações no IDEA Statica por grupos

As ligações metálicas foram enumeradas de acordo com a Figura 8 para manter organizado a qual ligação cada modelo no IDEA Statica é referente. Para além disso, é importante citar que por uma questão de simplificação e otimização do tempo distendido no projeto, foram modeladas apenas as ligações mais esforçadas para as que apresentavam 1 ou mais outras ligações simétricas. Pois assim, se forem verificados o dimensionamento e a segurança da ligação metálica mais esforçada de um mesmo grupo de ligações onde apresentem exatamente a mesma geometria ou simétrica à mesma, todas as outras automaticamente também estarão seguras.

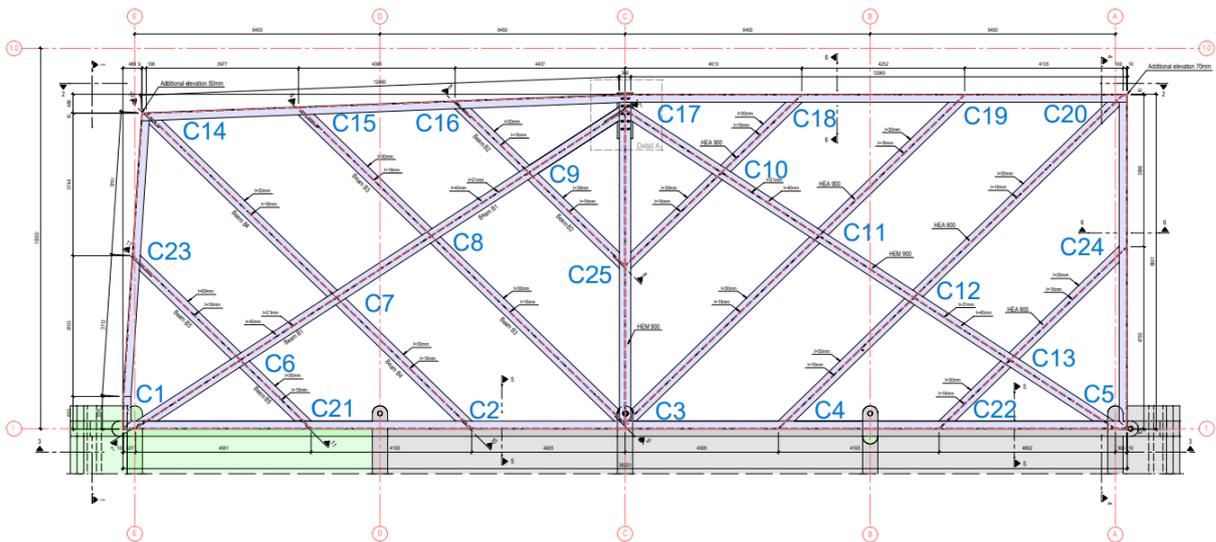


Figura 8 – Numeração das ligações metálicas

A seguir estão listadas as ligações metálicas mais condicionantes para a verificação de segurança relativamente a cada agrupamento conforme indicado na Figura 8:

- Grupo 1: C1 → C1 e C5
- Grupo 2: C7 → C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12 e C13
- Grupo 3: C18 → C14, C15, C16, C18, C19 e C20
- Grupo 4: C2 → C21, C2, C4 e C22
- Grupo 5: C24 → C23 e C24

- C3, C17 e C25 são ligações com geometrias muito particulares que não se enquadram em nenhum outro grupo e, portanto, foram analisadas e dimensionadas individualmente.

No modelo da cobertura no AxisVM, para identificar quais das ligações metálicas eram mais condicionantes para cada um destes grupos, recorreu-se ao diagrama de esforços  $M_y$  (Figura 9) e às tensões de Von Mises máximas nas secções transversais (Figura 10).

#### Critério de cedência de Von Mises:

- Segundo o manual de utilizador do AxisVM [6], a tensão normal de tração/compressão e flexão é calculada de acordo com a expressão:

$$S_{x,i} = \frac{N_x}{A_x} + \frac{M_y I_z + M_z I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2} z_i - \frac{M_z I_y + M_y I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2} y_i \quad (1)$$

onde  $y_i$ ,  $z_i$  são as coordenadas do ponto de cálculo da tensão. Valor de tensão positivo significa tração na secção transversal. A tensão de cisalhamento resultante é calculada a partir de cisalhamento e torção (Saint-Venant), desconsiderando a tensão de cisalhamento de empenamento.

- Para secções transversais de paredes grossas

$$V_i = \sqrt{V_{y,i}^2 + V_{z,i}^2}, \quad (2)$$

onde os componentes da tensão de cisalhamento são:

$$V_{y,i} = \frac{V_y}{A_x} \left( \frac{\partial \Phi_y}{\partial y} \right)_i + \frac{V_z}{A_x} \left( \frac{\partial \Phi_z}{\partial y} \right)_i + \frac{M_x}{I_x} \left[ \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)_i - z_i \right] \quad (3)$$

$$V_{z,i} = \frac{V_y}{A_x} \left( \frac{\partial \Phi_y}{\partial z} \right)_i + \frac{V_z}{A_x} \left( \frac{\partial \Phi_z}{\partial z} \right)_i + \frac{M_x}{I_x} \left[ \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} \right)_i - y_i \right] \quad (4)$$

onde  $\Phi_y$  e  $\Phi_z$  são as funções de tensão de cisalhamento para cisalhamento na direcção  $y$  e  $z$ ,  $\omega$  é a função de deformação.

- Para secções transversais de paredes finas:

$$V_i = \left[ \frac{V_y}{A_x} \left( \frac{\partial \Phi_y}{\partial s} \right)_i + \frac{V_z}{A_x} \left( \frac{\partial \Phi_z}{\partial s} \right)_i + \frac{M_x}{I_x} \left[ \left( \frac{\partial \omega}{\partial s} \right)_i - m_i \right] \right] + \frac{M_x}{I_x} t_i \quad (5)$$

onde os dois últimos termos são a tensão de cisalhamento por torção derivada do fluxo de cisalhamento em subsecções fechadas e abertas.  $m_i$  é a distância do centro de gravidade ao segmento,  $t_i$  é a espessura da parede do segmento.  $\omega$ ,  $\Phi_y$  e  $\Phi_z$  são valores da linha central.

- Por fim, tem-se que a tensão de Von Mises é dada por:

$$S_{o,i} = \sqrt{S_{xi}^2 + 3V_i^2} \quad (6)$$



definidas no banco de dados do IDEA Statica. Numa primeira vista, a Figura 11 representa o que deve vir a ser modelado no software para o primeiro grupo de ligações metálicas.

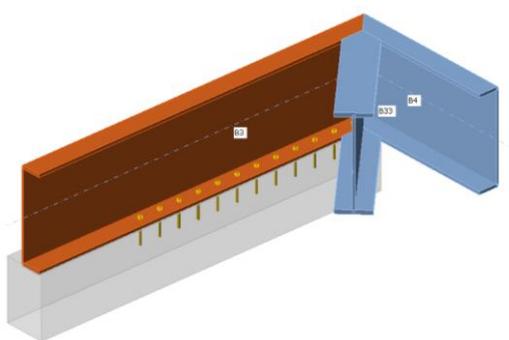


Figura 11 – Modelo da ligação C1 para o Grupo 1

Primeiramente criam-se os elementos e atribui-se a estes as suas respetivas secções transversais (HEM 900 e U900). No entanto, como a secção U900 não está inserida no banco de dados de ambos os softwares (IDEA Statica e AxisVM), recorreu-se à criação de uma nova secção transversal conforme indicado pelas Figuras 12 e 13 para o IDEA Statica e AxisVM, respetivamente. Tais informações relativamente à secção transversal do elemento U900 foram retiradas a partir do banco de dados do modelo global no AxisVM, onde a estrutura foi inicialmente modelada. Após a definição das secções transversais no IDEA Statica, procede-se às operações<sup>1</sup>.

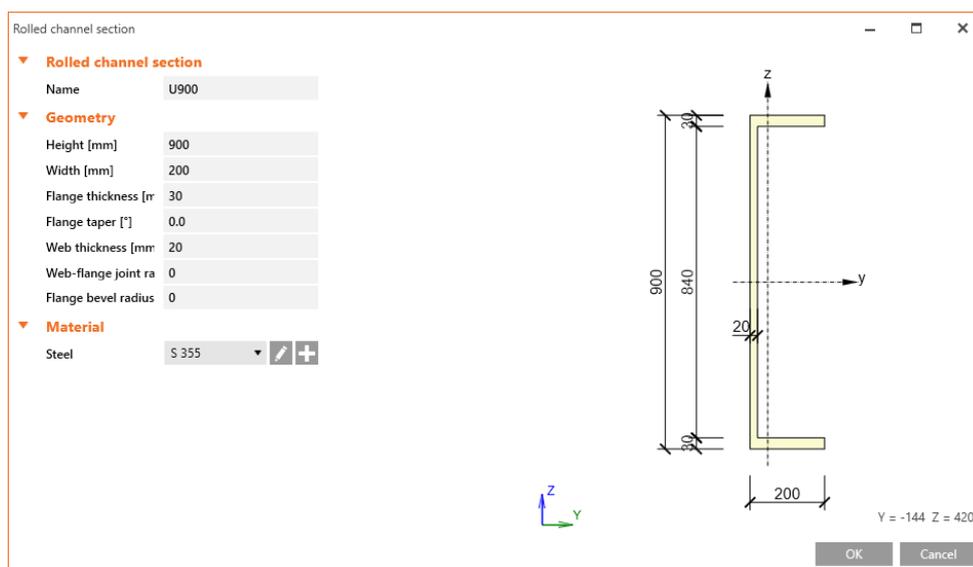


Figura 12 – Criação da secção transversal U900 no IDEA Statica

<sup>1</sup> Conjunto de comandos programados no IDEA Statica para o utilizador executar uma ação.

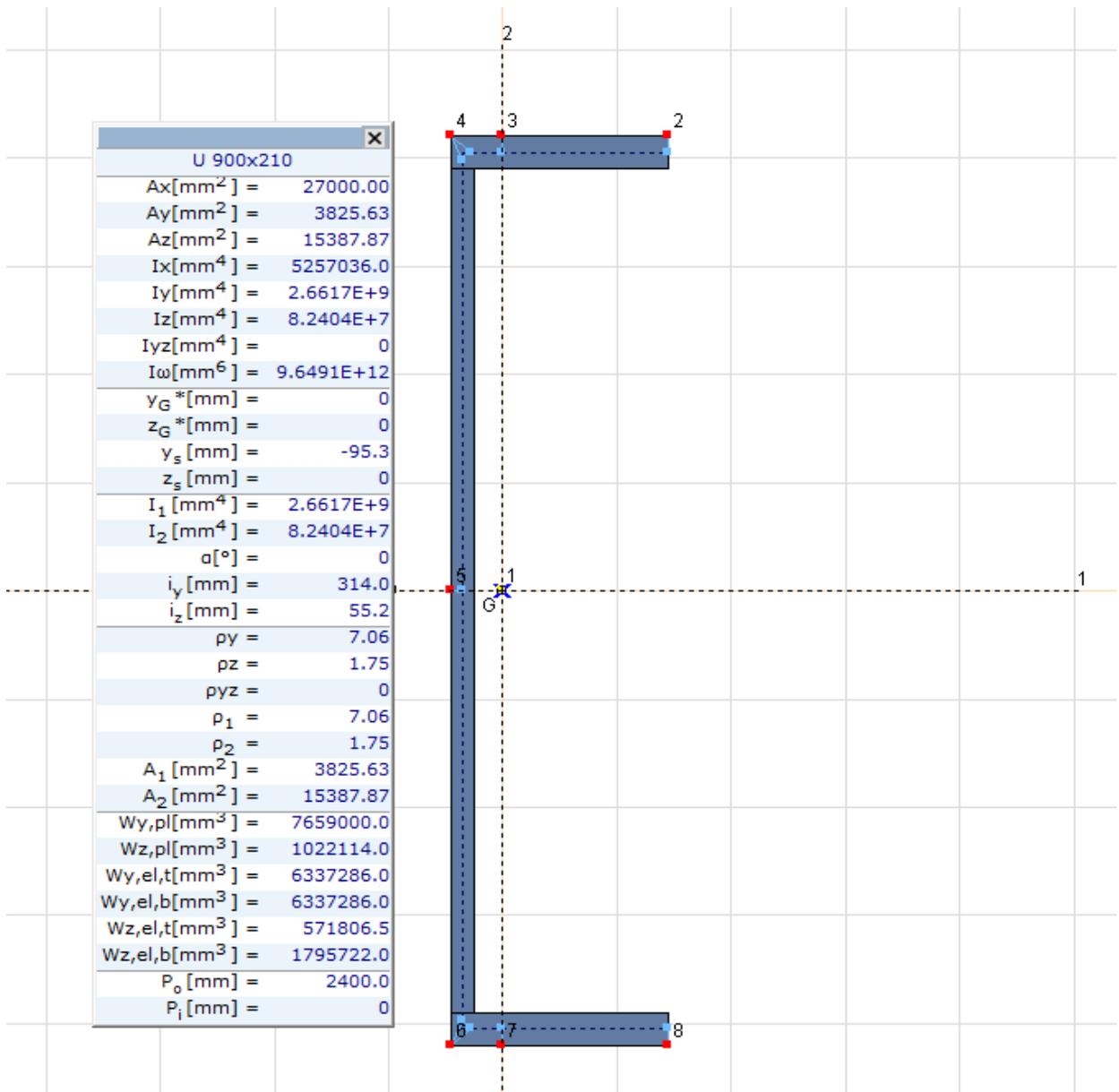
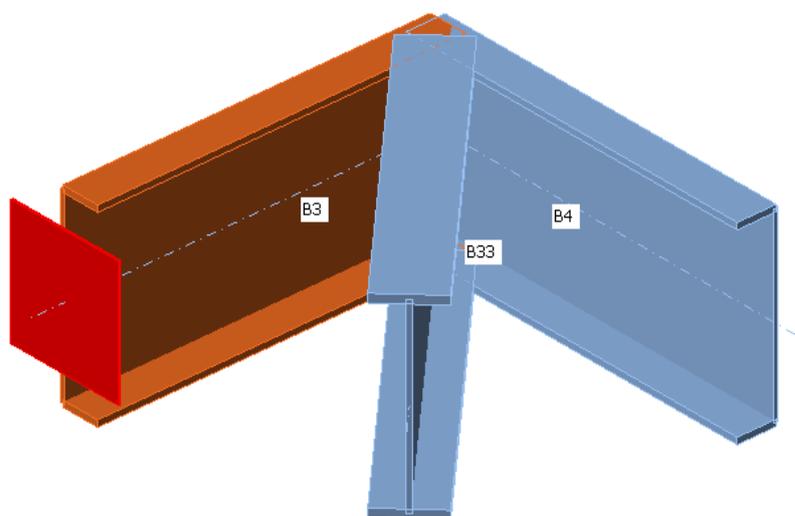


Figura 13 – Dados da seção transversal do perfil U 900

Quando um novo modelo é criado no IDEA Stática, a definição das seções transversais e geometria dos elementos (isto é, os seus posicionamentos e como estes confluem no nó) são informações que, apesar de essenciais, insuficientes para o cálculo e realismo da ligação a ser modelada. Para tal, o software tem um conjunto de operações que o utilizador pode implementar ao modelo para que este tenha a mesma configuração do que está apresentado nos planos e como virá a ser de fato feito na realidade. Caso contrário, o utilizador teria um modelo conforme mostrado a seguir na Figura 14:



**Figura 14 – Modelo inicial da ligação C1 para o Grupo 1 sem qualquer operação**

Quanto às operações que o utilizador pode fazer no IDEA Statica, tem-se listadas a seguir quais foram feitas neste modelo.

- **Cut**

Para este modelo em específico, foram realizados 3 cuts: um para os elementos B3 e B4 mais outros 2 no elemento B33 (ver Figura 15) para com os outros dois elementos. Em cada corte, o software automaticamente impõe uma soldadura entre os elementos. No entanto, ainda dá a liberdade ao utilizador de escolher qual o tipo de soldadura a ser feita, seja uma soldadura de topo, cordão duplo de soldadura ou único (à esquerda ou direita da alma) tal como a definição da espessura destes cordões em milímetros, e também dá a opção de não ter qualquer soldadura entre os elementos. Para a representação da soldadura entre os elementos, numa vista transparente do modelo pode-se notar linhas amarelas nas arestas das almas e banzos dos elementos na Figura 15. Esta é a confirmação visual de que as soldaduras entre os elementos estão de facto corretamente executadas. De acordo com os planos, todos os elementos da cobertura metálica estão completamente soldados entre si. Logo, para todas as ligações modeladas no IDEA Statica, o tipo de solda aplicada foi a do tipo ‘butt weld’ (em português, soldadura de topo).

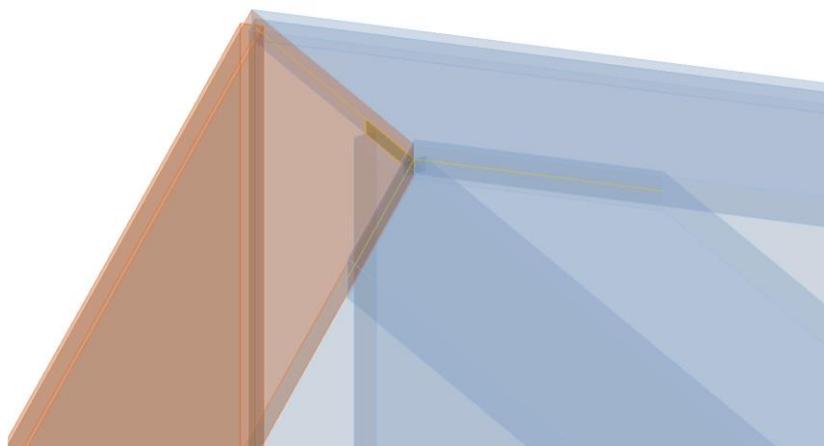


Figura 15 – Ilustração da operação ‘Cut’ no IDEA Statica

- **Bolt Grid**

Com esta operação representada na Figura 16 o utilizador tem a possibilidade de modelar um elemento de betão no qual o *bearing element* pode ser ligado. Nesta, o utilizador pode também introduzir a especificação dos parâmetros necessários, tal como o número, dimensões e classe resistente de ancoragens utilizadas, o espaçamento entre elas e as suas profundidades, as dimensões e classe resistente do elemento de betão e a opção do plano de corte das ancoragens (no liso ou na parte roscada). Após ter definido e executado as operações listadas acima, procede-se à aplicação das forças nodais dos elementos constituintes da ligação metálica modelada. Tais valores, como já citado anteriormente, foram obtidos a partir do modelo global no AxisVM.

