



Dimensionamento e simulação de estrutura de aço (LSF)

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

Edgar Ferreira Macedo

Leiria, março 2025



Dimensionamento e simulação de estrutura de aço (LSF)

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

Edgar Ferreira Macedo

Trabalho de Projeto realizado sob a orientação do Professor Doutor Rui Miguel Barreiros Ruben e do Professor Doutor Mário António Simões Correia.

Leiria, março de 2025

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a/o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica Produção Industrial, no ano letivo 2024/2025, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Agradecimentos

Neste espaço gostaria de deixar o meu agradecimento a todos os que me acompanharam de uma forma ou outra neste percurso.

Ao Professor Doutor Mário António Simões Correia e ao Professor Doutor Rui Miguel Barreiros Ruben, pela orientação e disponibilidade no auxílio à realização deste projeto.

À empresa Bloken, e seus colaboradores por toda a ajuda e simpatia que demonstraram para comigo desde o primeiro dia. Com um agradecimento especial ao Eng. Alexandre Jorge por se mostrar disponível e interessado ao longo do processo deste projeto.

Aos meus amigos e colegas por me ajudarem e motivarem ao longo de todo este percurso.

Também quero reconhecer o apoio firme da minha companheira, Raquel, pela sua paciência, compreensão e encorajamento que foram inestimáveis.

Por último, mas não menos importante, quero expressar toda a minha gratidão à minha família pelo amor incondicional, apoio e orientação ao longo da minha vida académica e pessoal.

Resumo

O presente relatório de Projeto aborda o sistema *Light Steel Framing* (LSF) como uma solução construtiva moderna, que se destaca pela sua sustentabilidade e rapidez de montagem. Este estudo concentrou-se na análise estrutural de perfis metálicos enformados a frio, onde inclui a avaliação de vigas compostas formadas pela combinação de perfis C e U. Foram utilizadas duas ferramentas computacionais como Tricalc e Abaqus para simular o comportamento estrutural, permitindo desta forma uma análise de deformações, tensões e observar o desempenho global dos perfis metálicos quando submetidos a carga.

Os resultados obtidos mostraram que a combinação dos perfis e materiais complementares, como EPS, lã e gesso cartonado, contribui significativamente para a redução de cargas permanentes de toda a estrutura de um edifício, assegurando a eficiência estrutural. Além disso, verificou-se que as vigas compostas oferecem maior capacidade de carga e rigidez, comparativamente com os perfis simples, tornando-se numa solução eficaz para estruturas mais exigentes e que requerem suportar uma maior carga.

Este sistema LSF é uma alternativa viável e sustentável, alinhada às necessidades de um setor que se encontra em evolução.

Palavras-chave: Light Steel Framing, Perfis metálicos enformados a frio, Vigas compostas, Simulação Computacional

Abstract

This project explores the *Light Steel Framing* (LSF) system as a modern construction solution, recognized for its sustainability and rapid assembly. The study focused on the structural analysis of cold-formed steel profiles, including the evaluation of composite beams formed by combining C and U profiles. Computational tools such as Tricalc and Abaqus were utilized to simulate structural behavior, enabling the analysis of stresses, strains, and the overall performance of steel profiles under loading.

The results demonstrated that the combination of steel profiles with complementary materials, such as EPS, mineral wool, and gypsum board, significantly reduces permanent loads while ensuring structural efficiency. Furthermore, composite beams were shown to offer greater load-bearing capacity and stiffness compared to simple profiles, making them an effective solution for more demanding structures requiring higher load resistance.

The LSF system is presented as a viable and sustainable alternative, aligned with the evolving needs of the construction sector.

Keywords: Light Steel Framing, Cold-Formed Steel Profiles, Composite Beams, Computational Simulation

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de tabelas	xi
Lista de Abreviaturas	xii
1. Contextualização e Objetivos	1
1.1. Introdução	1
1.2. Enquadramento	1
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Estrutura do projeto.....	3
2. Projeto de Estruturas com LSF.....	4
2.1. Processo de Construção LSF	4
2.2. Projeto e Processo de fabrico.....	5
2.3. Vantagens e desvantagens do Light Steel Framing	9
2.4. Materiais.....	10
2.5. Perfis normalizados	14
2.6. Constituição de Paredes e Lajes	16
2.6.1. Processo de Ancoragem de paredes.....	16
2.6.2. Paredes.....	17
2.6.3. Lajes	19
2.7. Vigas articuladas (treliças)	23
3. Perfis e métodos	26
3.1. Perfis em análise	26
3.1.1. Perfis Simples.....	26
3.1.2. Vigas Compostas	26

3.2. Software Tricalc	28
3.2.1. Processo geral para análise do comportamento de perfis :.....	28
3.2.2. Análise Tricalc - Comportamento dos perfis C.....	28
3.2.3. Análise Tricalc - Comportamento dos perfis SHS (Square Hollow Sections) 30	
3.3. Análise Abaqus	30
3.3.1. Análise Abaqus – Comportamento dos Perfis C.....	31
3.3.2. Perfis C.....	31
3.3.3. Vigas Compostas 2C e 2R.....	31
3.3.4. Análise Abaqus – Comportamento dos Perfis Quadrados (SHS - Square Hollow Sections).....	32
4. Resultados e discussão	34
4.1.1. Análise Perfis simples - lajes	34
4.1.2. Análise com Software Tricalc	36
4.1.3. Análise com Software Abaqus	40
4.1.4. Análise comparativa global de resultados.....	41
4.1.5. Estudo comparativo de treliças	45
5. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	46
5.1.1. Conclusões	46
5.1.2. Trabalhos Futuros.....	47
Bibliografia	48