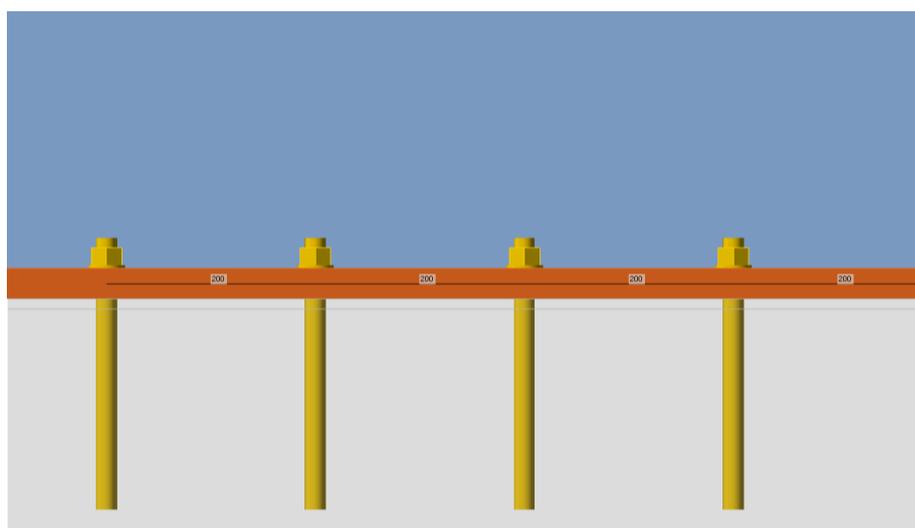


Figura 16 – Ilustração da operação ‘Bolt Grid’ no IDEA Statica

● **Definição de forças nodais**

Para cada elemento, é importante atentar-se aos seus SCL - sistema de coordenadas local (do inglês, LCS - local coordinate system). Os 3 elementos terminam no nó onde será feita a ligação 1. Logo, os esforços analisados para estes elementos têm de corresponder às suas respectivas coordenadas máximas. Na Figura 17 apresenta-se por exemplo o diagrama de momentos My das barras confluentes no nó que virá a ser a ligação 1 e na Figura 18 apresenta-se a tabela de esforços do elemento B33 obtido no AxisVM:

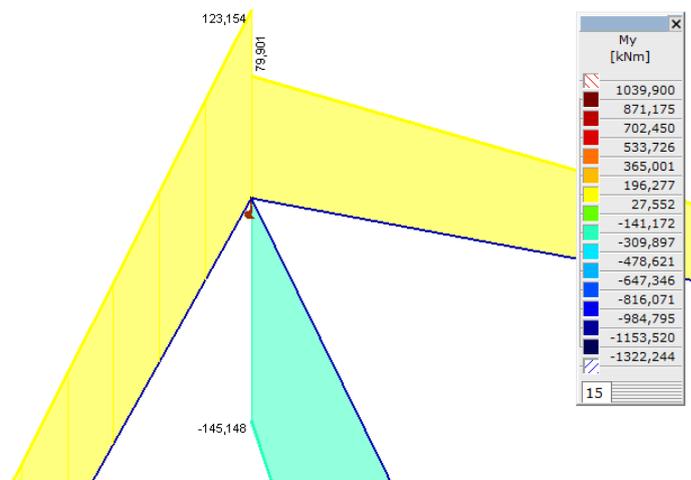


Figura 17 – Diagrama de momentos My para ligação C5 (Grupo 1)

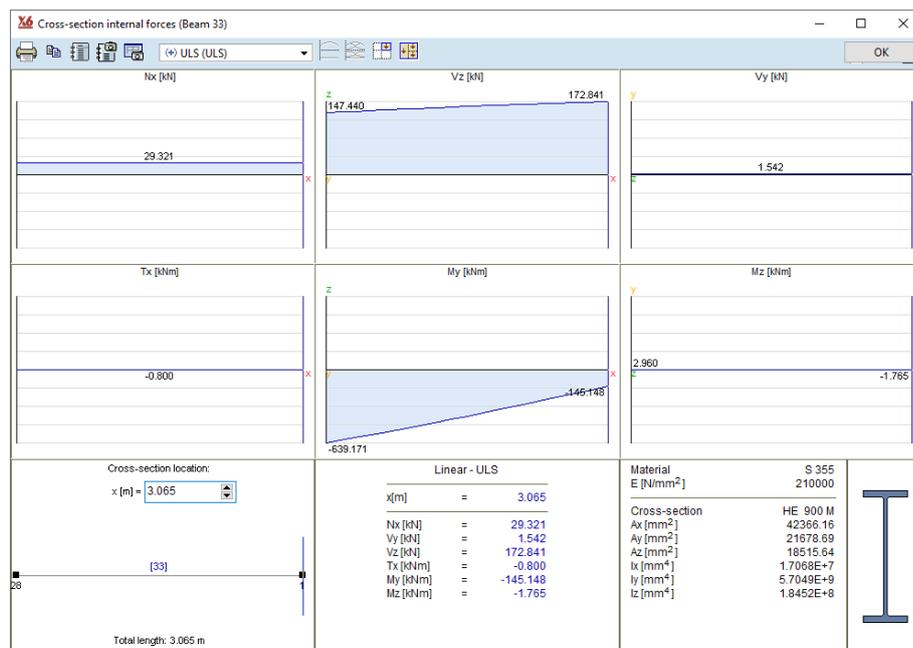


Figura 18– Tabela de forças internas do elemento B33 obtido no AxisVM

Como o processo de introdução das forças internas no IDEA Statica foi feito manualmente, é preciso ter atenção com a convenção de sinais, pois nem sempre os elementos têm os mesmos LCS em cada software e isto pode induzir a erros. Como pode-se notar pelos diagramas de momentos na Figura 17 e os respectivos sinais associados, no software AxisVM tem-se uma diferente convenção de sinais para  $M_y$  daquilo que é habitualmente utilizado na resistência dos materiais, de acordo com Dias da Silva, V. (2004) [7]. Ou seja, para momentos fletores que geram tração nas fibras superiores e compressão nas fibras inferiores, o AxisVM considera como positivo. Logo, momentos fletores que provoquem tração nas fibras inferiores e compressão nas fibras superiores, o AxisVM considera como negativo (ver Figura 19).

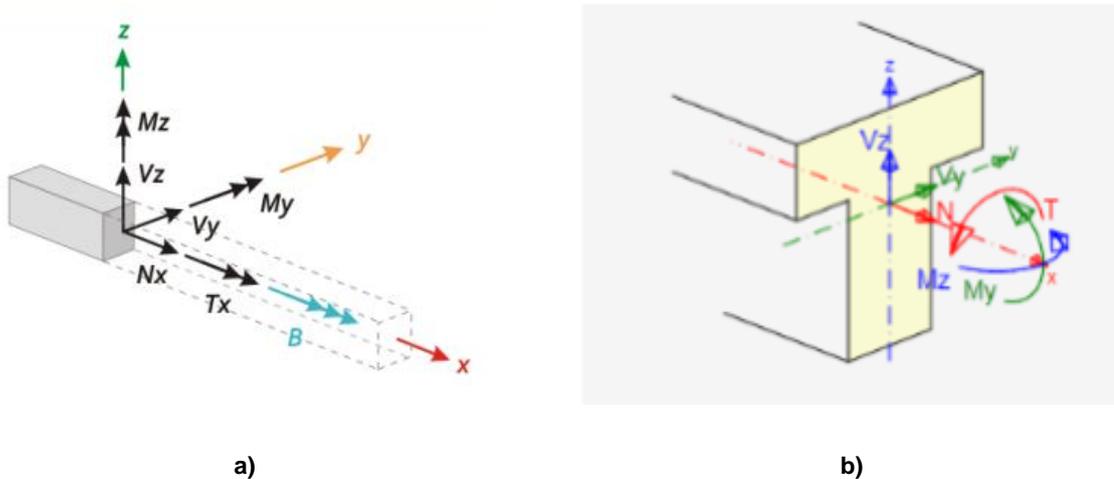


Figura 19 – a) Convenção de sinais no software AxisVM [6];  
b) Convenção de sinais no software IDEA Statica [4]

O AxisVM considera como positivo os vectores que acompanham o mesmo sentido dos seus respectivos eixos. Logo, para os momentos em  $y$ , isto gera compressão nas fibras inferiores e tração nas fibras superiores. Analogamente ao AxisVM, o IDEA Statica também tem os sinais dos momentos definidos de acordo com o sentido dos vetores para os eixos  $x$  e  $z$ : positivo caso o vetor e o seu eixo de coordenada tenham o mesmo sentido ou negativo para o caso contrário. Já para o eixo  $y$ , o sinal do momento segue a mesma convenção da resistência dos materiais. Portanto, o utilizador deve guiar-se pelas flechas das forças representadas no modelo do IDEA Statica para garantir que os seus efeitos sobre o elemento sejam os mesmos do modelo global. Na Figura 19 ilustrando as convenções de sinais do AxisVM tem-se as flechas representativas das suas forças internas e o seu SCL. Pode-se notar que o momento em  $z$  traciona as fibras à esquerda e comprime as fibras à direita. Já o momento em  $y$ , traciona as fibras superiores e comprime as fibras inferiores. Os valores das forças internas para o elemento B33 encontram-se a seguir na Tabela 1.

Tabela 1 – Forças internas dos elementos no IDEA Statica

Member	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B4 / End	18.1	-1.4	-65.7	-1.9	-79.9	3.5
B3 / End	22.2	0.6	-40.1	-0.1	123.2	1.8
> B33 / End	-29.3	-1.5	-172.8	-0.8	-145.0	1.8

• **Análise de tensão-deformação não linear dos materiais**

Como pode-se ver pela Figura 20, as ancoragens não verificam a segurança, pelo que estão solicitadas mais que a totalidade da sua capacidade resistente. Na aba ‘Check’ do software, é possível analisar detalhadamente o processo de cálculo do software baseado no Eurocódigo e encontrar o problema de verificação à segurança (ver Figura 21).

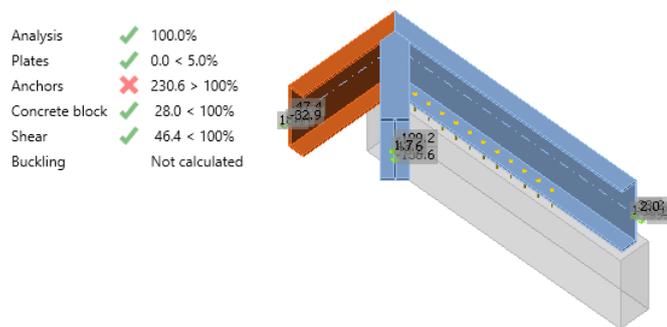


Figura 20 – Resultado da análise da ligação C1 para o Grupo 1 em ELU

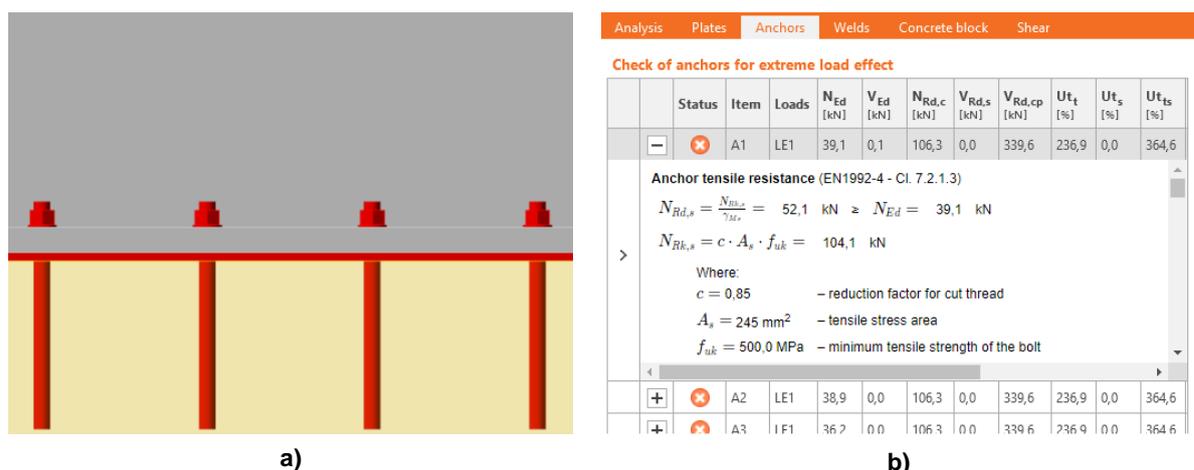


Figura 21 – Resultados detalhados da análise na aba ‘Check’ para o modelo do Grupo 1  
 a) Modelo 3D da ligação;  
 b) Resultados da verificação de segurança da componente das ancoragens

Apesar do IDEA Statica nos informar onde a verificação de segurança não cumpre com os parâmetros do Eurocódigo, exportar relatórios num formato pré-definido e ainda assinalar os elementos em falha, com um pouco de senso crítico pode-se perceber que não é muito condizente com o cenário esperado para este modelo. As secções transversais do modelo são de grandes dimensões, têm aço com uma resistência considerável com tensão de cedência de 355 MPa e as forças internas apresentadas pela Tabela 1 também não apresentam valores muito significativos que justificariam a falha de verificação de segurança da ligação metálica modelada. Para além disso, o software não dá ao utilizador a possibilidade de modelar as armaduras dos elementos de betão, o que resulta consequentemente numa análise conservadora. Mais a frente no capítulo 3.3 será visto num modelo completo da cobertura metálica em elementos finitos feito no AxisVM que de facto as tensões instaladas nas ancoragens não são as mesmas e com um grau de precisão muito maior.

### 3.2.2 Grupo 2

Para o Grupo 2, a ligação metálica mais condicionante é a C7. A modelação desta foi particularmente fácil, visto que se trata de uma ligação puramente metálica com poucos elementos e, portanto, poucas operações que o utilizador tem de fazer.

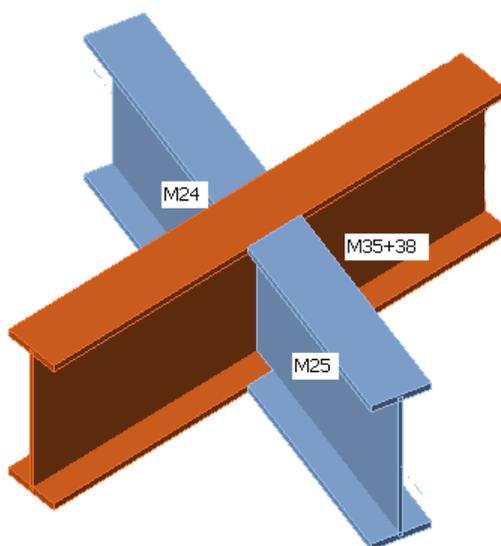
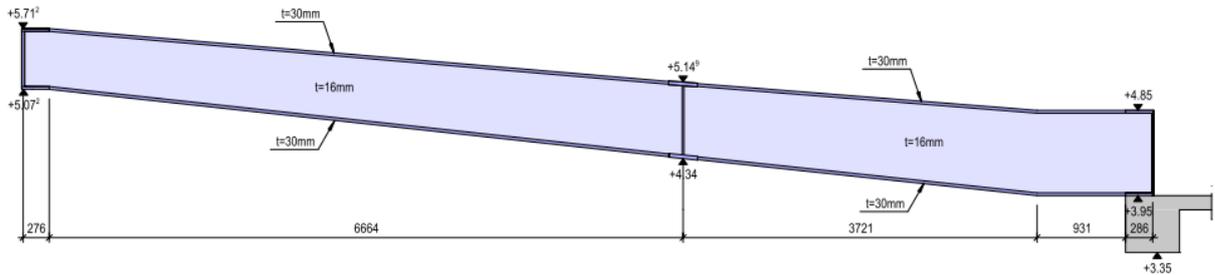


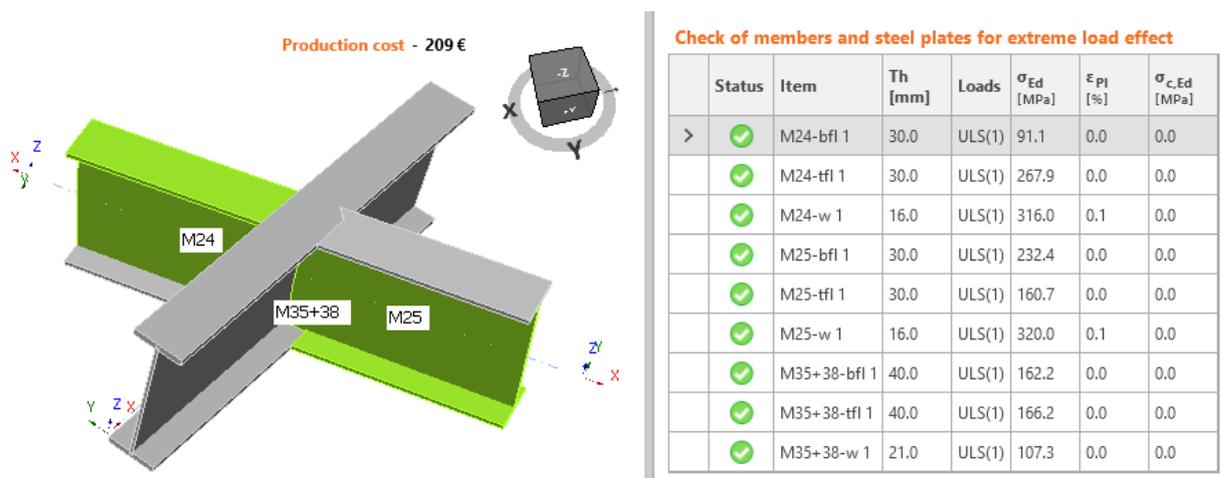
Figura 22 – Modelação da ligação C7 para o Grupo 2

Apenas 2 operações do tipo ‘Cut’ nos elementos M24 e M25 com a viga principal em laranja, que representa as vigas M35 e M38. Não obstante, para esta ligação há um pormenor que deve ser levado em consideração: as vigas M24 e M25 têm um ligeiro grau de inclinação em relação à viga M35+38, conforme representado pela Figura 23.



**Figura 23 – Representação em corte da inclinação das vigas secundárias em relação à viga principal HEM 900 (unidades em milímetros)**

Portanto, para uma maior facilidade de levar em consideração desta inclinação das vigas secundárias, ao invés de se fazer o modelo desde o princípio no IDEA Statica e introduzir manualmente os valores das forças internas, recorreu-se ao plugin no AxisVM para importar diretamente os elementos para o IDEA Statica, juntamente com as suas geometrias, secções transversais e forças internas. Por uma questão de simplificação, esta ligação metálica até poderia ter sido manualmente modelada no IDEA Statica sem considerar estas inclinações já que não têm um valor muito grande. Não obstante, o mesmo não pode ser dito a respeito das suas forças internas. Como os valores das forças são muito grandes, tendo até mesmo momentos de 1150 kNm, uma ligeira diferença nas excentricidades e inclinações teriam um grande impacto no balanceamento das forças internas e possivelmente também na verificação de segurança da ligação. Por fim, tem-se abaixo na Figura 24 o resultado da análise para o Grupo 2.



**Figura 24 – Resultados da análise da ligação C7 para o Grupo 2 em ELU**

### 3.2.3 Grupo 3

Analogamente ao Grupo 1, teve de ser criada para o Grupo 3 (Figura 25) uma secção transversal para o elemento U900 com o mesmo procedimento representado pela Figura 12 para a viga B2. Para a viga B39 (em azul na Figura 25), sua secção transversal é um HEM 900 já presente no banco de dados do IDEA Statica (conforme citado anteriormente). Mais uma vez a operação ‘Cut’ com butt weld foi aqui utilizada para ligar o elemento B39 ao elemento B2 (em laranja na Figura 25). É importante referir mais uma vez que todos os elementos desta cobertura estão totalmente soldados entre si. Ou seja, para todas as operações do tipo ‘Cut’ os elementos estarão ligados entre si por uma solda do tipo butt weld. Após introduzir os valores das forças internas e verificar que todas as cargas se encontram em equilíbrio, procede-se à análise de segurança desta ligação metálica representada pela Figura 26.

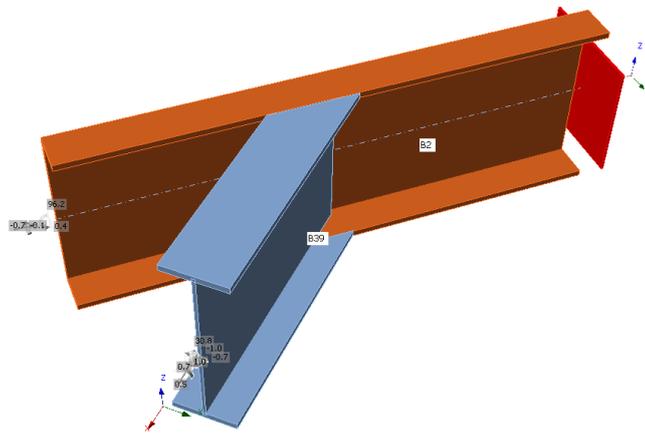


Figura 25 – Modelação da ligação C18 para o Grupo 3

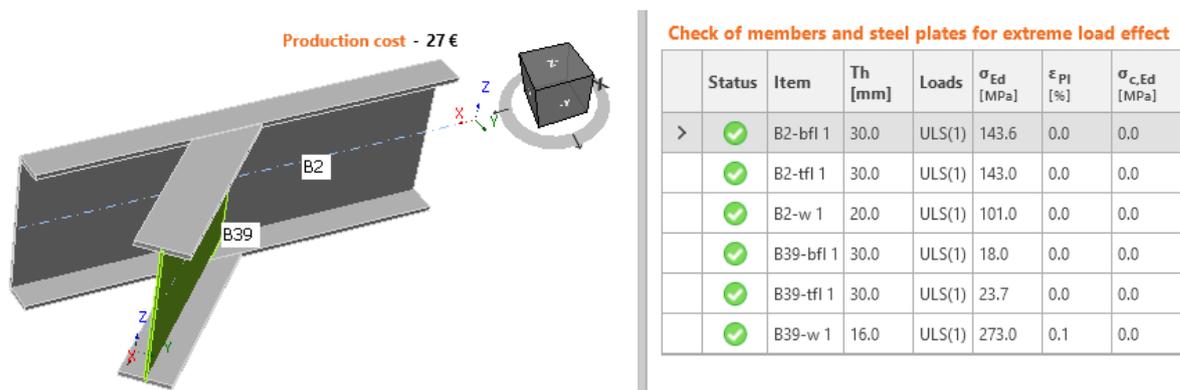


Figura 26 – Resultados da análise da ligação C18 para o Grupo 3 em ELU

### 3.2.4 Grupo 4

Em termos de geometria, o Grupo 4 (Figura 27) é muito semelhante ao Grupo 3. Não obstante, pelo facto deste grupo de ligações ter um elemento de betão, é necessário fazer a distinção entre os mesmos. Analogamente ao Grupo 1, executa-se a operação ‘Anchor Grid’ para criar um bloco de betão e fazer a ancoragem do elemento B3 (em azul na Figura 27) ao mesmo e também a operação ‘Cut’ para a ligação do elemento B18 (em laranja na Figura 27) ao elemento B3. Para o caso deste grupo em específico, ao contrário dos resultados apresentados do Grupo 1, a segurança é verificada pelo IDEA Statica.