Lista de Figuras

Figura 1 - Construção em Light Steel Framing	5
Figura 2 -Etapas consecutivas de aço enformado a frio (Laim, 2011)	7
Figura 3 – Operações possíveis de realizar num perfil LSF (Filhos, 2021).....	8
Figura 4 - Composição de uma parede exterior no sistema LSF	10
Figura 5- Fixação de Painéis OSB (Silvestre, Pires, & Santos, 2013).....	11
Figura 6 - Placas MGO (Placa magoxx, 2024).....	12
Figura 7 - Parafusos SFS utilizados na ligação de elementos de uma estrutura LSF; a) SFS SD4-F, b) SFS SD6-H15, c) SFS SD14-H15 (Bevilaqua, 2005).....	13
Figura 8 - Parafuso SFS SC2/21, utilizado para acoplar placas lacas OSB e MGO (Bevilaqua, 2005)	14
Figura 9 - A) Perfis Simples; B) Secções compostas abertas; C) Secções compostas fechadas.....	15
Figura 10 - Dimensionamento de Perfil C e Perfil U	15
Figura 11 - Buchas Mecânicas e Químicas utilizadas na ancoragem. (Andrade, 2016)	17
Figura 12 - Exemplo de uma Parede Estrutural com vão	17
Figura 13 - Designação da ombreira consoante o número de montantes (Rego, D. J. M, 2012).....	18
Figura 14 - Exemplo de Viga de Cabeceira.....	18
Figura 15 - Montantes verticais não estruturais.....	19
Figura 16 - Montantes da laje alinhados com montantes das paredes	20
Figura 17 - Exemplo do perímetro exterior de uma casa.....	21
Figura 18 - Diferentes disposições da laje de cobertura; a) Lajes orientadas horizontalmente; b) Lajes orientadas verticalmente	21
Figura 19 – Exemplo de um perímetro exteriores de uma casa	22
Figura 20 – Influencia da disposição de uma viga numa laje de cobertura; a) Viga disposta verticalmente; b) Viga disposta horizontalmente	22
Figura 21 - Cantoneira realiza a união dos painéis nas lajes.	23
Figura 22 - Ligação entre Viga e um painel de laje.....	23
Figura 23 - Detalhe das ligações numa treliça articulada	24
Figura 24 - Colapso por esmagamento de um nó (Daltro, 2016).....	25
Figura 25 - Treliça com aparafusamento nas almas do perfil C (Bloken 2018).....	25
Figura 26 - Dimensionamento de perfis no software Tricalc; a) C90; b) C150; c) C200	28

Figura 27 - Dimensionamento de perfis quadrangulares (SHS).....	30
Figura 28 --A) Definição de apoios e cargas em Perfis C; B) Deformação do perfil no seu comprimento; C) Deformação da secção vista frontal	31
Figura 29 - Processo de simulação e análise de Vigas compostas 2C; A) Colocação de pontos de união; B) Condições Fronteira e cargas; C) e D) Análise de Deformações	32
Figura 30 - Processo de Simulação e análise de vigas compostas 2R; A) Colocação de pontos de união; B) Condições Fronteira e cargas; C) e D) Análise de Deformações	32
Figura 31- Simulação e análise de cargas de vigas compostas em perfis SHS; A) Condições Fronteira e cargas; B) Análise de Deformações	33
Figura 32 -- Área de influência em cada perfil da laje	34
Figura 33 - Resistência do perfil C90 a cargas de: a) 1kN e b) 5kN	36
Figura 34 - Resistência de perfis SHS90 a uma carga de 1kN/m e 5kN/m	39
Figura 35 - Apresentação do elemento de torção nos perfis C e 2R (Abaqus).....	43
Figura 36 - Comportamento de um perfil SHS sujeito a cargas.....	44

Lista de tabelas

Tabela 1 - Diferentes dimensionamentos de Perfis C.....	15
Tabela 2 - Diferentes dimensionamentos de Perfis U.....	16
Tabela 3 - Dimensões para possíveis perfis C (Perfis BLOKEN)	26
Tabela 4 - Dimensões para possíveis perfis U (Perfis BLOKEN).....	26
Tabela 5 - Diferentes tipos de Vigas Compostas.....	27
Tabela 6 - Definição dos perfis apoios e distâncias.....	29
Tabela 7 - Dimensões de perfis quadrados (SHS)	30
Tabela 8 – Estudo dos momentos fletores	35
Tabela 9 - Deslocamento de diferentes secções a uma carga distribuída de 1kN/m – (Software Tricalc)	37
Tabela 10 - Deslocamento de diferentes secções a uma carga distribuída de 5kN/m – (Software Tricalc).....	37
Tabela 11 - Flecha das diferentes secções para uma carga distribuída de 1kN/m – (Software Tricalc).....	38
Tabela 12 - Flecha das diferentes secções para uma carga distribuída de 5kN/m (Software Tricalc)	38
Tabela 13 - Deslocamento de diferentes secções SHS sujeito a uma carga distribuída de 1kN/m (Software – Tricalc).....	39
Tabela 14 - Deslocamento de diferentes secções SHS sujeito a uma carga distribuída de 1kN/m (Software – Tricalc).....	39
Tabela 15 - Deslocamento de diferentes secções a uma carga distribuída de 1kN/m – (Software Abaqus)....	40
Tabela 16 - Deslocamento de diferentes secções a uma carga distribuída de 5kN/m – (Software Abaqus)....	40
Tabela 17 - Deslocamento de secções SHS perante uma carga distribuída de 1kN/m	41
Tabela 18 - Deslocamento de secções SHS perante uma carga distribuída de 5kN/m	41
Tabela 19 - Comparação de resultados dos Softwares Tricalc e Abaqus (Perfis C; 2C; 2R - carga 1kN/m) ..	42
Tabela 20 - Comparação de resultados dos Softwares Tricalc e Abaqus (Perfis C; 2C; 2R - carga 5kN/m) ..	42
Tabela 21 - Comparação de resultados dos Softwares Tricalc e Abaqus (Perfis SHS - carga 1kN/m)	43
Tabela 22 - Comparação de resultados dos Softwares Tricalc e Abaqus (Perfis SHS - carga 5kN/m)	43
Tabela 23 - Comparação de resultados dos Softwares Tricalc e Abaqus (Perfis C; 2C; 2R e SHS - carga 5kN/m)	44
Tabela 24 - Estudo comparativo de treliças.....	45