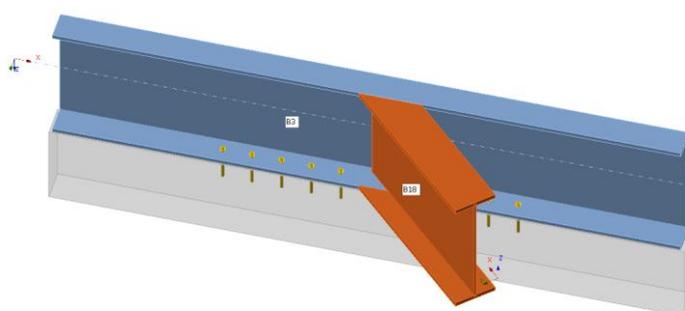


Figura 27 – Modelação da ligação C2 para o Grupo 4

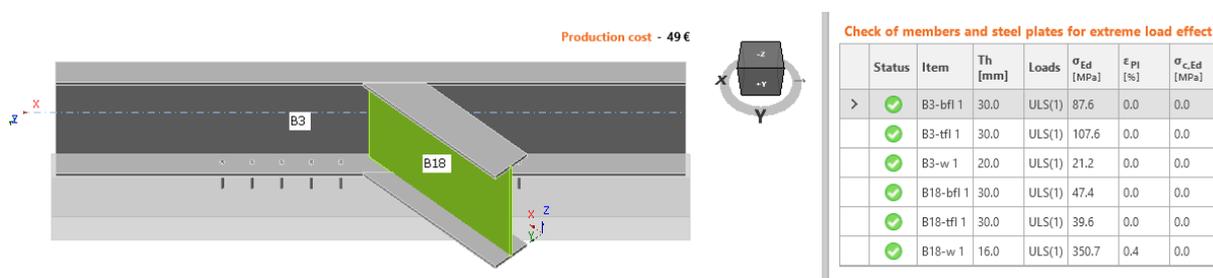


Figura 28– Resultados da análise da ligação C2 para o Grupo 4 em ELU

### 3.2.5 Grupo 5

Este é o último agrupamento de ligações para o projeto em Singapura. Trata-se de uma ligação puramente metálica, com uma modelação similar aos grupos 3 e 4, mas com ângulos e inclinações diferentes (ver Figura 29). A única operação recorrida para este grupo foi como de costume a operação do tipo ‘Cut’ e mais e nada mais de extraordinário em relação aos grupos anteriores. A seguir na Figura 30 tem-se os resultados da análise deste último grupo para a verificação de segurança.

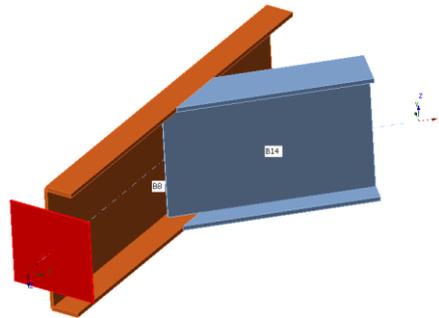


Figura 29 – Modelação da ligação C24 para o Grupo 5

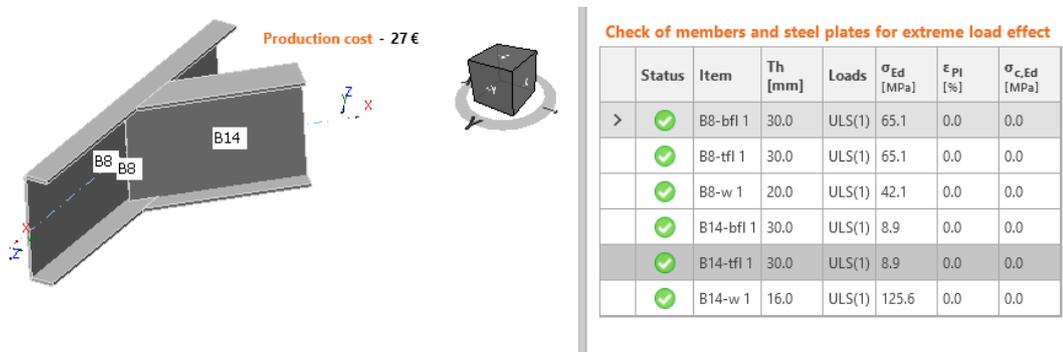


Figura 30 – Resultados da análise da ligação C24 para o Grupo 5 em ELU

### 3.2.6 Ligação C3

Procede-se às restantes ligações que não se enquadram em nenhum outro grupo com a ligação 3 (Figura 32). Esta que é apoiada num elemento de betão tal como os grupos 1 e 4, também apresentou maus resultados após a análise. Conforme representado pela Figura 31, as ancoragens não têm a sua segurança verificada, assim como no capítulo 3.2.1 para o Grupo 1. Quanto às operações utilizadas para a modelação desta ligação, apenas as operações ‘Cut’ (que já adiciona automaticamente as soldas) e ‘Anchor Grid’ foram utilizadas.

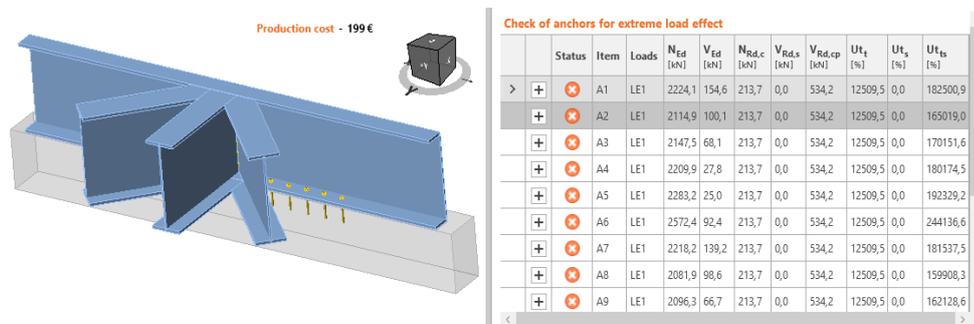


Figura 31 – Resultados da análise da ligação C3 em ELU

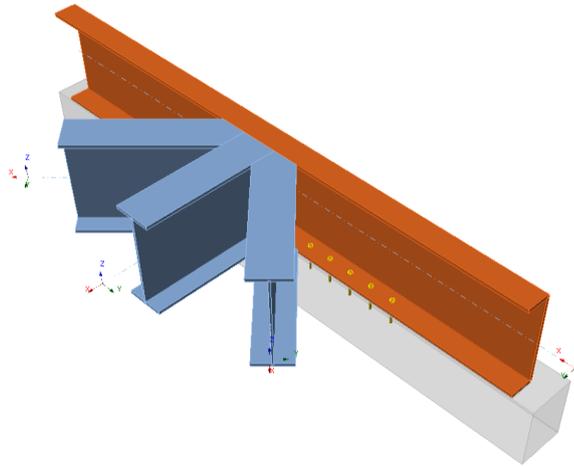


Figura 32 – Modelação da ligação C3

### 3.2.7 Ligação C17

Esta ligação apresenta particularmente um pilar em betão que irá servir de apoio para a cobertura metálica na extremidade livre a meio vão, alterando o funcionamento da mesma do que viria a ser uma consola para uma estrutura simplesmente apoiada (ver Figura 33).

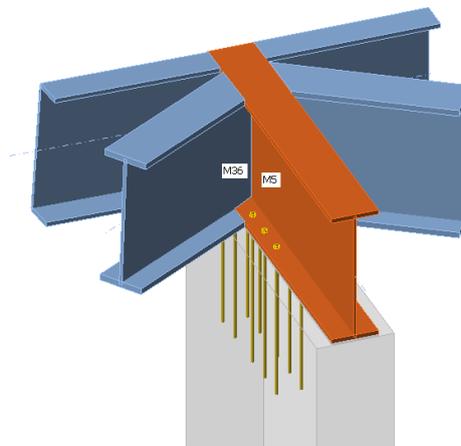


Figura 33 – Modelação da ligação C17

No entanto, alguns obstáculos surgiram ao longo da modelação desta ligação em específico. O modelo de barras no AxisVM não coincide com os eixos das peças da ligação apresentada pelos planos. Enquanto no modelo global os eixos das barras coincidem diretamente no nó, o que virá a ser feito de acordo com os planos não é assim. Logo, ao impor essas excentricidades dos elementos no IDEA Statica, automaticamente um grande desequilíbrio de forças é gerado, visto que os esforços desta ligação são muito altos comparativamente às restantes ligações da cobertura. Mais uma vez, a fiabilidade de cálculo das ligações mistas no IDEA Statica é posta

em causa, visto que os valores obtidos através da análise corrida são irrealistas (ver Figura 34), não necessariamente de forma exclusiva pelas excentricidades impostas, mas também pelas ancoragens ao elemento de betão, visto que este não pôde ter suas armaduras definidas no IDEA Statica, levando conseqüentemente à uma análise mais conservadora. No entanto, ao experimentar correr as análises mais uma vez, mas agora sem impor as excentricidades dos elementos de acordo com os planos, os resultados já aparentam ser muito melhores, embora algumas das ancoragens ainda estejam em cedência (ver Figura 35).

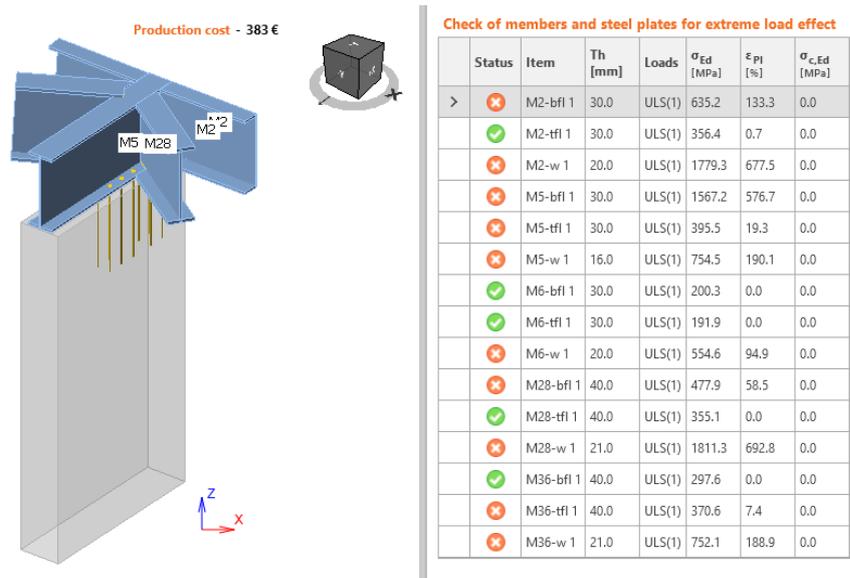


Figura 34 – Resultados da análise da ligação C17 em ELU

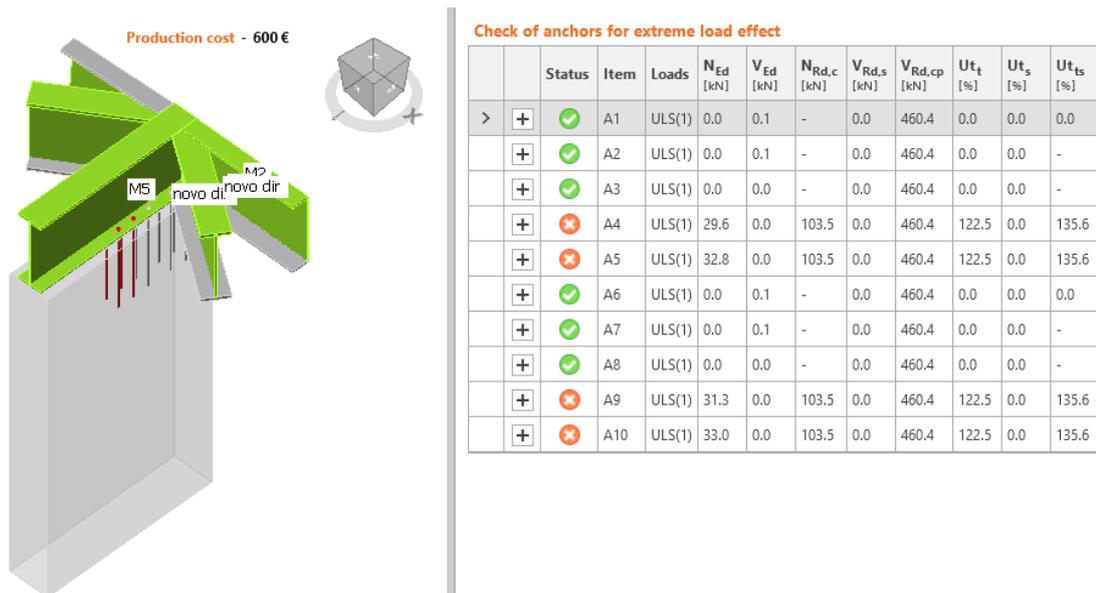


Figura 35– Resultados da análise da ligação C17 em ELU (sem excentricidades impostas)

### 3.2.8 Ligação C25

A última ligação a ser analisada nesta cobertura metálica, representada a seguir na Figura 36, é relativamente simples.

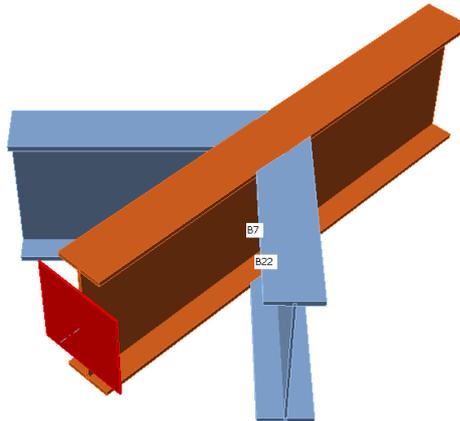


Figura 36 – Modelação da ligação C25

O eixo da viga principal B7 ao meio coincide com o eixo de simetria para as outras duas vigas secundárias B16 (à esquerda da viga central) e B22 (à direita da viga central). Recorrendo à operação ‘Cut’ para cortar e soldar as duas vigas secundárias à viga principal, já se tem por completo o modelo desta ligação no IDEA Statica. Na Figura 37 apresentam-se os breves resultados de sua análise.

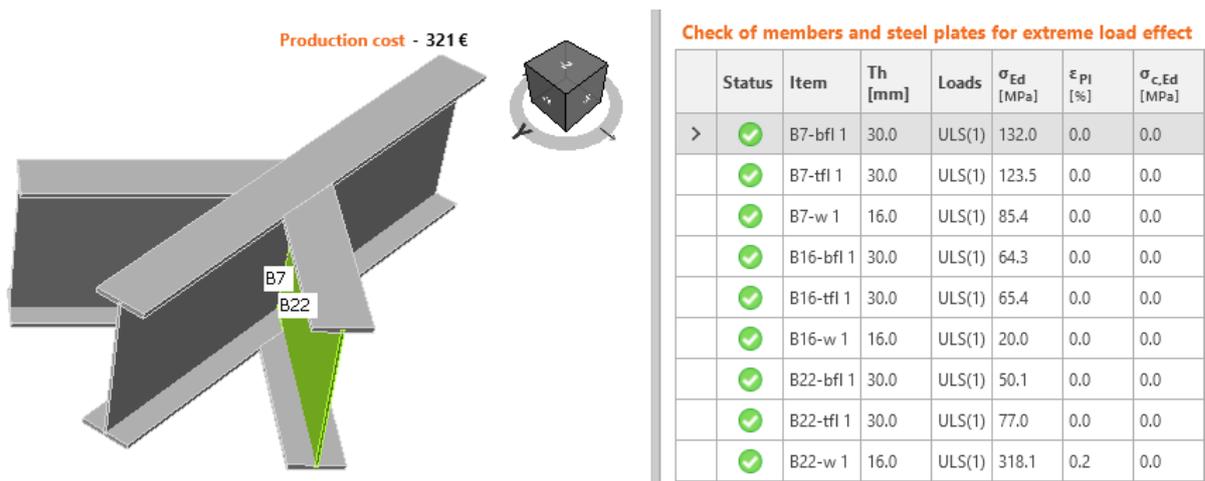


Figura 37 – Resultados da análise da ligação C25 em ELU

### 3.3 Modelação completa da cobertura no AxisVM

Conforme citado anteriormente na introdução deste relatório, a modelação por elementos finitos apresenta resultados muito fidedignos à realidade. A partir da discretização de um meio contínuo com uma malha pequena, é possível obter valores muito precisos das tensões e esforços instalados em cada elemento. Apesar de ser um processo muito demorado relativamente ao que foi feito no IDEA Statica, este servirá de uma comparação dos resultados das ligações mistas que apresentaram problemas nos seus resultados, avaliar a fiabilidade deste novo software e obter as conclusões necessárias para ponderar as vantagens e desvantagens do IDEA Statica no que toca a modelação de ligações metálicas e/ou mistas. Entretanto, ao invés de se fazer modelos individuais das ligações mistas (Grupos 1 e 4, ligações C3 e C17) no AxisVM, optou-se por modelar a cobertura por completo (ver Figura 38) e aplicar o carregamento distribuído em área sobre a mesma. Os pormenores do carregamento estão mais a frente no capítulo 3.3.2.

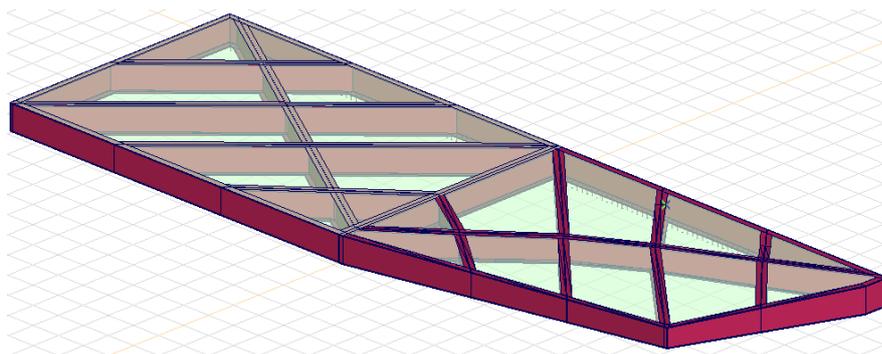


Figura 38 – Modelação 3D da cobertura metálica com elementos finitos

#### 3.3.1 Desenho e detalhamento dos elementos

Para esta análise mais detalhada em elementos finitos, recorreu-se aos elementos do tipo casca. Para cada domínio, atribui-se a espessura relativamente ao respetivo elemento simulado de acordo com o que está representado nos planos em PDF. Nesta etapa é muito importante ter atenção aos detalhes, tal como a inclinação de cada elemento relativamente aos 3 eixos (x, y e z), a variação das secções transversais ao longo do seu comprimento (se existir). A Figura 38 leva em consideração a espessura de cada elemento resultando na estética final daquilo que o modelo renderizado virá a representar. Não obstante, durante a etapa de modelização, os elementos têm espessura infinitesimal, o que significa que as secções transversais desenhadas são definidas pelas linhas médias da alma e dos banzos. Estas diferenças têm de ser levadas em consideração, principalmente para as almas dos perfis. Por exemplo, os perfis HEA 900 que têm 890 mm de altura total (de acordo com o catálogo SZS), virá a ser modelado com uma altura de 860 mm ao subtrair metade da espessura do banzo inferior e superior. Para a simulação

das ancoragens com os elementos de betão, aplicou-se um apoio de superfície ao longo do banzo inferior dos elementos U900 com as características representadas abaixo na Figura 39:

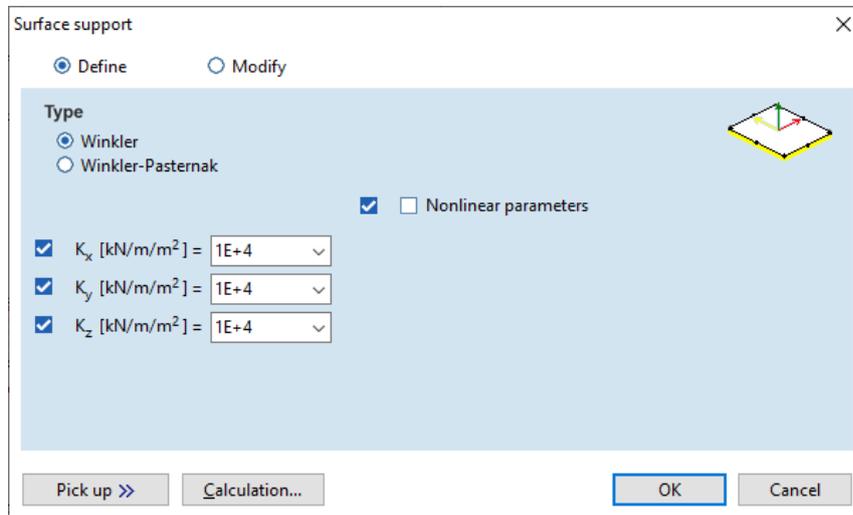
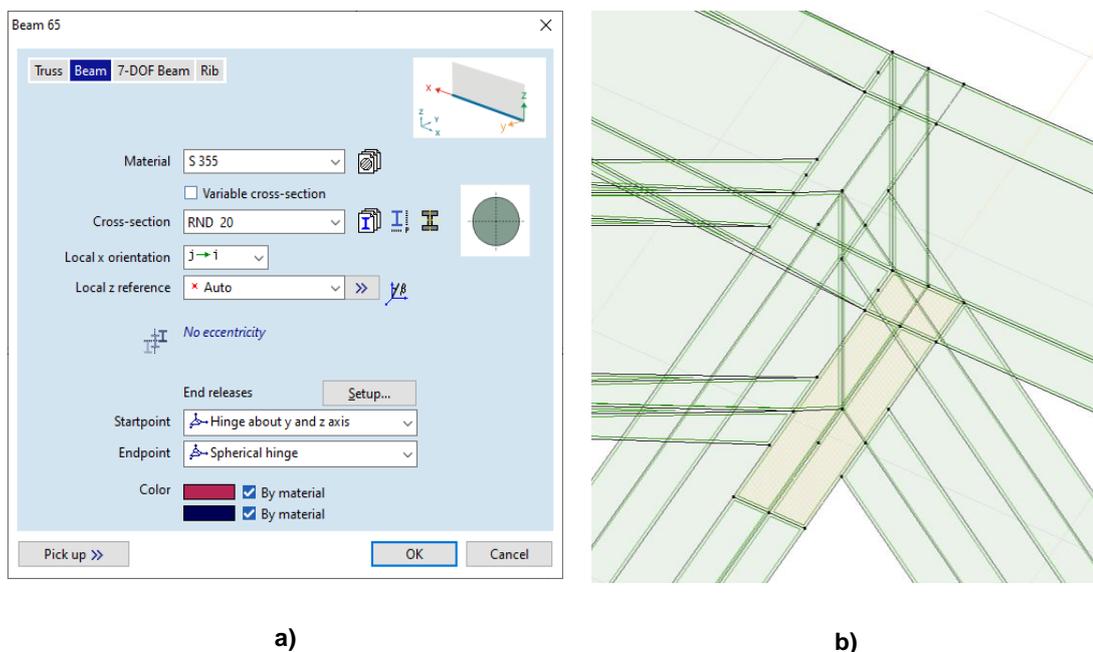


Figura 39 – Definição dos apoios de superfície para os elementos U900 apoiados em betão

Já para as ancoragens em si, estas foram modeladas com elementos lineares ao quais foram atribuídas a secção transversal circular de 20 mm e aço S355 (ver Figura 40). Em sua base, as ancoragens têm rótulas nos seus eixos y e z para as ações de flexão e rótula esférica em sua outra extremidade.



a)

b)

Figura 40 – a) Definição das ancoragens;  
b) Apoio da ligação C17

Para a modelação da ligação foi adotada uma simplificação. Optou-se por apenas aplicar o suporte de superfície neste elemento para não só poupar tempo de modelação, mas principalmente poder computacional, visto que o modelo em questão já se encontra muito detalhado. Os parâmetros escolhidos para modelar este suporte são os mesmos apresentados na Figura 40)b. Para uma melhor compreensão de como foram feitas as ancoragens, ver a Figura 41.

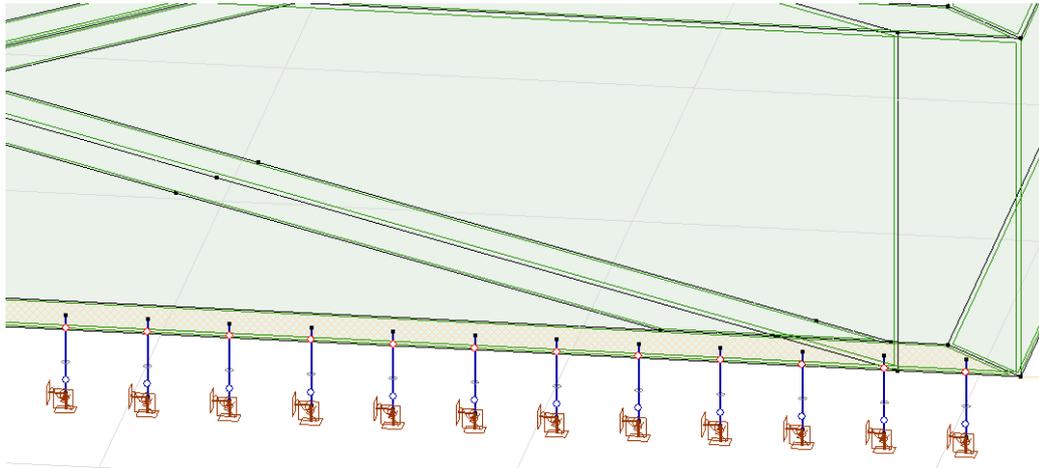


Figura 41 – Modelação das ancoragens com os elementos vigas de betão

### 3.3.2 Carregamento

Os carregamentos aplicados, cujos dados se encontram na Tabela 2, são os mesmos valores do modelo de barras no AxisVM.

Tabela 2 – Dados dos casos de carga

Casos de carga	Valores (kN/m <sup>2</sup> )	Coefficiente $\gamma$ (ELU)
AUFLAST (cargas permanentes)	-1.5	1.5
NUTZLAST (sobrecargas)	-1.5	1.5
EIGENLAST (peso próprio)	Introduzido pelo próprio software (automático)	1.35

Para uma melhor compreensão de como estas cargas foram aplicadas nos modelos, na Figura 42 encontram-se as suas representações.

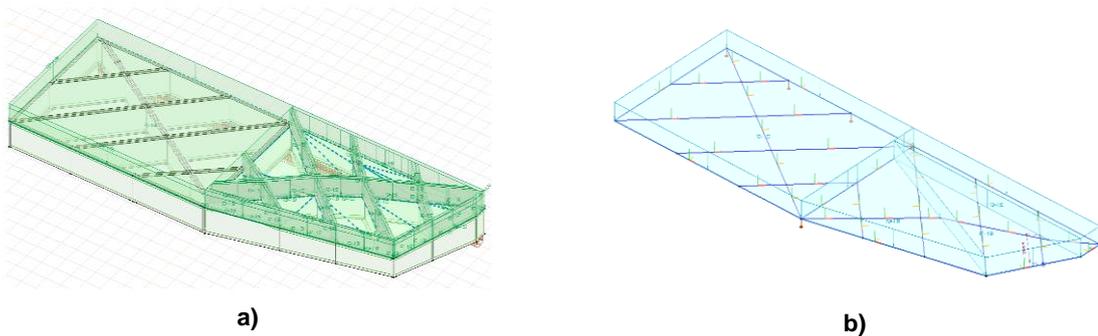


Figura 42 - a) Sobrecargas no modelo de elementos finitos;  
b) Sobrecargas no modelo de barras

Os valores retirados dos mapas de tensões dos elementos indicam que todos estão em segurança, com tensões máximas na cobertura por volta dos 143 MPa, e 172 MPa para as ancoragens (ver Figura 43).

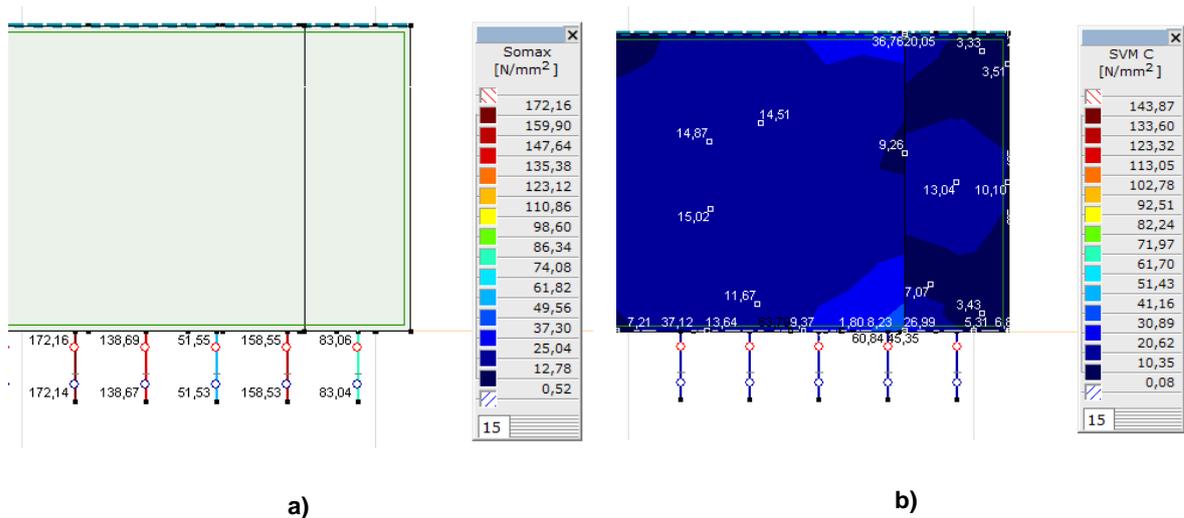


Figura 43 – a) Tensões de Von Mises instaladas nas ancoragens;  
b) Tensões de Von Mises instaladas na secção central dos elementos finitos

Logo, percebe-se que de facto existe uma diferença entre os resultados apresentados, principalmente nas ligações mistas que falharam no IDEA Statica e pode-se concluir que, embora este software seja muito direto e simples para a modelação de ligações metálicas, em algumas situações pode não ser o melhor para a modelação de ligações mistas. O facto de os modos de rotura das ancoragens pelo lado do betão serem avaliados de forma muito conservadora, pode induzir em resultados que não são realistas. Nestas situações é muito importante que o engenheiro projetista tenha o seu senso crítico para ponderar outras ferramentas e comparar os resultados obtidos entre softwares para que nenhum erro induza numa ligação sobredimensionada ou até mesmo subdimensionada no pior dos casos.

## 4 PARQUE PÚBLICO KOCH QUARTIER

### 4.1 Apresentação do projeto

Segundo a apresentação online deste projeto em Zurique [8], em 2013 a cidade comprou por 70 milhões de francos aproximadamente 30 000 m<sup>2</sup> de terreno, onde virá a ser a futura região de Koch, situada entre os bairros de Albisrieden e Altstetten. Serão construídos no local áreas para negócios e comércios, cerca de 325 apartamentos a preços acessíveis e um grande parque público. Este último, terá uma área de aproximadamente 12 000 m<sup>2</sup> e incluirá um gramado espaçoso e aberto com árvores, um "jardin sauvage" de design natural e o antigo depósito de carvão como um espaço aberto coberto. O salão que anteriormente era usado como depósito de carvão, juntamente com a infraestrutura de trilhos associada, é um testemunho valioso e raro da história do desenvolvimento urbano de Albisrieden e Altstetten. A cobertura da parte norte deste mesmo salão (ver Figura 43), cujas ligações metálicas virão a ser estudadas neste capítulo, poderá ser usada como palco de ensaios e para eventos.

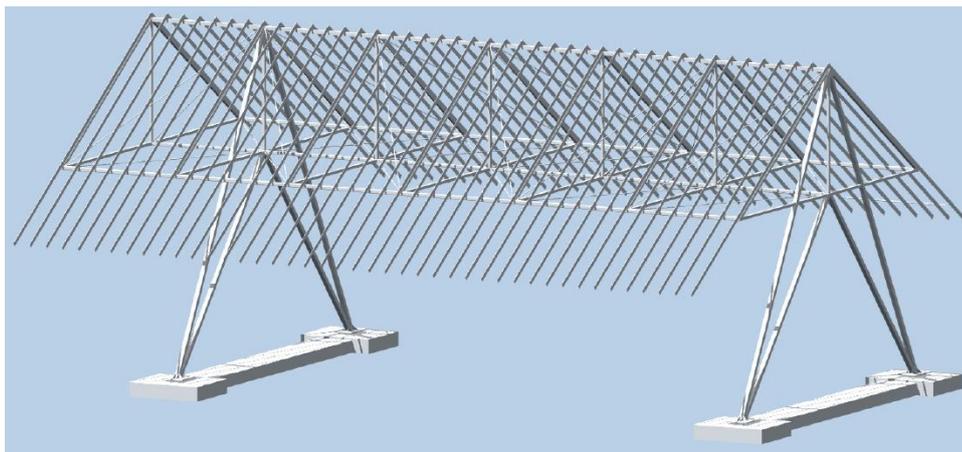


Figura 43 – Modelo global da estrutura metálica da cobertura

No modelo 3D indicado acima, a combinação mais condicionante para a verificação de segurança das ligações metálicas é a combinação de estado limite último com o vento definido como sua ação variável de base. Assim sendo, o vento exercerá pressão sobre os elementos sujeitos a incidência direta do mesmo, enquanto na face oposta os elementos estruturais estarão sujeitos a sucção. Na Figura 44 tem-se a deformada resultante devido a esta combinação ELU, tal como a caracterização pormenorizada da mesma com os fatores de ponderação das ações aplicados às mesmas.

$$\bullet \quad ELU_{vento} = 1.35 * (PP + RCP) + 1.5 * (Q_{vento} + 0.85 * Q_{neve}) + PE_{var\tilde{o}es} \quad (7)$$

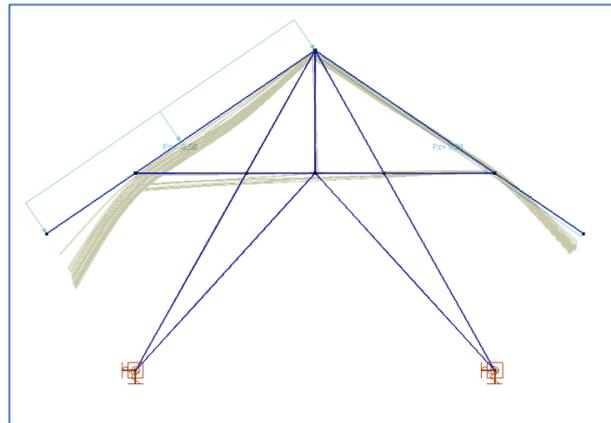


Figura 44 – Deformada resultante da estrutura

Como consequência desta análise tem-se os varões de aço (com diâmetros variando de 30 a 52 milímetros) considerados como treliças no modelo computacional, as vigas principais a meio do ramo interior da cobertura seguindo o comprimento da cobertura sob tração e as vigas secundárias, mais os elementos verticais da estrutura interna da cobertura sob compressão. Os pilares inclinados estão também todos sob compressão, mas aqueles associados a face de incidência direta do vento tem um valor maior do esforço axial. Todas as vigas constituintes desta estrutura metálica têm secção quadrada, assim como os pilares inclinados. A cobertura se desenvolve num comprimento de 30 m, com 15 m de largura e 14 m de altura. Como pode se ver pela Figura 45 a seguir, há uma parte da cobertura em consola com um vão de 5 m.

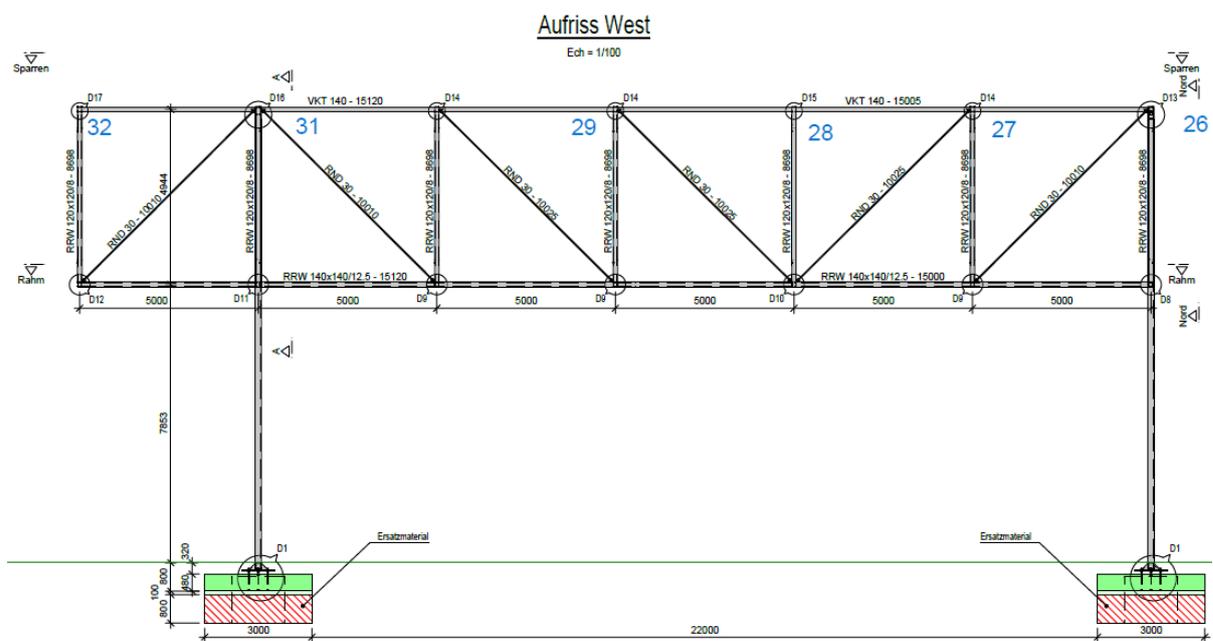


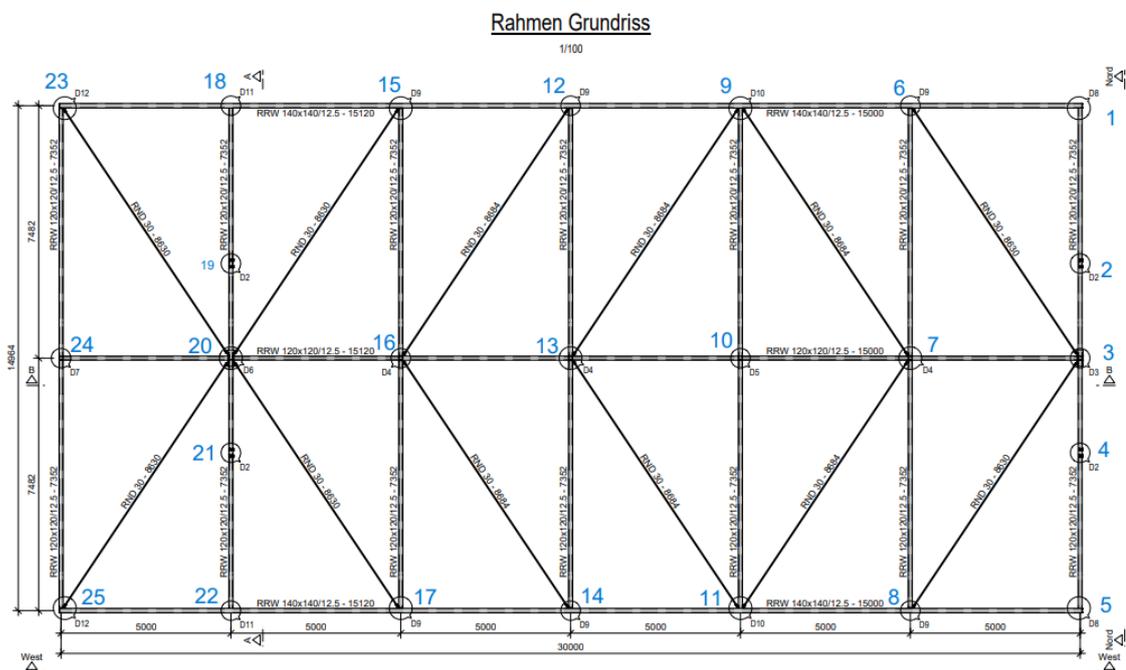
Figura 45 - Vista em perfil da cobertura metálica do projeto Koch

## 4.2 Modelação das ligações no IDEA Statica por grupos

Tal como foi feito no projeto anterior, as ligações metálicas foram numeradas de acordo com a Figura 46 para manter organizado a qual ligação cada modelo no IDEA Statica é referente, modelando apenas as ligações mais esforçadas para as que apresentavam 1 ou mais outras ligações simétricas e agrupando-as. No entanto, ao contrário do projeto anterior, a Figura 46 já vem com os grupos pré-determinados pelo desenhador da empresa. Assim sendo, reaproveitar-se-á a designação de cada grupo para evitar confusões.

**Tabela 3 - Ligações metálicas mais condicionantes para o dimensionamento de cada grupo do projeto Koch**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grupo D1: Sapata</li> <li>• Grupo D2: C2</li> <li>• Grupo D3: C3</li> <li>• Grupo D4: C7</li> <li>• Grupo D5: C10</li> <li>• Grupo D6: C20</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grupo D7: C24</li> <li>• Grupo D8: C5</li> <li>• Grupo D9: C8</li> <li>• Grupo D10: C11</li> <li>• Grupo D11: C22</li> <li>• Grupo D12: C25</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grupo D13: C26</li> <li>• Grupo D14: C27</li> <li>• Grupo D15: C28</li> <li>• Grupo D16: C31</li> <li>• Grupo D17: C32</li> <li>• Grupo D18: C30</li> </ul>
--	---	--



**Figura 46 – Numeração das ligações metálicas para o projeto Koch**

Tal como o primeiro projeto, referente ao edifício em Singapura, para avaliar quais eram as ligações metálicas mais condicionantes no modelo global da cobertura metálica para o dimensionamento, recorreu-se ao diagrama de momentos  $M_y$  (Figura 47) e às tensões máximas



Para este projeto foi analisada uma lista muito extensa de ligações metálicas. Logo, por razões de limitação da dimensão deste relatório, algumas das ligações que apresentam uma variante simplificada de outras, ou aquelas que não apresentaram qualquer desafio na parte de modelação computacional e verificação da segurança, foram omitidas no relatório. Ao comparar o grupo D8 ao grupo D12, por exemplo, pode-se notar que são essencialmente os mesmos, com a exceção dos varões RND30 ligados aos perfis quadrados (ver Figura 49 e Figura 50).