Lista de Abreviaturas

LSF – Light Steel Framed

OSB - Oriented Strand Board

CNC - Control Numérico Computorizado

CAD/CAM Computer-Aided Design/ Computer-Aided Manufacturing

BIM - Building Information Modeling

XPS - Poliestireno Extrudido

EPS -Poliestireno Expandido

SHS - Square Hollow Sections

1. Contextualização e Objetivos

1.1. Introdução

Desde sempre o Homem utilizou métodos tradicionais para a construção das suas casas. Utilizando inicialmente pedra e madeira passando também por tijolo e betão armado, chegando também à utilização de aço.

O método de construção de LSF (Ligth Steel Framing) remonta ao final do século XIX nos Estados Unidos da América, tendo sido impulsionado pela grande necessidade de construção de habitações devido ao elevado crescimento populacional. Após a 2ª Guerra Mundial e devido ao elevado crescimento da produção de aço, bem como, a necessidade de construção de habitações mais resistentes, passou a ser uma possibilidade viável na construção civil (Headers, 2017).

Este tipo de construção tem muitos conceitos baseados no Wood Frame, que é considerado uma típica construção americana utilizando madeira como matéria-prima de base. O sistema de Light Steel Framing é também projetado para superar algumas lacunas que o sistema tradicional de madeira possui como a sua vulnerabilidade ao fogo e também a uma maior resistência mecânica.

A utilização crescente deste método de construção tem vindo a ganhar reputação e aceitação globalmente, havendo países como o Reino Unido e países escandinavos como a Suécia e a Dinamarca que adotaram esta técnica. Outro dos fatores que auxilia no crescimento desta aceitação está relacionado com a sustentabilidade e eficiência da construção, tendo excelentes resultados no que diz respeito à eficiência energética, durabilidade e resistência, havendo também a facilidade logística de serem transportados já pré-montados para o local da obra.

Este projeto contou com a colaboração da empresa Bloken, sediada em Pombal, cuja parceria desempenhou um papel determinante no aprofundamento dos conhecimentos técnicos e na obtenção de resultados. O envolvimento direto com a Bloken permitiu uma análise mais rigorosa das metodologias aplicadas no setor da construção *Light Steel Framed*, contribuindo significativamente para a aprendizagem e obtenção de resultados alinhados com a realidade profissional.

1.2. Enquadramento

A designação LSF remete para o facto de todos os perfis serem fabricados a partir de chapas de aço de reduzida espessura, permitindo deste modo enformar a chapa com a secção pretendida. A esbelteza do perfil permite que os painéis realizados tenham um peso relativamente baixo, surgindo assim a classificação de aço leve.

O aço é o principal elemento estrutural da construção havendo também outros elementos que auxiliam nesse mesmo papel, como as placas de aglomerado de madeira, mais conhecidas por OSB (Oriented Strand Board) (Bezerra, 2016).

Atualmente pode-se considerar o aço como um dos principais protagonistas na construção civil sendo bastante versátil e utilizado na construção de vigas, coberturas, lajes, bem como em toda a construção e reabilitação de edifícios. Este tipo de construção, é vista como uma solução mais amigável ao ambiente que o sistema tradicional de alvenaria, visto que nos dias que correm a sustentabilidade é um fator bastante importante e de interesse no cotidiano. A reciclagem e a reutilização desta matéria-prima fazem com que este sistema tenha uma grande vantagem diminuindo o impacto ambiental (Cardoso, 2018).

Apesar do crescimento da construção em aço leve, este ainda não é o mais habitual a ser considerado tanto pelos clientes, como pelos construtores devido à falta de divulgação e formação, assim como a difícil aceitação devido a uma barreira cultural por parte da população. Por último é importante de salientar que os preços podem ser mais elevados comparativamente à típica construção tradicional devido às elevadas margens de lucros por falta de competitividade na indústria. No entanto as suas características como o isolamento e rapidez de construção faz com que este método seja mais apelativo e tenha a sua oportunidade do mercado.

A redução do peso de um edifício resultante da utilização dos materiais utilizados resulta em menores forças de inércia, que acaba por distribuir menos cargas ao solo. Em caso de sismo é capaz de absorver uma maior energia também devido a todas as ligações aparafusadas entre a estrutura.