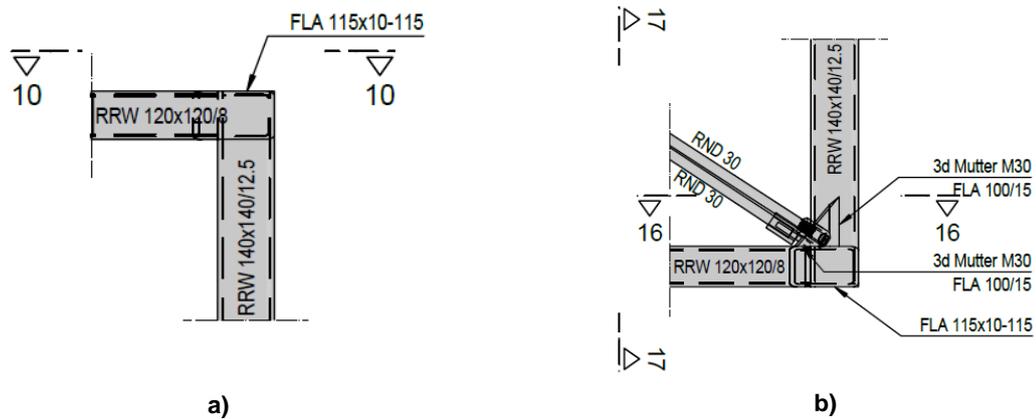


Figura 49 – a) Detalhamento do Grupo D8;  
b) Detalhamento do Grupo D12

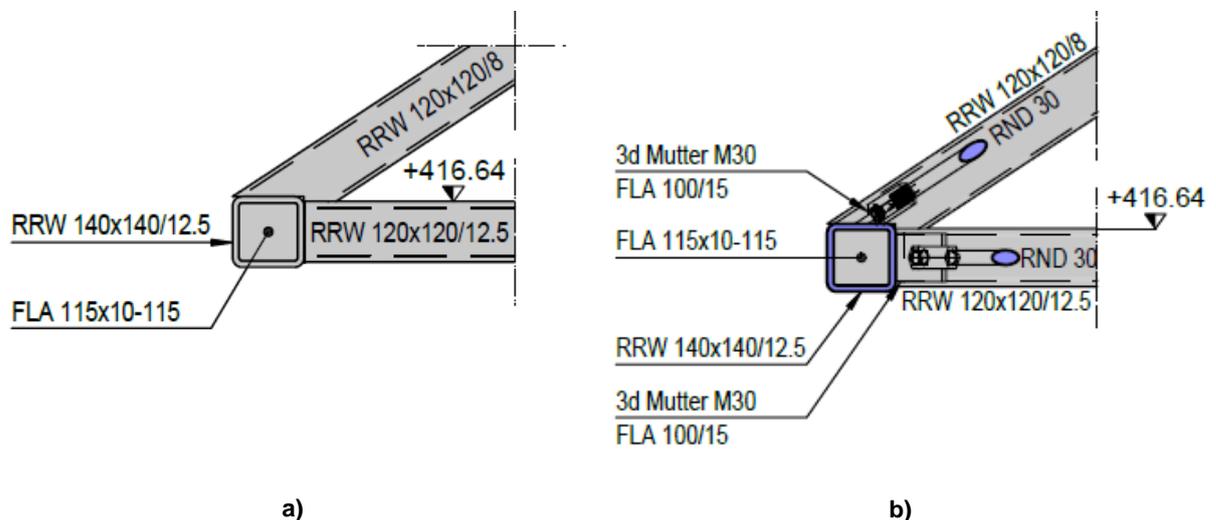


Figura 50 – a) Corte 10 - 10 referente à Figura 44 – a);  
b) Corte 17 - 17 referente à Figura 44 – b)

Assim sendo, os grupos de ligações metálicas a ser abordados de seguida são: D1 (sapatas), D6, D10, D13 e D16 (ligações puramente metálicas compostas por secções quadradas e, nalguns casos, também com varões de aço)

#### 4.2.1 Grupo D1

Para a modelação desta sapata representada pela Figura 51, houve particularmente 3 desafios ao longo de seu estudo. Primeiramente, muita atenção teve de ser prestada à pormenorização do elemento de ligação entre os dois perfis quadrados SHS 180 x 180 x 2.5 com a chapa metálica sobre o elemento de betão. Como se trata de um elemento muito específico deste projeto, teve de ser feito completamente por um processo manual. Isto é, adicionar várias chapas de aço progressivamente com suas respectivas dimensões, inclinações, espessuras e aplicando soldaduras entre os subelementos constituintes deste elemento genérico, com a configuração pretendida, chamado de ‘Fuss’ (do alemão: pé) com todas as informações aqui mencionadas retiradas dos planos, executados pelo desenhador da empresa. No entanto, fez-se uma alteração logo no princípio nas dimensões das ancoragens. Inicialmente, nos planos estavam previstas ancoragens M32/6.8, mas estas não se encontram na base de dados do IDEA Statica. Logo, foram substituídas por M33/6.8.

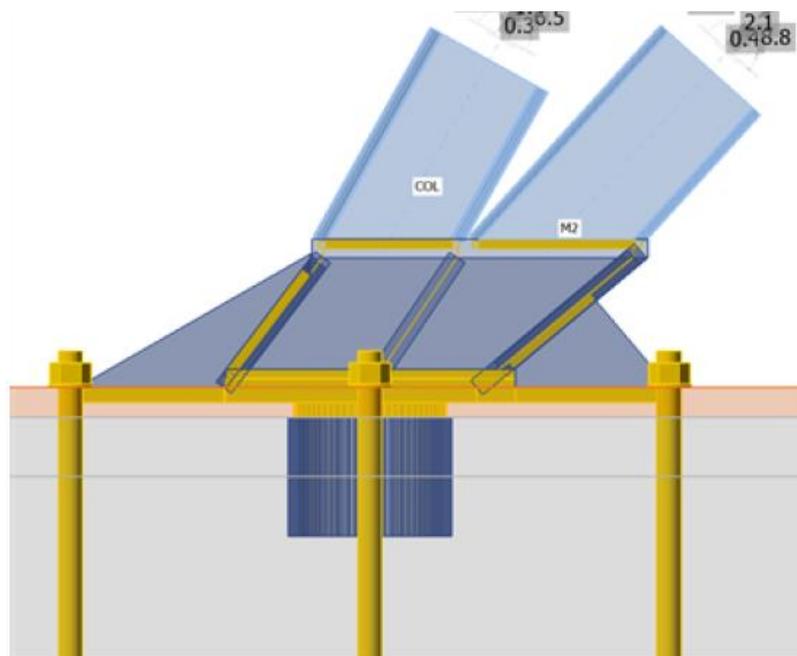


Figura 51 – Modelação das sapatas

O segundo desafio foi a verificação de segurança do bloco de betão quando sujeito ao corte. Segundo o Eurocódigo 2 parte 4, clausula 7.2.2.3.2, a sapata falha quando foi feita a análise de segurança para o esforço de corte (ver Figura 52). Assim sendo, é necessário conferir um reforço para mobilizar uma maior resistência aos esforços de corte atuantes no bloco de betão. Logo, optou-se pela opção de ‘Shear Lug’ disponível no próprio software do IDEA Statica,

conforme representado pela Figura 51 pelo elemento em azul-escuro no interior do bloco de betão. Esta é uma prática recorrente no mercado que dá uma maior liberdade ao engenheiro projetista de conferir a resistência necessária ao elemento em questão, mas sem implicar acréscimos excessivos ao custo final de materiais e execução em obra. A escolha do perfil a ser utilizado para o elemento ‘Fuss’ foi um perfil tubular CHS 219.1/16.0 com 160 mm de profundidade. Desta forma já foi possível mobilizar alguma resistência ao esforço de corte e sem interferir com as armaduras do próprio bloco de betão.

Analysis   Plates <b>Anchors</b> Welds   Concrete block												
	Status	Item	Loads	N <sub>Ed</sub> [kN]	V <sub>Ed</sub> [kN]	N <sub>Rd,c</sub> [kN]	V <sub>Rd,s</sub> [kN]	V <sub>Rd,c</sub> [kN]	V <sub>Rd,cp</sub> [kN]	U <sub>t,t</sub> [%]	U <sub>t,s</sub> [%]	U <sub>t,ts</sub> [%]
-	✘	A1	LE1	2,5	38,2	862,3	35,2	345,3	1258,5	1,1	108,5	117,8
<p><b>Shear resistance (EN1992-4 - Cl.7.2.2.3.2)</b></p> $V_{Rd,s} = \frac{V_{Rk,s}}{\gamma_{Ms}} = 35,2 \text{ kN} < V_{Ed} = 38,2 \text{ kN}$ $V_{Rk,s} = \frac{\alpha_M \cdot M_{Rk,s}}{l_w} = 52,8 \text{ kN}$ <p>Where:</p> <p><math>\alpha_M = 2,00</math> – factor accounting for the degree of restraint of the fastener</p> <p><math>M_{Rk,s} = 3,1 \text{ kNm}</math> – characteristic flexural strength of the fastener influenced by the <math>\epsilon</math></p>												
+	✘	A2	LE1	0,7	38,1	862,3	35,4	-	1258,5	1,1	107,8	116,2
+	✘	A3	LE1	2,7	37,2	862,3	35,2	-	1258,5	1,1	105,7	111,7
+	✘	A4	LE1	1,6	38,6	862,3	35,2	105,1	1258,5	1,1	167,2	216,2

Figura 52 - Análise da segurança inicial ao esforço de corte no bloco de betão da sapata sem o ‘Shear Lug’

O terceiro desafio, devido a limitações do software, foi a impossibilidade de modelar os pilares inclinados como secções mistas. Conforme indicados nos planos e também de acordo com o modelo global no AxisVM, os pilares metálicos são preenchidos por betão, o que conferirá uma resistência muito superior em relação aos perfis metálicos ocos. Não obstante, após a introdução de um ‘Shear Lug’ na sapata, a ligação já confere a resistência necessária para verificar os critérios necessários de segurança do Eurocódigo, mesmo com uma análise mais conservadora sem o preenchimento de betão. Portanto, pode-se concluir que a segurança deste elemento está verificada, conforme representado pela Figura 53.

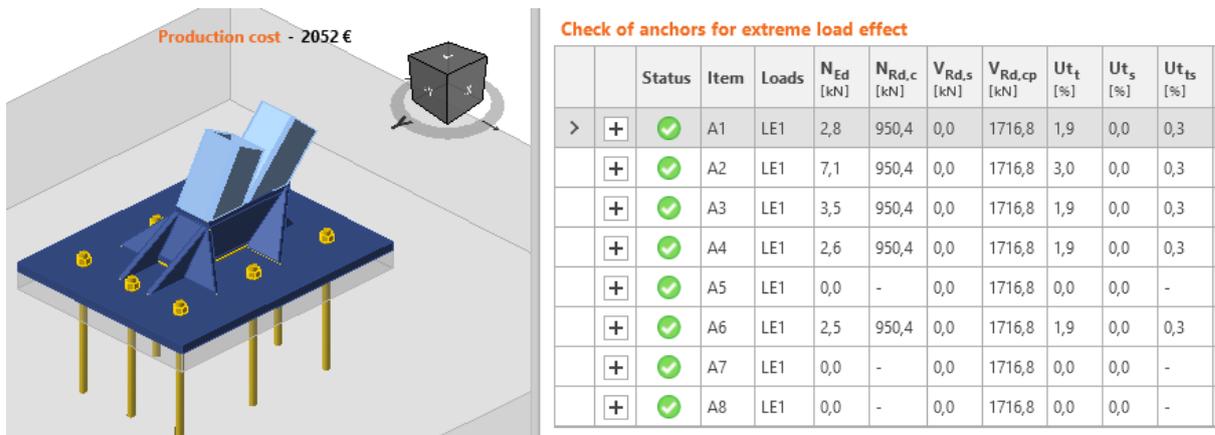


Figura 53 - Resultados da análise das sapatas dos pilares para o Grupo D1 em ELU

### 4.2.2 Grupo D6

Para a modelação desta ligação no IDEA Statica (Figura 54), alguns novos desafios quanto à modelação foram introduzidos. Um deles foi a chapa metálica entre os dois pilares inclinados, ligando-os às vigas. Para tal, criou-se primeiramente a chapa (em laranja na Figura 55) como um elemento isolado com as suas dimensões especificadas nos planos de 485 mm x 180 mm x 25 mm. A sua largura de 180 mm coincide com a dimensão dos lados dos pilares inclinados. Estes por sua vez, são perfis quadrados de SHS 180 x 180 x 12.5. Uma vez que a chapa metálica foi criada e posicionada entre as vigas e pilares inclinados, recorre-se à operação ‘Weld or contact’ para soldá-la entre estes elementos.

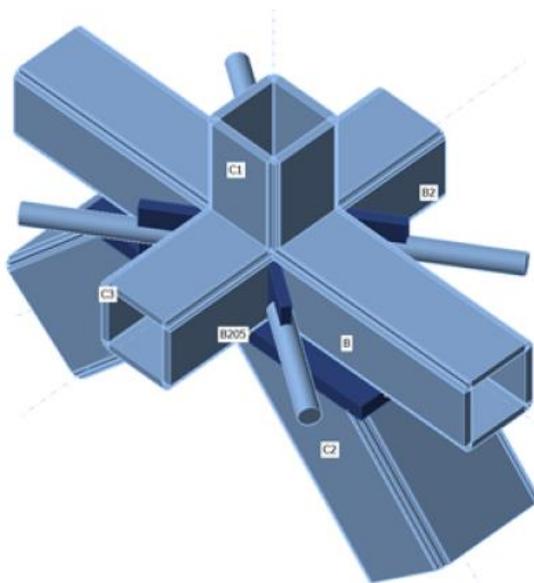
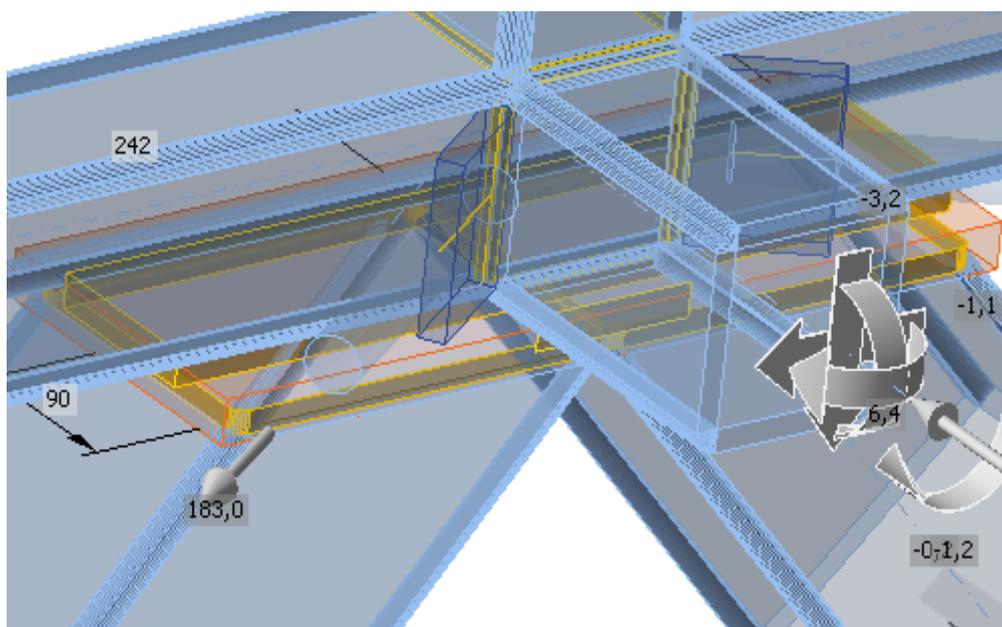


Figura 54 – Modelação da ligação C20 para o Grupo D6

O outro desafio é a modelação dos varões de aço ligados por intermédio de uma chapa metálica de 100 mm x 100 mm x 15 mm conforme representado pela Figura 55. É importante reiterar que todos os elementos metálicos nesta ligação metálica foram modelados como totalmente soldados entre si. No entanto, os varões metálicos ligados a estas chapas são feitos a partir de um aparafusamento<sup>2</sup> dos varões numa porca instalada nestas chapas através de uma solda. Como este aparafusamento é impossível de se fazer no IDEA Stática por limitações do software, optou-se por prosseguir com a soldadura completa de todos os elementos.



**Figura 55 – Chapa metálica (laranja) soldada entre perfis quadrados**

Depois de criar os varões e as suas chapas de ligação no modelo, executa-se a nova operação ‘Gusset – truss members’ (ver Figura 56) para estabelecer a ligação de ambas estas peças entre si. Na aba de propriedades desta operação o projetista tem a possibilidade de escolher entre a criação automática de uma chapa conectora entre os varões e o outro elemento (que neste caso seriam as outras duas vigas de secção quadrada) ou por seleccionar uma chapa pré-existente no modelo. Neste caso, esta última opção foi adotada, pois desta forma tem-se uma maior liberdade do posicionamento espacial da chapa conectora e uma maior facilidade para editar as suas dimensões.

<sup>2</sup> Este aparafusamento dos varões à chapa aplica-se não só a este grupo de ligações metálicas, como também em todos os outros que apresentam estes varões.

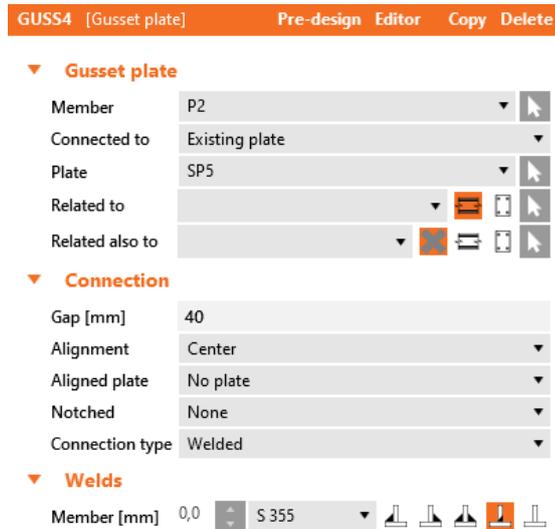


Figura 56 – Parâmetros da operação ‘Gusset – truss members’

De seguida, executa-se a operação ‘Cut’ para ligar os elementos entre si com a opção de ‘butt weld’ selecionada, conforme será feito a seguir para todos os outros grupos de ligações metálicas e também feito anteriormente no projeto de Singapura. Por fim, é importante referir que o IDEA Statica por defeito não verifica a segurança dos varões, pois não há elementos sólidos implementados para este tipo de análise. Apenas as chapas intermediárias virão a ser analisadas, como se pode ver na Figura 57 do mapa de tensões. Sem qualquer outra complicação a parte da modelação computacional, a segurança desta ligação metálica foi verificada. Como esta ligação apresentou alguma complexidade na sua modelação, mas sem estender excessivamente o número de páginas do relatório exportado pelo IDEA Statica, optou-se por apresentar detalhadamente em anexo (ver página 69) a análise desta ligação metálica.

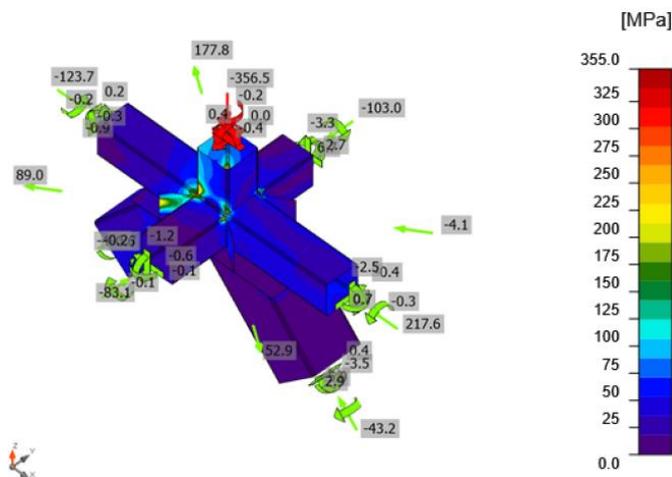


Figura 57 – Mapa de tensões instaladas na ligação C20 para o Grupo D6 em ELU

### 4.2.3 Grupo D10

Para este grupo de ligação, surgem outros novos aspetos quanto à modelação dos seus elementos constituintes, conforme mostrado na Figura 58.

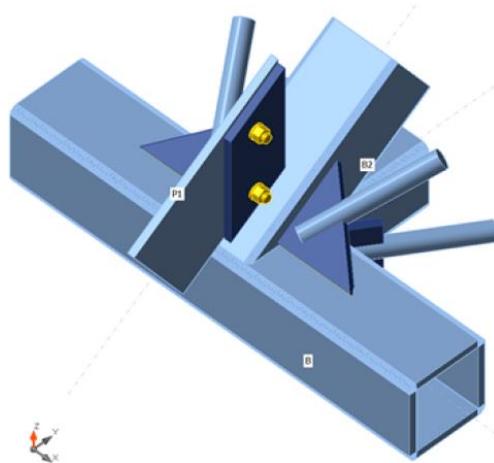


Figura 58 – Modelação da ligação C11 para o Grupo D10

Duas das chapas intermediárias compreendidas entre os varões e os perfis quadrados, têm uma alteração em sua simetria que implicam automaticamente na edição da sua forma geométrica no IDEA Stática. Na própria aba de propriedades da chapa metálica pode-se encontrar o botão ‘Editor’ que levará o utilizador à edição da geometria da peça (ver Figura 59)a ). Com isto, foi possível transformar a chapa que anteriormente tinha um formato retangular numa chapa triangular, conforme explicitado pelos planos para este grupo de ligações.