1.3. Objetivos

Com a elaboração do presente projeto pretende-se como objetivo principal a investigação e análise do uso de Light Steel Framing (LSF) no setor da construção civil, tendo um foco importante na constituição de vigas compostas e a importância das mesmas. O intuito inicial passa por compreender o processo construtivo, identificando os principais benefícios e limitações deste sistema em comparação com outros métodos construtivos, identificar os materiais utilizados, as configurações típicas das paredes e lajes LSF, bem como a identificação de vigas compostas. É explicado detalhadamente o processo de fabrico proporcionando uma compreensão abrangente e aprofundada dos procedimentos envolvidos desde o projeto ao corte do aço e montagem dos perfis. Por último com a utilização de ferramentas de simulação computacional para realizar estudos como o Tricalc (2024) e Abaqus ABAQUS/CAE. (2010) que têm a capacidade de simulação do comportamento dos perfis. Foi dada maior ênfase às vigas compostas que permite atingir resultados e ter a possibilidade de análise dos mesmos.

Com a obtenção destes resultados espera-se contribuir para o conhecimento técnico sobre o LSF, auxiliando pessoas na indústria sobre a tomada de decisão sobre o uso de vigas compostas neste sistema construtivo inovador.

1.4. Estrutura do projeto

Este projeto está organizado em cinco capítulos principais, cada um abordando diferentes aspectos do estudo sobre o sistema LSF. É apresentada de seguida uma visão geral da estrutura do projeto:

Capítulo 1: Contextualização e Objetivos

Este capítulo apresenta uma visão geral do projeto, destacando a importância do estudo sobre LSF e contextualização da sua relevância na construção civil. Definindo também os objetivos gerais e específicos do projeto.

Capítulo 2: Projeto de Estruturas LSF

Descreve as etapas e métodos envolvidos neste tipo de construção abordando os benefícios e limitações do uso do Light Steel Framing em comparação com outros métodos construtivos. Neste capítulo são também analisados alguns dos materiais utilizados no LSF, e as suas características.

É detalhado todo o processo de fabrico e as etapas necessárias para a fabricação da estrutura. Explorando os diferentes tipos de perfis utilizados e a sua integração para a criação de vigas compostas.

Capítulo 3: Perfis e métodos

No capítulo 3 são identificados os tipos de perfis utilizados e os tipos de vigas compostas fechadas que é possível realizar. Com os softwares Triclac e Abaqus, são analisadas as reações dos perfis e vigas quando sujeitos a cargas.

Capítulo 4: Resultados e discussão

É neste capítulo que são discutidos e interpretados os resultados das análises computacionais, bem como de questões abordadas durante a análise estrutural de lajes LSF.

Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros

Este último capítulo resume as principais conclusões do projeto. Propondo também áreas de pesquisas futuras, sugerindo possíveis melhorias e inovações no uso do LSF.

2. Projeto de Estruturas com LSF

2.1. Processo de Construção LSF

Os métodos de aplicação dos materiais variam de empresa para empresa, mas geralmente o processo de construção em *Light Steel Framed* tem a mesma abordagem, meticulosamente planejada e repensada até ao momento de execução. Este método envolve várias etapas, podendo ser divididas em 7 fases:

1. **Projeto:** A fase inicial envolve a análise detalhada das especificações do local, da arquitetura, e os materiais a serem utilizados. Com estas informações procede-se à realização do projeto estrutural que dependendo das cargas a que as lajes e paredes estão sujeitas, ajusta-se todos os perfis a serem utilizados considerando requisitos como segurança, custos e funcionalidade.
2. **Fabricação:** Baseado no projeto aprovado, os componentes de aço são cortados de acordo com as especificações. Existem dois sistemas de fabricação: sistema convencional, em que os perfis são medidos e cortados manualmente, e o sistema industrial, em que um equipamento CNC realiza toda atividade de corte.
3. **Preparação do terreno:** Preparar o solo e construir a sua fundação com o intuito de receber a estrutura metálica.
4. **Montagem da Estrutura:** Existem 3 métodos principais de montagem:
O método mais utilizado passa por montar painéis em fábrica: os perfis de aço previamente cortados acoplam-se uns aos outros criando painéis, estes por sua vez são unidos em obra, este método designa-se de “**Construção por Painéis**”, na Figura 1 mostrado um detalhe do processo de montagem em obra da estrutura. Outra possibilidade é a construção no local da obra, designado de “**Stick-Build**” por vezes as circunstâncias não permitem manobrar os painéis completos devido ao espaço disponível, havendo a necessidade de montar no devido local. Por último existe a “**Construção Modular**” que consiste na criação de toda a estrutura em três dimensões em fábrica sendo transportada num todo para o local designado.
5. **Isolamento:** Após a montagem de toda a estrutura são instalados todos os isolamentos térmicos, acústicos e de impermeabilização.
6. **Instalações elétricas e hidráulicas:** As instalações elétricas e hidráulicas são feitas dentro dos espaços estruturais previstos nos perfis, previamente estudados na fase de projeto, ou seja, os perfis já têm orifícios, definidos em projeto com a função de dar passagem a tubulações e fios elétricos.
7. **Acabamentos:** Após a estrutura estar completamente fechada, são realizados os acabamentos finais, tais como: pintura, revestimento, colocação de pisos, portas janelas, etc.



Figura 1 - Construção em Light Steel Framing

2.2. Projeto e Processo de fabrico

Projeto:

Um projeto deste sistema construtivo integra uma metodologia de produção CAD/CAM & BIM (Computer-Aided Design/ Computer-Aided Manufacturing & Building Information Modeling). Inicialmente é necessário avaliar a viabilidade do projeto, este primeiro passo requer um estudo de engenharia considerando uma análise estrutural para garantir que os perfis de aço resistem às cargas a que são sujeitos e atendem aos requisitos de segurança, este passo inclui a seleção dos perfis a serem utilizados e de algum modo solucionar os problemas relacionados com os vãos de maiores dimensões.