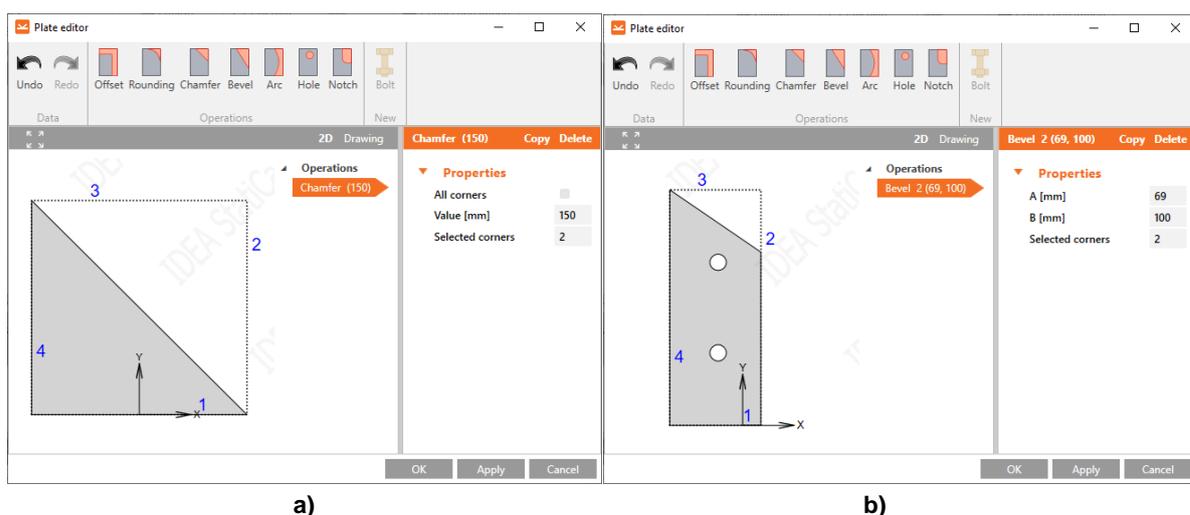
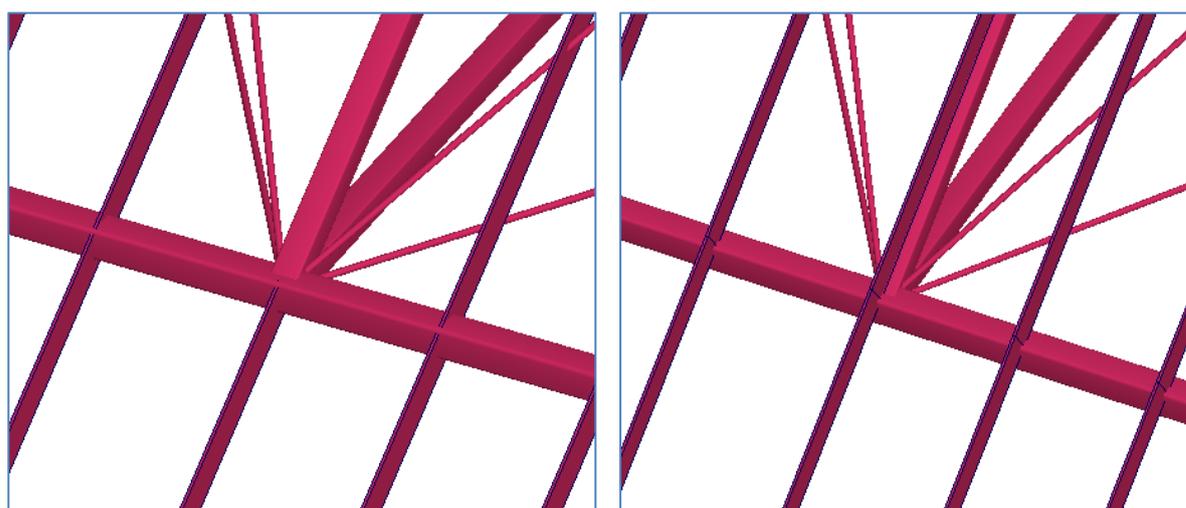


Figura 59 – a) Edição da geometria de chapas metálicas de contato com os varões;  
b) Edição da geometria de chapas metálicas de contato com as vigas diagonais

Esta ferramenta foi mais uma vez utilizada para modelar a chapa soldada à viga diagonal que serve para ligar os elementos de suporte das telhas, conforme mostrado na Figura 59)b. Estas, são chapas retangulares com uma secção transversal muito esbelta de 160 mm x 12 mm. Por uma questão de limitação do software, fez-se apenas a parte destes elementos em consola ligados à outra chapa (que por sua vez está soldada à viga diagonal) por parafusos M16/10.9 (inicialmente definidos como M14/8.8).

Devido a algumas simplificações no modelo global da estrutura, as forças internas dos elementos quando exportadas para o IDEA Statica não se encontram em equilíbrio (uma das regras básicas e fundamentais da mecânica estática). Isto deve-se ao facto que, no modelo inicial, estas chapas em consolas não só desconsideram a excentricidade em relação ao eixo da viga diagonal sobre as quais estão apoiadas, como também não têm o seu desenvolvimento ao longo da parte superior das vigas. Por esta razão o modelo global inicial foi alterado de forma que o desequilíbrio das forças pudesse ser mitigado (ver Figura 60 para breve comparação dos modelos).



a)

b)

**Figura 60 – Comparação da ligação 11 nos modelos globais: a) inicial; b) modificado**

Entretanto, não só persistiu o desequilíbrio de forças, como também não foi verificada a segurança dos parafusos apesar destes terem um diâmetro e classe resistente consideráveis (ver Figura 61). Tendo em mente que os valores dos esforços atuantes nestes elementos em consola não são particularmente expressivos, com algum senso crítico é de se esperar que algo não esteja a ser devidamente contabilizado na análise deste grupo de ligações pelo IDEA Statica. Assim sendo, recorreu-se no capítulo seguinte a uma modelação mais robusta em elementos

finitos no AxisVM para uma análise mais detalhada dos esforços atuantes nos elementos (ver capítulo 4.3).

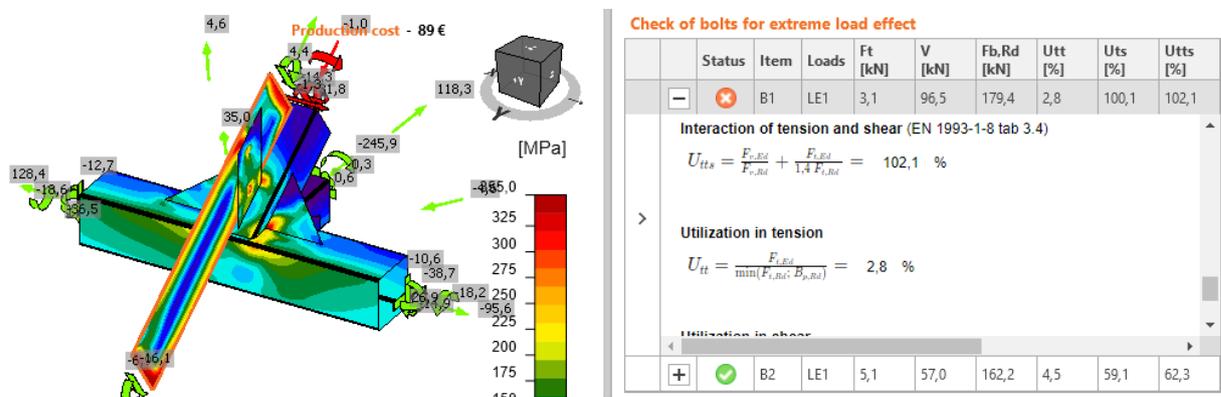


Figura 61 - Resultado da análise da ligação C11 para o Grupo D10 em ELU

#### 4.2.4 Grupo D13

Prosseguindo agora ao ramo superior da cobertura, a Figura 62 representa a ligação C26, a mais condicionante do Grupo D13.

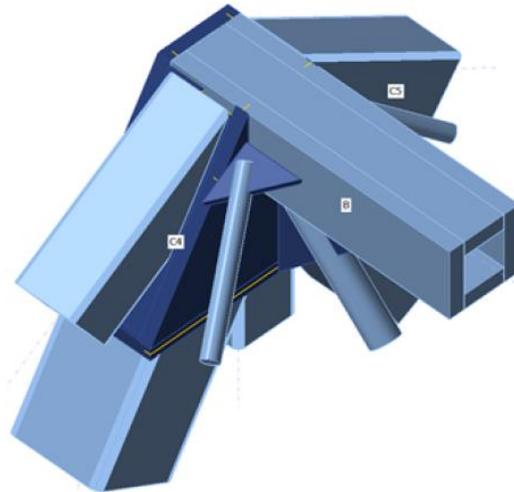
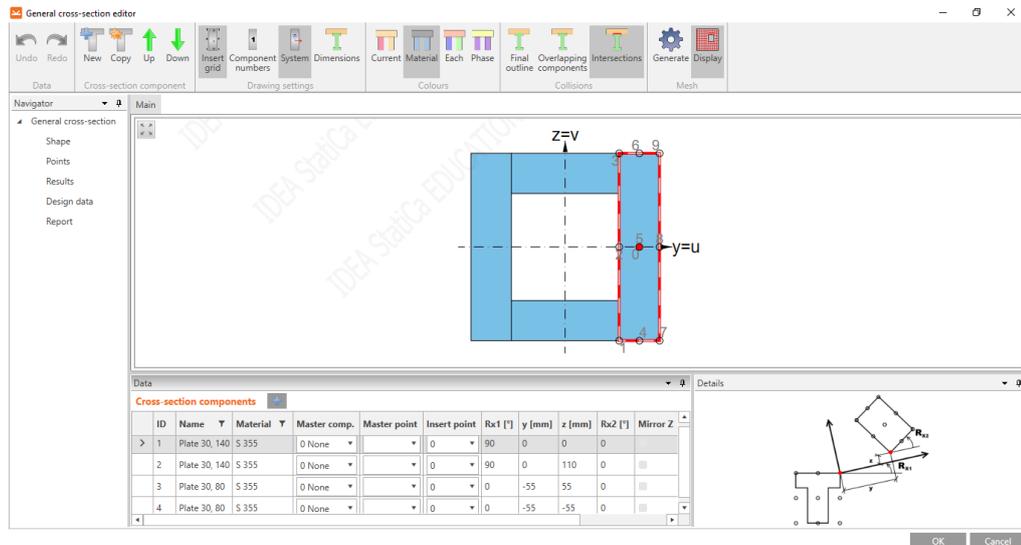


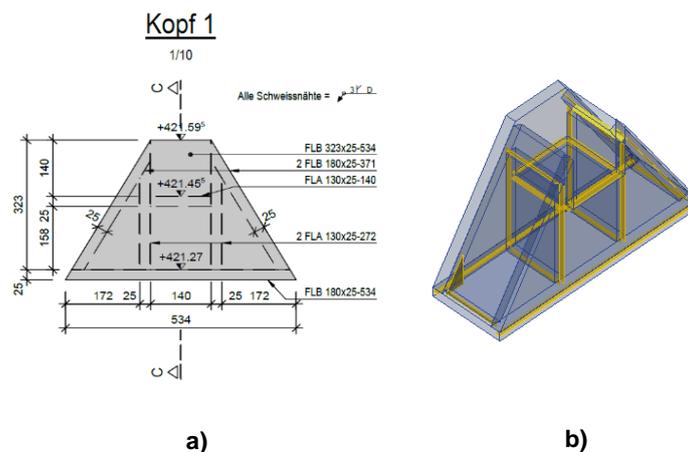
Figura 62 – Modelação da ligação 26 para o Grupo D13

Os maiores desafios que surgiram foram as modelações das novas peças personalizadas e as vigas horizontais perpendiculares. Estas, têm uma secção VKT 140. Do alemão, VKT (Vierkantstäbe) significaria ‘barras de secções quadradas’ em português. No entanto, o IDEA Statica não tem incluído no seu banco de dados secções quadradas maciças para análises. Assim sendo, optou-se por fazer um novo perfil quadrado oco com uma espessura considerável para simular o perfil VKT 140 original. Para tal, adotou-se uma espessura de 30 mm (ver Figura 63).



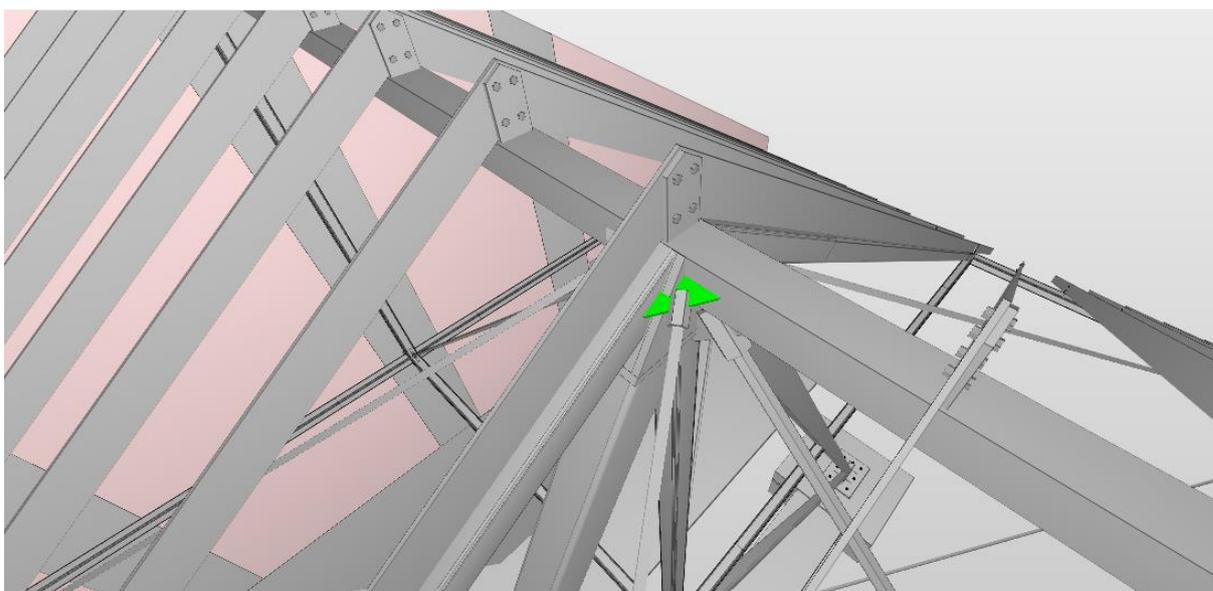
**Figura 63 - Criação de uma secção transversal genérica, com a configuração pretendida para simulação do VKT 140**

Quanto à peça, que será o nó de intermediação entre todos os elementos constituintes desta ligação, foi denominada por ‘Kopf\_1’ (do alemão: cabeça). A sua modelação em IDEA Statica foi análoga à outra peça genérica, com a configuração pretendida ‘Fuss’ já citada anteriormente no capítulo 4.2.1 na sapata dos pilares. Foi-se criando progressivamente chapas metálicas (os subelementos constituintes dessa peça global) para que fossem todas posteriormente soldadas entre si, sempre de acordo com as dimensões especificadas nos planos. Cada uma das chapas metálicas citadas anteriormente, os subelementos constituintes desta peça, estão representadas na Figura 64 por linhas tracejadas para indicar que se encontram na parte interior e linhas contínuas para delimitar as faces exteriores.



**Figura 64 – a) Detalhamento de Kopf\_1;  
b) Modelação de Kopf\_1 no IDEA Statica**

Com a geometria esquematizada e as linhas de dimensões de cada subelemento, procedeu-se à criação do Kopf\_1 no IDEA Statica (Figura 64). A seguir, recorre-se à operação ‘Cut’ para cortar e soldar as vigas e pilares no novo elemento genérica, com a configuração pretendida e faz-se também a ligação dos varões ao mesmo elemento através das chapas de ligação utilizando mais uma vez a operação ‘Gusset – truss members’. Por fim, é importante apontar uma simplificação adotada no modelo para as chapas triangulares inclinadas de ligação. Como se pode notar na Figura 65, estas chapas possuem um corte para comportar uma parte protuberante da face externa da peça genérica, com a configuração pretendida ‘Kopf\_1’. Como a execução deste pormenor muito específico no IDEA Statica seria não só muito desafiador, mas também sem apresentar muitas vantagens no resultado da análise que justificassem o cometimento para a execução do mesmo, optou-se pela simplificação destas chapas e reduzir as suas dimensões para que estas possam ser completamente soldadas à face externa da peça genérica, com a configuração pretendida. Comparando a Figura 65 abaixo com a Figura 62 pode-se notar esta ligeira diferença geométrica. Os resultados da análise para este grupo de ligação são representados na Figura 66.



**Figura 65 – Geometria da chapa conectora dos varões inclinados**

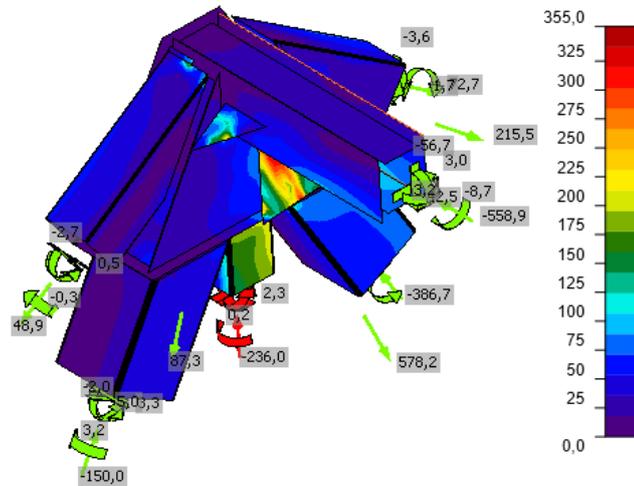


Figura 66 - Resultados da análise da ligação C26 para o Grupo D13 em ELU

#### 4.2.5 Grupo D16

Essencialmente, o grupo D16 (representado na Figura 67) seria o mesmo que o grupo D13, mas com um acréscimo espelhado dos elementos constituintes da ligação.

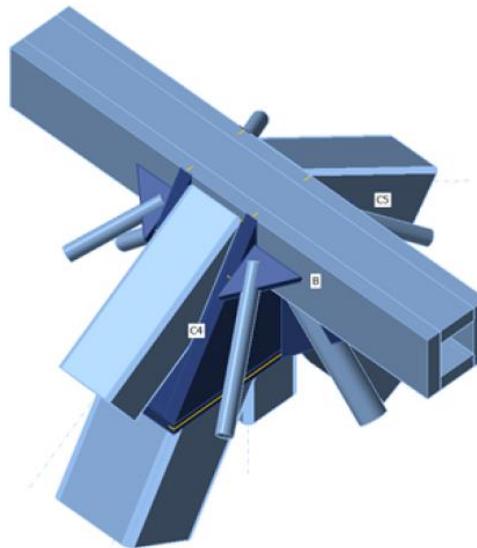
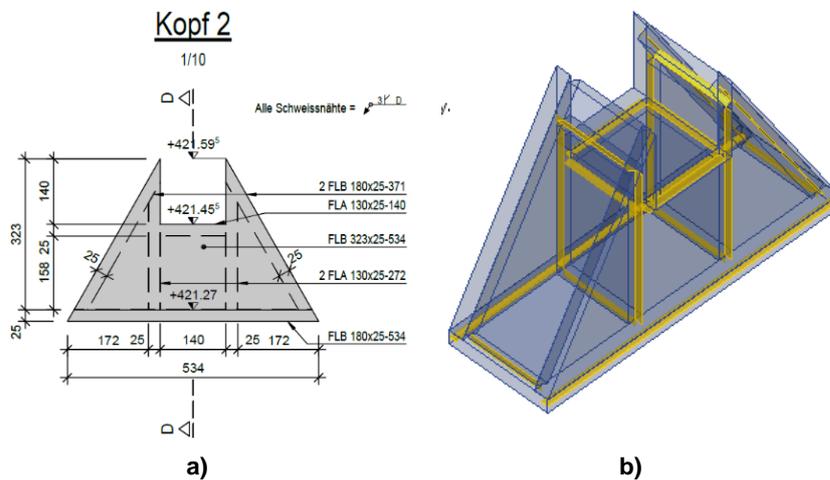


Figura 67 - Modelação da ligação C31 para o Grupo D16

Este espelhamento implica em algumas alterações no modelo no IDEA Stática:

- A viga VKT 140 agora passa a ser modelada como um elemento do tipo 'Continuous' que permite aplicar os valores das forças internas em ambas extremidades.

- Os varões de aço têm de ser adicionados também na outra face.
- O elemento genérico, com a configuração pretendida, agora passa a ter um buraco a mais para que a viga VKT 140 possa atravessá-lo em totalidade e tem uma nova denominação: Kopf\_2 (Figura 68).
- Um dos varões diagonais inferiores têm uma secção transversal superior (52 mm) em comparação com as demais (30 mm) devido aos altos esforços existentes.
- As chapas de ligação de todos os varões tiveram um acréscimo na sua espessura de 5 mm.



**Figura 68 – a) Detalhamento de Kopf\_1;  
b) Modelação de Kopf\_1 no IDEA Statica**

Comparando a Figura 68 à Figura 64 pode-se notar a diferença entre as duas peças genéricas, com a configuração pretendidas Kopf\_1 e Kopf\_2. Analogamente ao grupo D13, recorre-se à operação 'Cut' para cortar e soldar as vigas e pilares neste novo elemento genérico, com a configuração pretendida e faz-se também a ligação dos varões ao mesmo elemento através das chapas de ligação utilizando mais uma vez a operação 'Gusset – truss members', com a mesma hipótese simplificativa das chapas triangulares inclinadas, para ligar os varões de aço. Por fim, é importante apontar que a ligação 31 é a mais esforçada do ramo superior e também possui uma geometria mais complexa. Ou seja, esta ligação foi particularmente desafiadora não só no aspeto de modelação computacional e conhecimento das ferramentas do software, como também do ponto de vista da verificação de segurança (Figura 69).

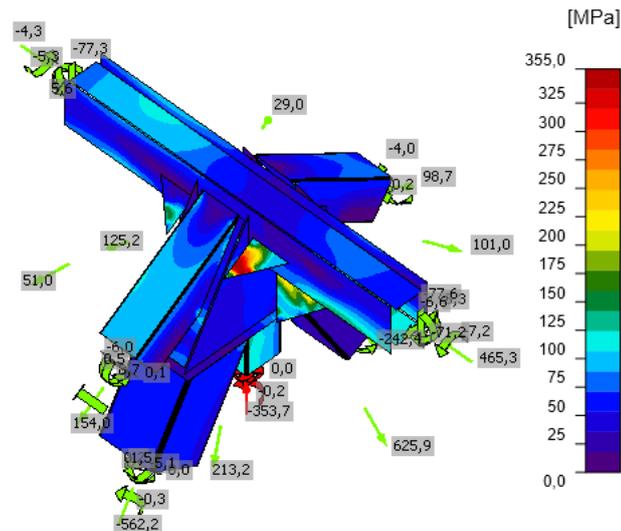


Figura 69- Resultados da análise da ligação 31 para o Grupo D16 em ELU

### 4.3 Modelação do grupo D10 no AxisVM

Conforme citado anteriormente no capítulo 4.2.3, particularmente o grupo D10 apresentou alguns desafios relativamente à verificação de segurança dos seus elementos, mesmo que estes estejam sujeitos a valores consideravelmente inferiores de esforços quando em comparação com as outras ligações. O motivo dessa ocorrência vem em detrimento das discrepâncias entre o modelo global e o modelo no IDEA Statica, mais algumas simplificações adotadas quanto à modelação desta ligação. Por esta razão optou-se por fazer uma análise mais robusta da mesma pelo MEF no AxisVM (Figura 70).

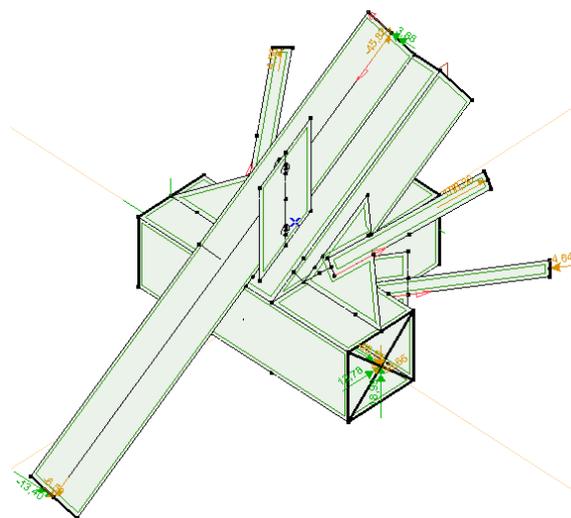


Figura 70 - Modelação 3D da ligação metálica C11 com elementos finitos

### 4.3.1 Desenho e detalhamento dos elementos

Analogamente ao capítulo 3.3.1, para a modelação desta ligação recorreu-se aos elementos finitos do tipo casca. A cada domínio foi atribuída a espessura relativamente ao respetivo elemento simulado de acordo com o que está representado nos planos executados pelo desenhador da empresa. Para os parafusos que ligam a chapa em consola à chapa soldada na viga diagonal, recorreu-se a um elemento finito unidimensional do tipo barra. Conforme citado anteriormente, os elementos finitos, apesar de apresentarem uma espessura infinitesimal, têm a eles associadas as espessuras reais de cada elemento, comportando-se nas suas linhas médias. Assim sendo, a chapa soldada à viga diagonal e a chapa em consola, têm um pequeno espaçamento entre si de aproximadamente 1.3 cm. Compreendido entre ambos os elementos finitos, está o elemento unidimensional que será o parafuso. A este elemento foi atribuída a secção transversal de RND 16 e criado um material novo para associar à classe resistente deste parafuso de 10.9. Como se pode notar pela Tabela 4, para além do aço 10.9 associado aos parafusos e o aço S355 associado aos elementos, existe um terceiro material chamado S355\_NL (aço de classe S355, mas com parâmetros não lineares).

**Tabela 4- Propriedades dos materiais**

Number	1	2	3
Name	S 355	bolt 10.9	S 355_NL
Type	Steel	Steel	Steel
Model	Linear	Linear	NL elastic
Ex [N/mm <sup>2</sup> ]	210000	210000	210000
Ey [N/mm <sup>2</sup> ]	210000	210000	210000
$\nu$	0,30	0,30	0,30
alphaT [1/°C]	0.00001	0.00001	0.00001
rho [kg/m <sup>3</sup> ]	7850	7850	7850
P1 (fy [N/mm <sup>2</sup> ])	355	900	355
P2 (fu [N/mm <sup>2</sup> ])	510	1000	510
P3 (fy* [N/mm <sup>2</sup> ])	335	900	335
P4 (fu* [N/mm <sup>2</sup> ])	490	1000	490

Este, é o mesmo aço de classe S355, mas com os parâmetros necessários para uma análise não linear. Este material virá a ser aplicado nas chapas de ligação dos varões para um melhor entendimento das distribuições de tensões. Quanto à modelação dos varões em si, estes por serem de formato cilíndrico, implicaria numa discretização muito rigorosa das arestas do elemento. Portanto, de forma muito mais simples, os varões foram modelados como prismas de secção quadrada, cujos lados têm a mesma dimensão dos varões originais de 30 mm. Pela Figura 71, nota-se que os varões passam a ser agora prismáticos ao invés de cilíndricos e os parafusos são impercetíveis à vista.

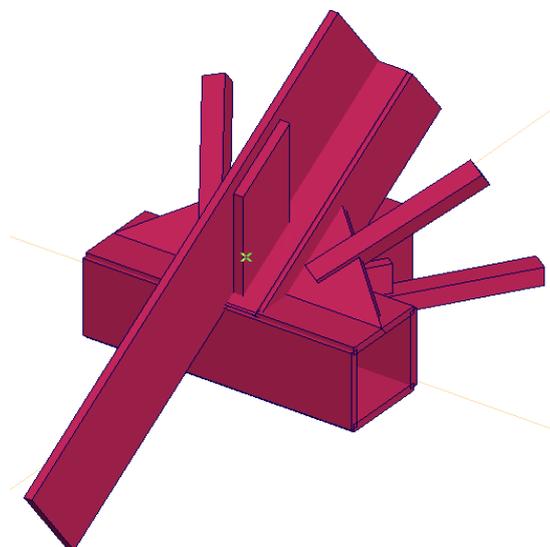


Figura 71 – Vista renderizada em 3D da ligação C11

Não obstante, isto não significa a sua ausência no modelo, pois ele de facto está presente, mas está compreendido entre as duas chapas: em consola e chapa de ligação.

#### 4.3.2 Carregamento

Para a delimitação de fronteiras desta ligação metálica, foram utilizados ‘Rigid Links’ nas arestas de cada elemento finito (conforme apresentado na Figura 72), compreendendo linhas que passam pelo centro de gravidade das secções ocas nas quais as forças internas serão aplicadas.

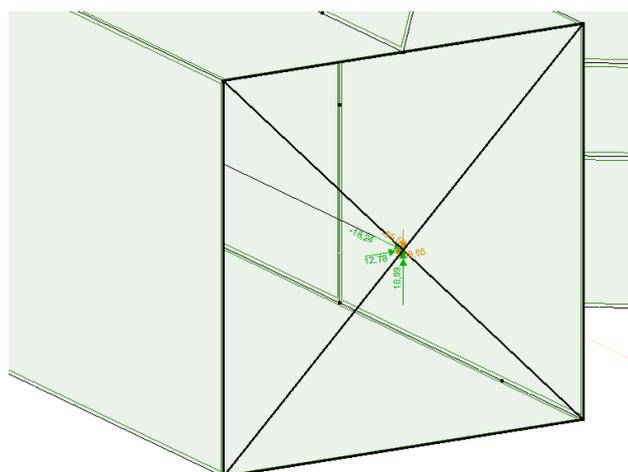


Figura 72 – Representação dos ‘Rigid Links’



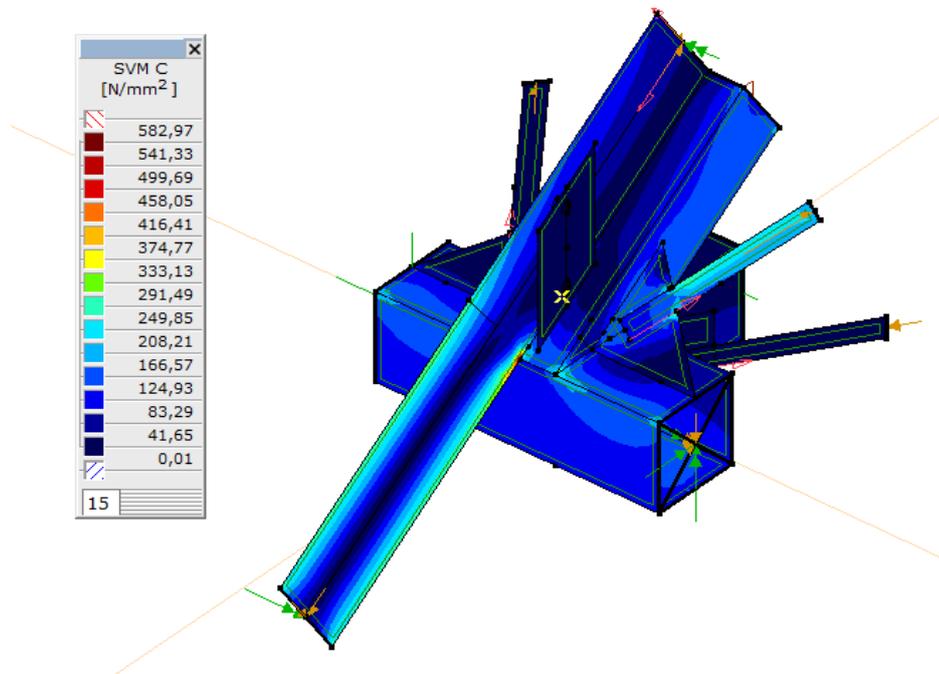


Figura 74 – Mapa de cores das tensões de Von Mises na secção central dos elementos

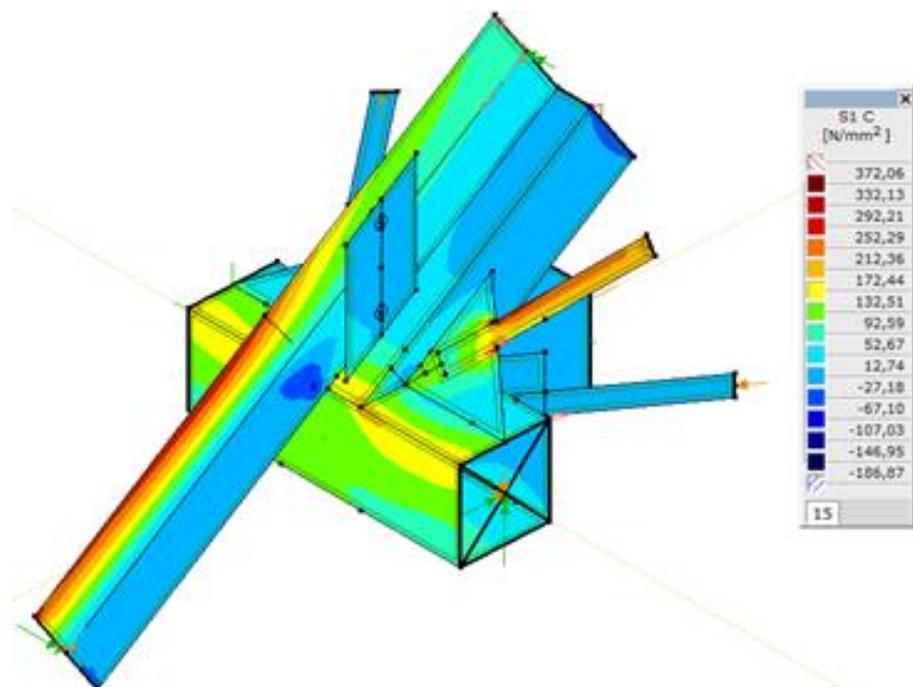


Figura 75 - Mapa de cores das tensões das tensões principais na secção central dos elementos

## 5 CONCLUSÕES

As conclusões do trabalho foram:

O IDEA Statica é uma ótima ferramenta quando se trata da verificação de segurança de ligações puramente metálicas. O CBFEM é um método analítico-numérico inovador e une o melhor dos dois mundos quando se trata da verificação de segurança de ligações metálicas: o método das componentes previsto nos Eurocódigos e o método dos elementos finitos (MEF), para quando as componentes não forem conhecidas e/ou para geometrias mais complexas.

Quanto ao uso de betão no IDEA Statica, é uma prática pouco recorrente no mercado entre os engenheiros projetistas e como resultado disto, tem-se na Figura 76 o resultado de uma enquete feita no Webinar (seminário online) realizado pela equipa do IDEA Statica no dia 27 de abril de 2022<sup>3</sup>. Para a pergunta “Para que tipo de estruturas de betão você usa o IDEA Statica com maior frequência?” a esmagadora maioria de 81% dos participantes responderam que nem sequer usam o IDEA Statica para o betão. O software é naturalmente muito mais conhecido pelo seu desempenho e fiabilidade das ligações metálicas, mas um dos outros motivos pelo qual os engenheiros projetistas não recorrem ao IDEA Statica para o uso de betão pode ser justamente pela análise demasiada conservadora deste material, sem mesmo dar a opção ao usuário de configurar as armaduras destes elementos que contribuem consideravelmente para a resistência aos esforços de tração e forças de corte.

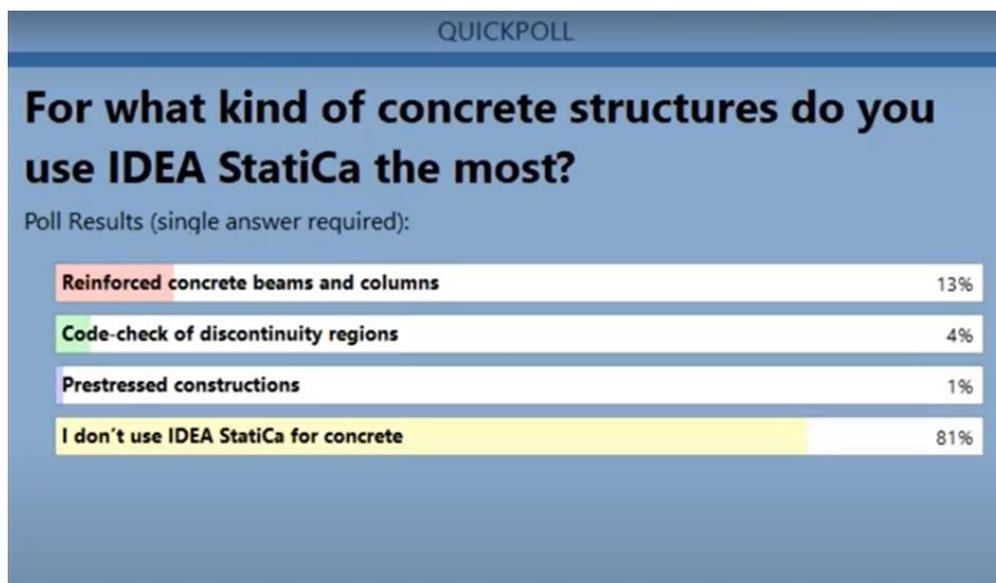
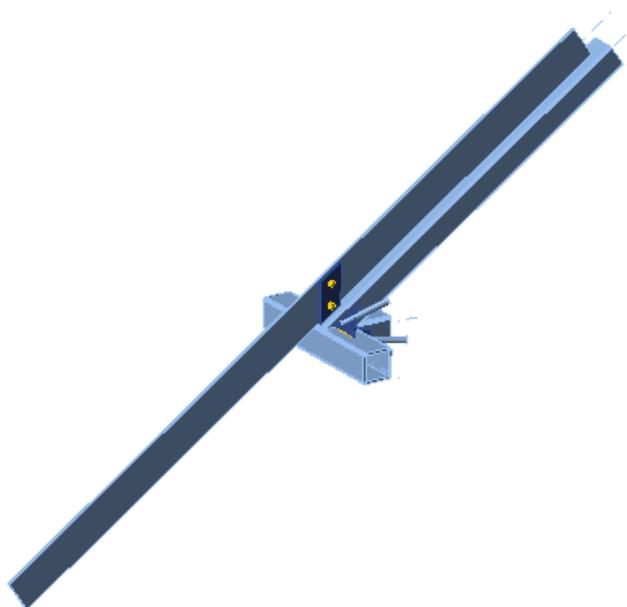


Figura 76 - Resultado da enquete (IDEA Statica Webinar - 27.04.2022; aos 36 min : 25s)

<sup>3</sup> Link para este vídeo encontra-se na referência bibliográfica [9]

O IDEA Statica tem uma interface ‘user friendly’, intuitiva e ainda conta com vários seminários online e videoaulas gravados na internet para auxiliar os novos utilizadores deste software. Não obstante, o IDEA Statica ainda apresenta algumas limitações no seu uso, tal como qualquer outro software disponível no mercado. Como exemplo disto, pode-se citar a ligação C20 (Figura 54) do projeto de Koch. Esta, apesar de apresentar um grau de complexidade considerável em sua geometria, a sua modelação no IDEA Statica implica em apenas uma sucessão numerosa de operações simples desde a criação do seu modelo até a verificação final de segurança. Já para o caso da ligação C11 (Figura 58) é o cenário contrário do que foi apresentado para a ligação C20, pois apesar de ser uma ligação com uma geometria muito mais simples, existem alguns fatores na sua modelação que implicam numa maior complexidade para o software. Por exemplo: a chapa 160 mm x 12 mm que vem em consola está em contato direto com a viga diagonal. Apesar de existir nas propriedades da operação ‘Weld or contact’ a opção de apenas estabelecer contato superficial entre os elementos ao invés de uma solda, quando esta operação é realizada, o software não compreende os limites de fronteiras de cada elemento (a viga quadrada e chapa retangular). Ou seja, o que acaba por acontecer é que, dentro do entendimento do IDEA Statica nesta ligação modelada, estes dois elementos estão supostamente paralelos e têm uma intersecção no infinito, conforme representado pela Figura 77, o que não é verdade. Mesmo que a atualização do modelo global no AxisVM para comportar estas chapas em consola com as suas respectivas excentricidades relativamente às vigas diagonais fosse um bom caminho para solucionar alguns problemas no IDEA Statica principalmente sobre as cargas que não estavam em equilíbrio, por limitações do próprio software, não foi suficiente.



**Figura 77 - Erro por defeito do software na modelação da ligação C11 (Koch)**

---

Por fim, pode-se concluir também que: mesmo que o IDEA Statica ainda tenha algumas limitações quanto a algumas de suas operações e principalmente nas ligações ao betão, o tempo de trabalho que estava previsto para este estágio curricular acabou por ser superior ao realmente necessário para a conclusão do trabalho designado. A facilidade de uso do software e a rapidez de cálculo, ainda recorrendo às normas europeias e MEF para argumentar os resultados obtidos através dos cálculos computacionais, o IDEA Statica é um ótimo software para a verificação de segurança de ligações metálicas. Comparando as potencialidades deste software com o AxisVM, apesar deste ser muito mais simples e limitado apenas às análises e verificações de segurança das ligações, o processo de modelação no IDEA Statica é muito mais rápido e intuitivo. Por outro lado, o AxisVM é um software muito mais completo e robusto, no qual é possível se fazer uma modelação mais detalhada das ligações através do MEF, visto que este não é um software de nicho voltado especificamente para as ligações, tal como no caso do IDEA Statica. Porém, demanda um tempo muito superior não só para a modelação e definição das forças internas, mas também para o cálculo computacional.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A.D. Simões, R. (2014), *manual de DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS* (3ª ed.). Maia: Sersilito
2. [https://www.ideastatica.com/case-studies/edge-amsterdam-west-dome-structure?utm\\_source=Newsletter&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=Case\\_study\\_-](https://www.ideastatica.com/case-studies/edge-amsterdam-west-dome-structure?utm_source=Newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=Case_study_-)
3. **Eurocódigo 3**, *EN 1993-1-8:2010 Projeto de estruturas de aço - Parte 1-8: Projeto de ligações*
4. S. Tankova, T. (2021), Apontamentos das Aulas de Modelação e Análise Computacional por Elementos Finitos - Especialização em Mecânica Estrutural, Universidade de Coimbra.
5. <https://www.ideastatica.com/support-center/general-theoretical-background>
6. [https://axisvmsupport.hu/manual/axisvm\\_manualx6\\_en.pdf](https://axisvmsupport.hu/manual/axisvm_manualx6_en.pdf)
7. Dias da Silva, V. (2004), *Mecânica e Resistência dos Materiais* (3ª ed.). Coimbra: ZUARI – Edição de Livros Técnicos, Lda.
8. <https://www.stadt-zuerich.ch/prd/de/index/Projekte/laufende-projekte/koch-areal.html#>
9. <https://www.ideastatica.com/webinars/what-is-new-in-idea-statica-22-0>

## ANEXO

### Project data

Project name	Quartierpark Koch, Zürich
Project number	--
Author	cb\mk
Description	Detail 4
Date	27/04/2022
Design code	EN