Após esta primeira análise do projeto e viabilizando o mesmo é necessário proceder à análise dos materiais selecionados para os revestimentos, isolamentos interiores e exteriores, com o intuito de perceber o espaço que ocupam e ter em atenção certos detalhes incluindo portas, janelas, quadros elétricos, entre outros.

Após o estudo de toda a arquitetura e materiais a serem utilizados, procede-se à modelação. Para este fim existem diversos tipos de softwares capazes de criar modelos 3D. O objetivo será a construção dos painéis tendo em atenção diversos fatores como a disposição e orientação dos perfis, distância entre eles, furação para passagem de cablagem e também para ancoragens.

Por fim realiza-se a análise estrutural para garantir que os perfis são capazes de atender às cargas sujeitas, existindo também a necessidade de observar a reação da estrutura perante os ventos e sismos tal como consta nos Eurocódigos (EN 1991-1-4:2005) e (EN 1998-1:2004) respetivamente, caso os resultados indiquem que a estrutura não cumpre os requisitos é necessário reavaliar e alterar a modelação.

Processo de Fabrico:

Existem fundamentalmente dois métodos de fabrico do processo LSF. Um considerado de método tradicional, em que todo o trabalho de corte é manual e outro método industrializado, que recorre à automatização de equipamentos. Ambos os métodos têm as suas vantagens e inconvenientes que devem ser avaliados dependendo da demanda e do objetivo da estrutura projetada.

Método Tradicional

É chamado de método tradicional quando não existe equipamento que realize operações de corte customizados, ou seja, o perfil já se encontra enformado, e com determinada dimensão sendo necessário realizar os cortes no perfil manualmente para obter as medidas desejadas. Normalmente, o método tradicional é um processo manual que se destaca pela habilidade do trabalhador e pouca padronização que na generalidade é realizada em obra.

Visto que por ser um trabalho manual e com maior personalização, este é o mais indicado para obras de reabilitação devido às inúmeras variáveis a que este tipo de obras está sujeito. Geralmente, as dimensões medidas nestes locais não são as mais precisas e para atender a estas necessidades a customização e intervenção do técnico instalador é necessária para a realização de pequenos ajustes dimensionais. Também com o decorrer da obra são necessários ajustes de ancoragens ao material já existente, e de ligações à nova estrutura complementar. Estas situações são vistas como casos únicos devido aos detalhes que apresentam, sendo diferente de obra para obra. Em virtude destas situações, o método tradicional é sempre uma opção e uma necessidade apesar da industrialização que é cada vez mais recorrente nos dias de hoje.

Método industrializado

O método industrializado privilegia a eficiência e padronização na produção, sendo um grande aliado à produção de grande escala, visto que utiliza processos automatizados que garantem a precisão e uniformidade dos perfis. Ao contrário do método tradicional, o objetivo passa por reduzir a atividade do homem no que diz respeito aos cortes dos perfis e conformações, obtendo uma qualidade superior e uma redução de erros de fabrico. As empresas utilizam este método para produzir uma grande fração das suas construções desde moradias a prédios, garantindo rapidez na construção da obra.

Processo de Fabrico Industrializado

O processo de fabrico dos perfis de LSF é uma etapa fundamental para a qualidade e desempenho das estruturas resultantes, os perfis são fabricados a partir de bobinas de aço com revestimento, normalmente com zinco. Antes de iniciar a produção é necessário realizar uma inspeção à matéria-prima medindo largura e espessura da chapa que se encontra na bobina.

Após a verificação da bobina, a mesma é desenrolada e inserida numa das extremidades no equipamento onde a chapa é cortada por punções nas dimensões pré-determinadas pelo projetista. A utilização de punções de corte serve para manter o corte limpo que é realizado, não deixando rebarba, este processo permite a abertura de orifícios para a passagem de cabos elétricos e canalização. De seguida a linha de perfilação conforma o aço, realizando diversos tipos de secções, desde secções U e C dependendo do equipamento, este processo é possível devido à passagem da chapa de aço num determinado número de rolos que irá dobrar o material conforme a sua passagem dando forma e as dimensões específicas da secção desejada. Por último, o perfil é cortado na cota desejada e inspecionado para garantir a qualidade e conformidade com as especificações. Na figura 2, é mostrado como é realizado o perfilamento das secções.

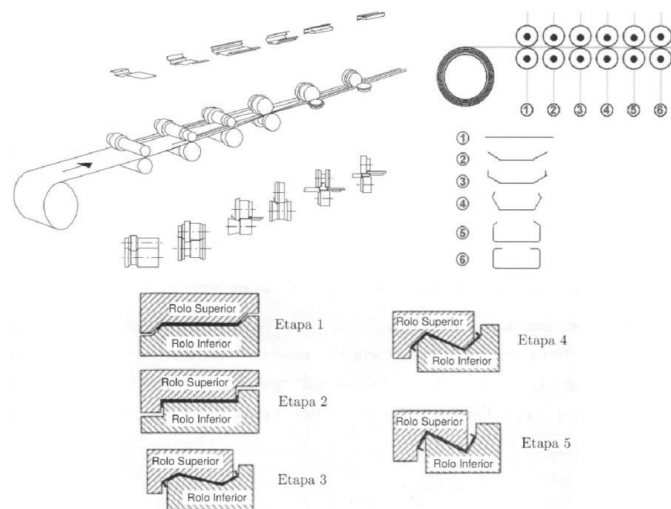


Figura 2 -Etapas consecutivas de aço enformado a frio (Laim, 2011)

Equipamento:

A eficiência e precisão dos equipamentos industriais que efetuam a conformação dos perfis são cruciais para garantir a uniformidade, qualidade e rapidez na produção em larga escala de perfis de aço utilizados no *Light Steel Framing*. A automação e a precisão destas máquinas desempenham um papel significativo na viabilidade deste método construtivo. Muitos dos equipamentos modernos utilizados na conformação a frio de aço galvanizado são equipamentos CNC, capazes de receber os programas e de executá-los com exatidão.

Existem vários tipos de operações que se podem realizar, de modo a facilitar o encaixe dos vários perfis uns nos outros (Figura 3). Os cortes, e furações realizadas pelo equipamento têm as seguintes designações:

Service Hole: Normalmente são utilizados para permitir a passagem de serviços, como tubulações elétricas, sistemas de ventilação. Estes furos ovalizados são estrategicamente posicionados para facilitar a instalação de serviços essenciais nas estruturas.

Index Hole: É um furo posicionado estrategicamente na alma do perfil para auxiliar no alinhamento dos painéis durante o processo de montagem.

Dimple: São feitos para criar pontos de fixação. No fundo é uma pequena depressão criada no aço, com o intuito de receber parafusos de fixação.

Flange Cut: É um corte realizado na lateral de um perfil de aço, este pode ter diferentes propósitos, como permitir uma junção específica com outro componente estrutural ou facilitar uma conexão específica na montagem do painel.

Swage: Um swage é uma diminuição gradual na largura de um perfil de aço. Normalmente é uma depressão realizada nas extremidades para reduzir o tamanho da sua secção permitindo o encaixe noutro montante

Notch: Um corte feito na alma de um perfil de aço para permitir a passagem de outros perfis. Normalmente estes perfis tendem a não suportar cargas, isto porque grande parte da sua secção é cortada retirando-lhe a sua resistência mecânica.

Lip Cut: Refere-se ao corte na aba do perfil de aço para criar uma abertura permitindo outro montante com um swage numa das extremidades encaixar no perfil.

Chamfer: Um chanfro, é realizado para remover arestas vivas e facilitar a inserção ou montagem, normalmente realizado em perfis que tenham a finalidade de uma diagonal.

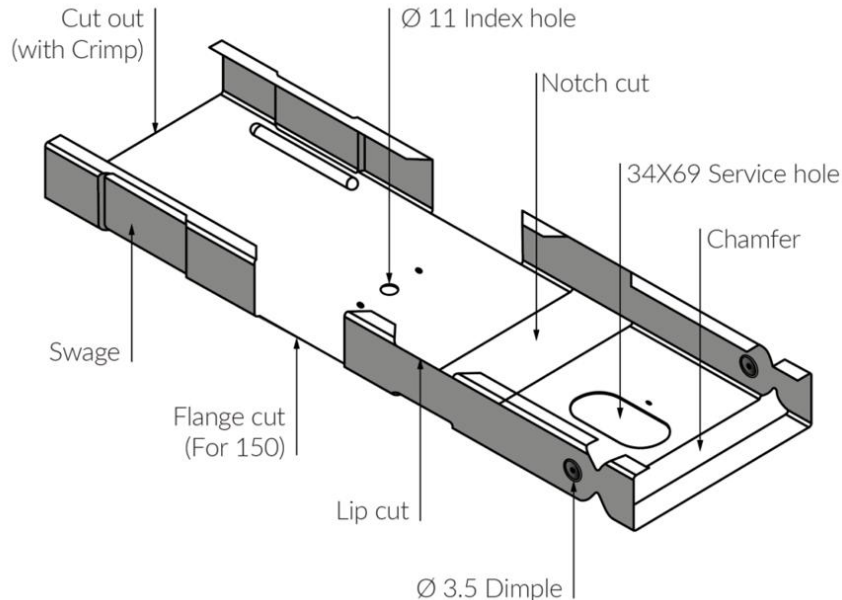


Figura 3 – Operações possíveis de realizar num perfil LSF (Filhos, 2021)

2.3. Vantagens e desvantagens do Light Steel Framing

Vantagens

A construção com *Light Steel Framed* destaca-se pela eficiência e rapidez. A sua célere montagem reduz significativamente o tempo de construção, além disso, garante que a estrutura permaneça intacta ao longo do tempo, mantendo a sua robustez e resistência.

Uma das grandes vantagens é a precisão dimensional, pois os componentes são fabricados em condições controladas, evitando erros e grandes desperdícios durante o processo construtivo.

A baixa inércia térmica na construção em LSF é o principal problema devido ao aço ser um bom condutor térmico, dessa forma os isolamentos podem ser utilizados para aumentar a eficiência energética. Apesar do desafio inicial, a implementação de isolamentos avançados e tecnologias sustentáveis permite uma redução significativa no consumo de energia da climatização. Este método de construção é também uma opção atrativa para pessoas e projetos que valorizem eficiência, velocidade e adaptabilidade sem comprometer a qualidade e funcionalidade do edifício, minimizando os impactos ambientais negativos em comparação com métodos construtivos convencionais.

Desvantagens

De acordo com a autora (Ferreira, 2014) considera que o sistema LSF é insuficiente para atender às necessidades habitacionais, quando comparado à construção tradicional e convencional.