### Material

Steel	S 355
Concrete	C25/30

## Project item Verbindung 20

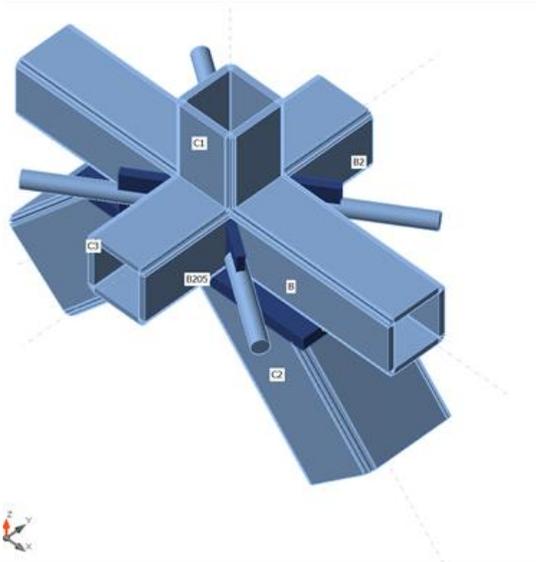
### Design

Name	Verbindung 20
Description	
Analysis	Stress, strain/ loads in equilibrium

### Members

#### Geometry

Name	Cross-section	$\beta$ - Direction [°]	$\gamma$ - Pitch [°]	$\alpha$ - Rotation [°]	Offset ex [mm]	Offset ey [mm]	Offset ez [mm]	Forces in
B	2 - SHS HF 120x120x12,5	180,0	0,0	0,0	0	0	0	Node
B205	2 - SHS HF 120x120x12,5	-90,0	0,0	0,0	0	0	0	Node
C1	2 - SHS HF 120x120x12,5	0,0	-90,0	0,0	0	0	0	Node
B2	2 - SHS HF 120x120x12,5	90,0	0,0	0,0	0	0	0	Node
P2	4 - Circle 30	-33,7	0,0	0,0	0	0	0	Node
P3	4 - Circle 30	33,7	0,0	0,0	0	0	0	Node
P4	4 - Circle 30	146,3	0,0	0,0	0	0	0	Node
P1	4 - Circle 30	-146,3	0,0	0,0	0	0	0	Node
C2	10 - SHS HF 180x180x16	0,0	48,0	0,0	0	0	30	Node
C3	10 - SHS HF 180x180x16	180,0	48,0	0,0	0	0	30	Node



### Cross-sections

Name	Material
2 - SHS HF 120x120x12,5	S 355
4 - Circle 30	S 355
10 - SHS HF 180x180x16	S 355

## Load effects (forces in equilibrium)

Name	Member	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	B	217,6	-0,4	-2,5	-0,3	-2,8	0,7
	B	-123,7	-0,9	0,2	-0,2	-0,3	-1,9
	B205	-83,1	-0,1	-1,2	-0,1	1,0	-0,6
	C1	-356,5	0,0	0,4	-0,2	-0,4	-0,1
	B2	-103,0	1,0	-3,3	0,5	6,7	2,7
	P2	52,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	P3	-4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	P4	177,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	P1	89,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	C2	-43,2	0,4	-3,5	0,4	5,0	2,9
	C3	-455,7	-0,6	-4,0	-0,2	8,3	-3,7

## Check

## Summary

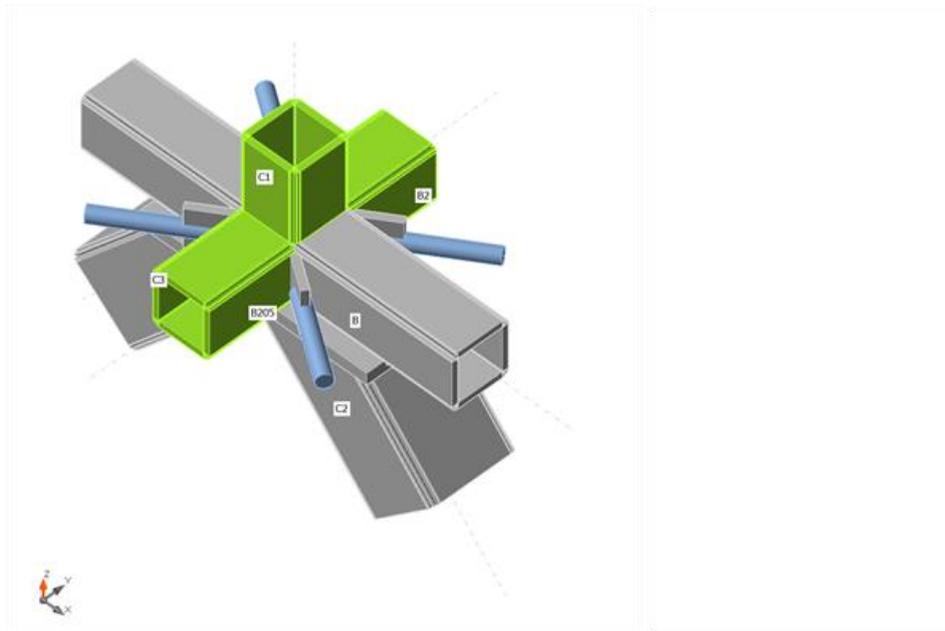
Name	Value	Status
Analysis	100,0%	OK
Plates	1,5 < 5,0%	OK
Buckling	Not calculated	
GMNA	Calculated	

## Plates

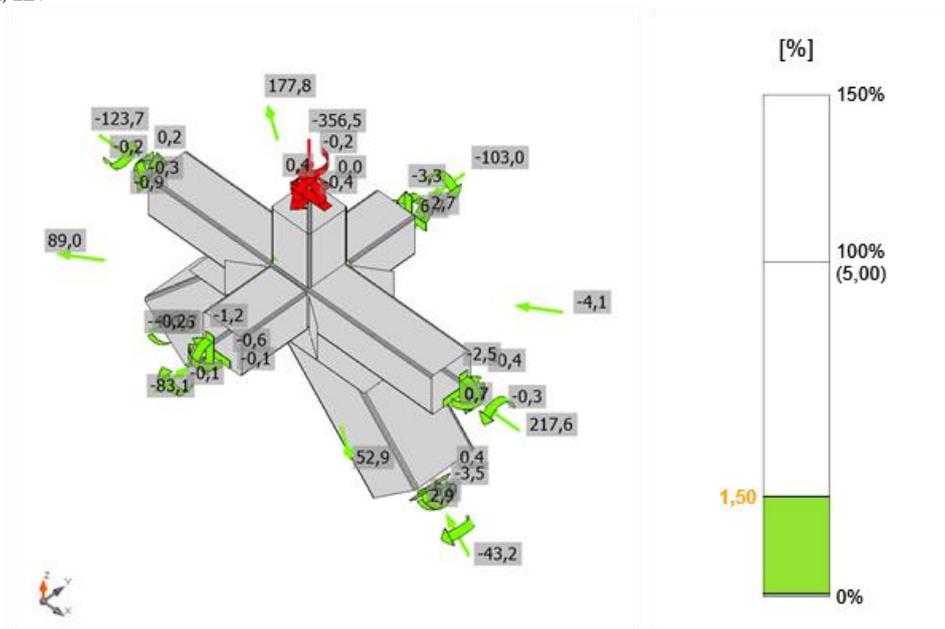
Name	Thickness [mm]	Loads	$\sigma_{Ed}$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$ [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
B	12,5	LE1	239,1	0,0	8,6	OK
B205	12,5	LE1	358,2	1,5	6,5	OK
C1	12,5	LE1	356,9	0,9	0,0	OK
B2	12,5	LE1	357,1	1,0	7,8	OK
C2	16,0	LE1	83,9	0,0	0,0	OK
C3	16,0	LE1	147,3	0,0	0,0	OK
SP1	25,0	LE1	45,2	0,0	1,6	OK
SP2	15,0	LE1	239,2	0,0	0,0	OK
SP3	15,0	LE1	355,7	0,3	0,0	OK
SP4	15,0	LE1	82,1	0,0	0,0	OK
SP5	15,0	LE1	83,4	0,0	0,0	OK

## Design data

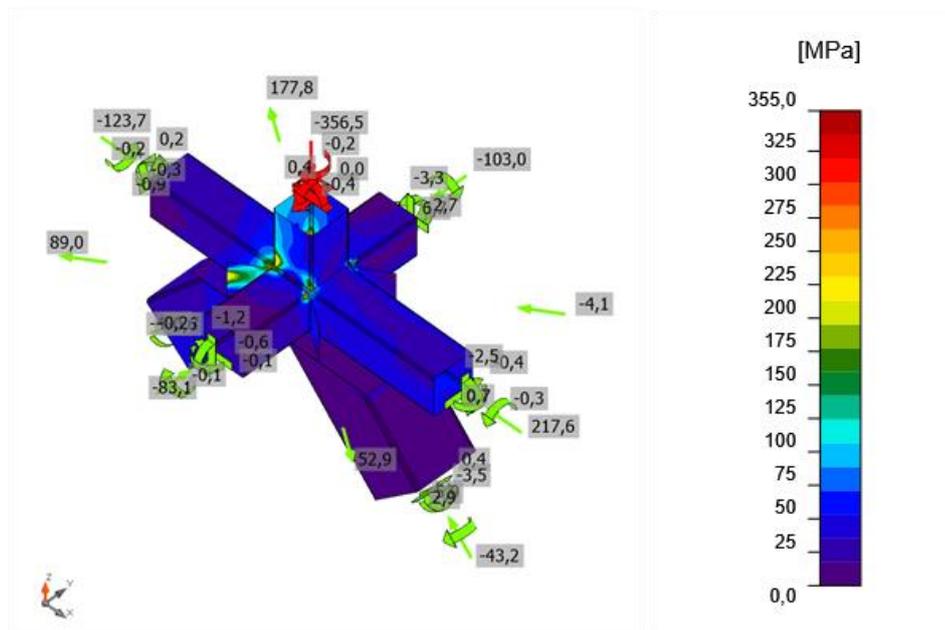
Material	$f_y$ [MPa]	$\epsilon_{lim}$ [%]
S 355	355,0	5,0



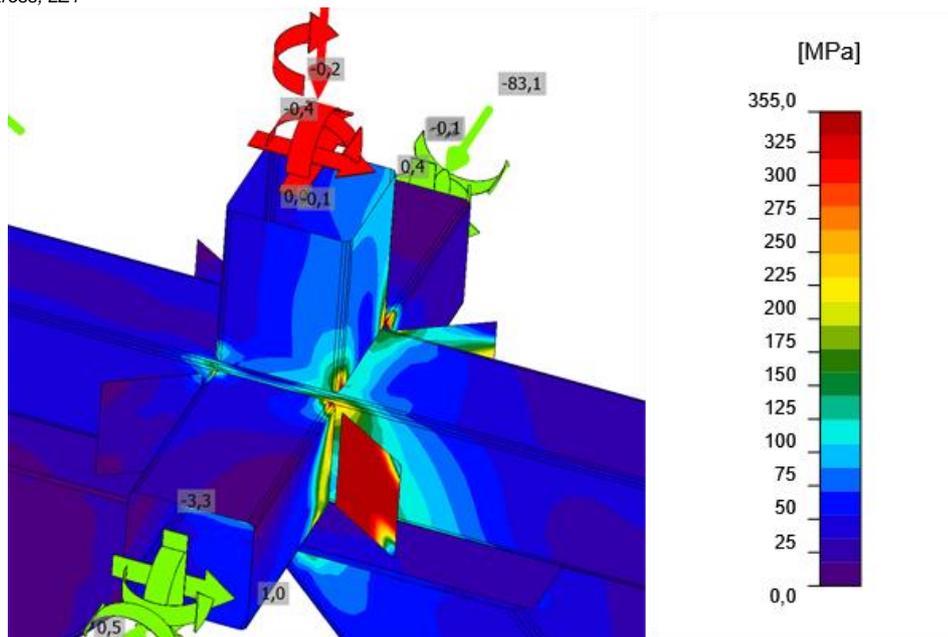
Overall check, LE1



Strain check, LE1



Equivalent stress, LE1



Equivalent stress, Perspective view turned 180°. Some areas in red are singularities due to low discretization of the element on curved edges

## Welds

Item	Edge	Throat th. [mm]	Length [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	$\sigma_{\perp}$ [MPa]	$\tau_{\parallel}$ [MPa]	$\tau_{\perp}$ [MPa]	Ut [%]	Status
B-arc 3	B205-w 1	12,5	95	LE1						OK
B-w 2	B205-w 1	12,5	95	LE1						OK
B-arc 3	B205-arc 1	12,5	3	LE1						OK
B-arc 3	B205-arc 2	12,5	2	LE1						OK
B-arc 3	B205-arc 3	12,5	2	LE1						OK
B-w 2	B205-w 2	12,5	95	LE1						OK
B-arc 4	B205-arc 4	12,5	2	LE1						OK
B-arc 4	B205-arc 5	12,5	2	LE1						OK
B205-w 3	C1-w 4	12,5	95	LE1						OK
B-arc 4	B205-w 3	12,5	95	LE1						OK
C1-arc 10	B205-arc 6	12,5	2	LE1						OK
C1-arc 9	B205-arc 7	12,5	2	LE1						OK
B-arc 4	B205-arc 8	12,5	2	LE1						OK
B-arc 4	B205-arc 9	12,5	2	LE1						OK
B-w 2	B205-w 4	12,5	95	LE1						OK
B-arc 3	B205-arc 10	12,5	2	LE1						OK
B-arc 3	B205-arc 11	12,5	2	LE1						OK
B-arc 3	B205-arc 12	12,5	3	LE1						OK
B-w 3	C1-w 1	12,5	95	LE1						OK
B-arc 7	C1-arc 1	12,5	2	LE1						OK
B-arc 7	C1-arc 2	12,5	2	LE1						OK
B-arc 7	C1-arc 3	12,5	3	LE1						OK
B-arc 7	C1-w 2	12,5	95	LE1						OK
B-w 3	C1-w 2	12,5	95	LE1						OK
B-arc 7	C1-arc 4	12,5	3	LE1						OK
B-arc 7	C1-arc 5	12,5	2	LE1						OK
B-arc 7	C1-arc 6	12,5	2	LE1						OK
B-w 3	C1-w 3	12,5	95	LE1						OK
B-arc 6	C1-arc 7	12,5	2	LE1						OK
B-arc 6	C1-arc 8	12,5	2	LE1						OK
B-arc 6	C1-arc 9	12,5	3	LE1						OK
B-arc 6	C1-w 4	12,5	95	LE1						OK
B-w 3	C1-w 4	12,5	95	LE1						OK
B-arc 6	C1-arc 10	12,5	3	LE1						OK
B-arc 6	C1-arc 11	12,5	2	LE1						OK
B-arc 6	C1-arc 12	12,5	2	LE1						OK
B-arc 10	B2-w 1	12,5	95	LE1						OK
B-w 4	B2-w 1	12,5	95	LE1						OK
B-arc 10	B2-arc 1	12,5	3	LE1						OK
B-arc 10	B2-arc 2	12,5	2	LE1						OK
B-arc 10	B2-arc 3	12,5	2	LE1						OK
B-w 4	B2-w 2	12,5	95	LE1						OK
B-arc 9	B2-arc 4	12,5	2	LE1						OK
B-arc 9	B2-arc 5	12,5	2	LE1						OK
C1-arc 4	B2-arc 6	12,5	2	LE1						OK

Item	Edge	Throat th. [mm]	Length [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	$\sigma_{\perp}$ [MPa]	$\tau_{\parallel}$ [MPa]	$\tau_{\perp}$ [MPa]	Ut [%]	Status
B-arc 9	B2-w 3	12,5	95	LE1						OK
B-w 4	B2-w 3	12,5	95	LE1						OK
C1-arc 3	B2-arc 7	12,5	2	LE1						OK
B-arc 9	B2-arc 8	12,5	2	LE1						OK
B-arc 9	B2-arc 9	12,5	2	LE1						OK
B-w 4	B2-w 4	12,5	95	LE1						OK
B-arc 10	B2-arc 10	12,5	2	LE1						OK
B-arc 10	B2-arc 11	12,5	2	LE1						OK
B-arc 10	B2-arc 12	12,5	3	LE1						OK
B-w 1	SP1	25,0	95	LE1						OK
B-w 1	SP1	25,0	95	LE1						OK
SP1	B-w 1	12,5	485	LE1						OK
SP1	B-w 1	12,5	485	LE1						OK
B205-w 1	SP1	25,0	95	LE1						OK
B2-w 1	SP1	25,0	95	LE1						OK
C1-w 4	B205-w 3	12,5	95	LE1						OK
C1-w 2	B2-w 3	12,5	95	LE1						OK
SP1	C2-w 1	16,0	148	LE1						OK
SP1	C2-arc 1	16,0	4	LE1						OK
SP1	C2-arc 2	16,0	5	LE1						OK
SP1	C2-arc 3	16,0	5	LE1						OK
SP1	C2-w 2	16,0	199	LE1						OK
SP1	C2-arc 4	16,0	5	LE1						OK
SP1	C2-arc 5	16,0	5	LE1						OK
SP1	C2-arc 6	16,0	4	LE1						OK
SP1	C2-w 3	16,0	148	LE1						OK
SP1	C2-arc 7	16,0	4	LE1						OK
SP1	C2-arc 8	16,0	5	LE1						OK
SP1	C2-arc 9	16,0	5	LE1						OK
SP1	C2-w 4	16,0	199	LE1						OK
SP1	C2-arc 10	16,0	5	LE1						OK
SP1	C2-arc 11	16,0	5	LE1						OK
SP1	C2-arc 12	16,0	4	LE1						OK
SP1	C3-w 1	16,0	148	LE1						OK
SP1	C3-arc 1	16,0	4	LE1						OK
SP1	C3-arc 2	16,0	5	LE1						OK
SP1	C3-arc 3	16,0	5	LE1						OK
SP1	C3-w 2	16,0	199	LE1						OK
SP1	C3-arc 4	16,0	5	LE1						OK
SP1	C3-arc 5	16,0	5	LE1						OK
SP1	C3-arc 6	16,0	4	LE1						OK
SP1	C3-w 3	16,0	148	LE1						OK
SP1	C3-arc 7	16,0	4	LE1						OK
SP1	C3-arc 8	16,0	5	LE1						OK
SP1	C3-arc 9	16,0	5	LE1						OK
SP1	C3-w 4	16,0	199	LE1						OK
SP1	C3-arc 10	16,0	5	LE1						OK

Item	Edge	Throat th. [mm]	Length [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	$\sigma_{\perp}$ [MPa]	$\tau_{\parallel}$ [MPa]	$\tau_{\perp}$ [MPa]	Ut [%]	Status
SP1	C3-arc 11	16,0	5	LE1						OK
SP1	C3-arc 12	16,0	4	LE1						OK
SP2		30,0	54	LE1						OK
B-w 2	SP2	15,0	94	LE1						OK
B-w 4	SP3	15,0	94	LE1						OK
SP3		30,0	43	LE1						OK
B-w 4	SP4	15,0	94	LE1						OK
SP4		30,0	43	LE1						OK
B-w 2	SP5	15,0	94	LE1						OK
SP5		30,0	43	LE1						OK
B205-w 4	SP2	15,0	94	LE1						OK
B205-w 2	SP5	15,0	94	LE1						OK
B2-w 4	SP4	15,0	94	LE1						OK
B2-w 2	SP3	15,0	94	LE1						OK

**Design data**

	$\beta_w$ [-]	$\sigma_{w,Rd}$ [MPa]	$0.9 \sigma$ [MPa]
S 355	0,90	435,6	352,8

**Detailed result for B-arc 3 B205-w 1**

Butt welds are assumed as full penetration and are not checked. Their resistance is assumed the same as that of the welded member -EN 1993 - 1 - 8 - 4.7.1.

**Buckling**

Buckling analysis was not calculated.

**Symbol explanation**

Symbol	Symbol explanation
$\epsilon_{pl}$	Strain
$\sigma_{Ed}$	Eq. stress
$f_y$	Yield strength
$\epsilon_{lim}$	Limit of plastic strain
$\sigma_{w,Ed}$	Equivalent stress
$\sigma_{w,Rd}$	Equivalent stress resistance
$\sigma_{\perp}$	Perpendicular stress
$\tau_{\parallel}$	Shear stress parallel to weld axis
$\tau_{\perp}$	Shear stress perpendicular to weld axis
$0.9 \sigma_{w,Rd}$	Perpendicular stress resistance - $0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2}$
$\beta_w$	Correlation factor EN 1993-1-8 tab. 4.1
Ut	Utilization
$U_{tc}$	Weld capacity utilization

## Code settings

Item	Value	Unit	Reference
$\gamma_{M0}$	1,00	-	EN 1993-1-1: 6.1
$\gamma_{M1}$	1,00	-	EN 1993-1-1: 6.1
$\gamma_{M2}$	1,25	-	EN 1993-1-1: 6.1
$\gamma_{M3}$	1,25	-	EN 1993-1-8: 2.2
$\gamma_C$	1,50	-	EN 1992-1-1: 2.4.2.4
$\gamma_{Inst}$	1,20	-	EN 1992-4: Table 4.1
Joint coefficient $\beta_j$	0,67	-	EN 1993-1-8: 6.2.5
Effective area - influence of mesh size	0,10	-	
Friction coefficient - concrete	0,25	-	EN 1993-1-8
Friction coefficient in slip-resistance	0,30	-	EN 1993-1-8 tab 3.7
Limit plastic strain	0,05	-	EN 1993-1-5
Detailing	No		
Distance between bolts [d]	2,20	-	EN 1993-1-8: tab 3.3
Distance between bolts and edge [d]	1,20	-	EN 1993-1-8: tab 3.3
Concrete breakout resistance check	Both		EN 1992-4: 7.2.1.4 and 7.2.2.5
Use calculated $a_b$ in bearing check.	Yes		EN 1993-1-8: tab 3.4
Cracked concrete	Yes		EN 1992-4
Local deformation check	No		CIDECT DG 1, 3 - 1.1
Local deformation limit	0,03	-	CIDECT DG 1, 3 - 1.1
Geometrical nonlinearity (GMNA)	Yes		Analysis with large deformations for hollow section joints
Braced system	No		EN 1993-1-8: 5.2.2.5