Do ponto de vista da estrutura metálica, existem quatro restrições significativas. A primeira está relacionada com o número de pavimentos permitidos em casas unifamiliares. Estes edifícios podem ter até três pavimentos. A segunda restrição refere-se à capacidade de abertura dos vãos. A distribuição de cargas da estrutura LSF é contínua ao longo do contorno do edifício, ao contrário das estruturas de alvenaria. Assim sendo a transmissão de carga é afetada pelo aumento de vãos de grandes dimensões, o que pode comprometer o desempenho do edifício em situações sísmicas.

Os edifícios LSF apresentam baixa inércia térmica de acordo com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), o que significa que os seus elementos estruturais envolventes têm baixa capacidade de retenção de calor. Embora estes tenham uma massa menor, os materiais têm um coeficiente de transmissão térmica mais baixo que os materiais utilizados na alvenaria convencional. Isto significa que eles não requerem tanta energia para ser climatizados. No entanto, devido ao elevado calor durante o verão, essas construções enfrentam alguns problemas como por exemplo, uma construção que não inclua sistemas de ventilação bem projetados pode agravar os problemas de calor interno, aumentando a dependência de climatização artificial. (Martins, 2015).

A terceira restrição deve-se ao elevado custo inicial devido à utilização de materiais como aço, revestimentos e ainda a necessidade de mão de obra especializada. Por último, a quarta restrição deve-se à resistência ao fogo, sendo o aço um excelente condutor térmico, os perfis de aço e toda a estrutura fica mais suscetível a danos caso ocorra um incêndio.

2.4. Materiais

Nesta secção pretende-se dar a conhecer a composição de uma construção em LSF, ou seja, todos os materiais que são implementados em obra e também o porquê destes materiais serem utilizados. Na figura 4, consegue-se observar a composição de uma de parede exterior no sistema LSF.

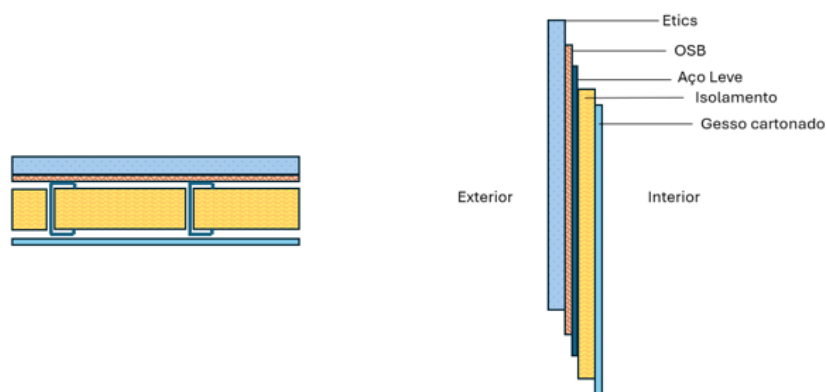


Figura 4 - Composição de uma parede exterior no sistema LSF

Poliestireno – EPS e XPS

Ao interpretar a Figura 4, entende-se que no lado exterior de um edifício encontra-se o revestimento polimérico de Poliestireno, um material formado por um aglomerado de grânulos rígidos. Este material pode ser produzido de duas formas distintas: pelo processo de extrusão, resultando no Poliestireno Extrudido (XPS), ou pelo processo de expansão, resultando no Poliestireno Expandido (EPS).

- **XPS (Poliestireno Extrudido):** Produzido através da extrusão, onde o poliestireno é fundido e forçado através de uma matriz para formar uma placa rígida com uma estrutura celular fechada. Este processo confere ao XPS propriedades superiores de resistência mecânica e baixa absorção de água.
- **EPS (Poliestireno Expandido):** Produzido pelo processo de expansão, onde pequenas esferas de poliestireno são aquecidas por vapor dentro de um molde, expandindo-se e fundindo-se para formar um bloco ou painel. A densidade do EPS pode ser ajustada variando-se a quantidade de matéria-prima e a regulação do processo de fabricação.

O Poliestireno, seja na forma de XPS ou EPS, é amplamente utilizado como material de isolamento térmico devido à sua baixa condutividade térmica. Em Portugal, para efeitos de cálculo, o valor médio do coeficiente de condutividade térmica é de 0,04 W/m°C. Este

valor reflete a eficiência do material em reduzir a transferência de calor, contribuindo para a eficiência energética dos edifícios (Santos & Poologanathan, 2021).

- **XPS:** Devido à sua estrutura celular fechada, o XPS possui uma excelente resistência à compressão e à absorção de água, tornando-o ideal para aplicações nas fundações, pisos e coberturas, onde é necessário um material com bastante durabilidade.
- **EPS:** Por ser mais leve e económico, é utilizado com mais frequência em aplicações onde a resistência à compressão não é tão crítica, como em paredes, coberturas leves e também como enchimento em construções.

OSB e MGO

As placas OSB (*Oriented Strand Board*), ou na tradução para português Painel de Fibras de Madeira Orientadas, têm sido amplamente utilizados na construção devido às suas propriedades estruturais e pela sua versatilidade. Como o seu nome indica são compostos por filamentos orientados de madeira tais como choupo e pinheiro que são misturadas com resina e cera. Estas placas são consideradas estruturais sendo relevantes também para o travamento lateral da estrutura e de apoio ao isolamento exterior, o travamento não é algo que se contabilize em termos de engenharia, no entanto é sem dúvida um bom método de construção que auxilia a estabilidade estrutural, como se demonstra a figura 5.

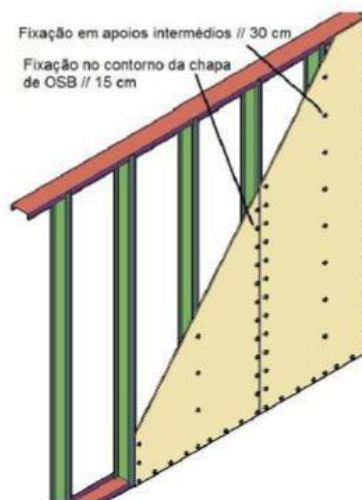


Figura 5- Fixação de Painéis OSB (Silvestre, Pires, & Santos, 2013)

Existem 4 classes de OSB para diferentes aplicações:

- OSB/1 - Painéis comuns para utilização interior e em condições secas.
- OSB/2 - Painéis para suporte de carga e utilização em condições secas.
- OSB/3 - Painéis para suporte de carga e utilização em condições húmidas.
- OSB/4 - Painéis de elevada resistência para suporte de carga e utilização em condições húmidas.

Tendo em consideração o ambiente em que os materiais atuam, o mais normalizado é a utilização do OSB/3 e OSB/4 (Andrade, R. M. da S. 2016).

As placas MGO, figura 6, são no fundo placas de magnésio, sendo a combinação de óxido de magnésio reforçada com várias camadas de fibras de vidro. Esta placa é conhecida por ser incomburente, resistente à humidade, e com boa resistência a impacto. Normalmente utilizada em situações de revestimento de fachadas ou coberturas onde o ambiente é bastante húmido e existe a possibilidade de contacto com água como é o caso dos balneários. Sendo incomburente significa também que é amplamente utilizada em chaminés e locais de elevada temperatura (Placa magoxx, 2024).



Figura 6 - Placas MGO (Placa magoxx, 2024)

Isolamento

O isolamento é um aspeto essencial para garantir o conforto e comodidade num edifício, responsável de garantir um bom isolamento térmico e acústico nas fachadas é capaz de proteger contra as variações térmicas e de ruído exterior. Existem diversos tipos de isolamentos, as lãs são as mais usuais no mercado, como a lã mineral, lã de vidro e a lã de rocha, são bastante utilizadas devido ao seu fator custo/benefício, e de se tratar de um sistema simples e de rápida de aplicação.

Gesso Cartonado

O gesso cartonado, é um material amplamente empregue em toda a construção civil, isto porque se destaca não apenas pela sua rápida aplicação, mas também pelo acabamento estético final. Além de suas qualidades superficiais, este material demonstra também boas propriedades como uma barreira interessante nas transferências térmicas. Assim, o gesso cartonado não só otimiza processos construtivos, mas também desempenha um papel crucial na melhoria do desempenho térmico, dando também alguma capacidade de proteção ao aço. Este material não oferece qualquer capacidade de resistência estrutural e dessa forma não são contabilizados nos cálculos que se realizam na engenharia (Cardoso, 2018).

Estas placas constituem um composto fabricado mediante a combinação de gesso, água, papel e aditivos específicos. Este material faz com que as divisórias apresentem uma notável capacidade de resistência à compressão (Pinheiro, 2015).

Parafusos

Uma enorme parte dos elementos que constituem um edifício em LSF são ligados através de parafusos autoperfurantes e autoroscantes. Estes parafusos utilizados são criados com o propósito de realizarem o próprio furo, sem necessidade de colocação de qualquer elemento de fixação como anilhas ou porcas. Existe uma grande variedade de parafusos e estes diferem consoante a função que exercem (Futureng, 2024).

Existem ligações de metal a metal, de gesso cartonado a metal, de madeira a metal e vice-versa.

Um dos parafusos mais utilizados, é o parafuso de cabeça rebaixada “SFS SD4-F” de Ø4,8mm por 16 mm de comprimento, Figura 7 com referência a), este é o parafuso utilizado na união de perfis simples, numa união de metal a metal, visto que é um tipo de parafuso de galvanizado com broca e também devido à sua cabeça de 1,5 mm de espessura que permite a sobreposição de placas estruturais ou de revestimento.

Existem outros parafusos para fazer uma ligação metálica com maiores espessuras, tal como o “SFS SD6-H15” que é possível observar na Figura 7 com a referência b), este parafuso é bastante utilizado na criação de vigas e junção vários perfis, pode fixar até 6mm de espessura.

Em certas ocasiões existe a necessidade de aparafusar o aço leve a aço laminado a quente, e devido à espessura que este conjunto pode ter utiliza-se o parafuso “SFS SD14-H15” como demonstra a Figura 7 com a referência c) capaz de penetrar o aço laminado, utilizando a ponta de broca não destruindo a restante rosca.

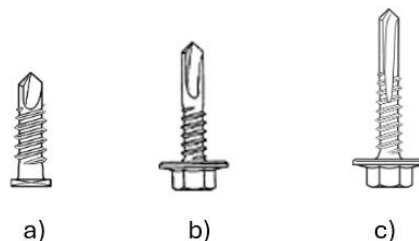


Figura 7 - Parafusos SFS utilizados na ligação de elementos de uma estrutura LSF; a) SFS SD4-F, b) SFS SD6-H15, c) SFS SD14-H15 (Bevilaqua, 2005)

Ao chegar ao processo de acoplamento de placas estruturais como o OSB ou placas de MGO aos perfis de aço leve, são utilizados parafusos capazes de abrir um orifício que garanta que a cabeça cônica do parafuso fique embutida na própria placa. Para estes fins é utilizado o parafuso “SFS SC2/21-PH2”, que é possível observar na Figura 8.



Figura 8 - Parafuso SFS SC2/21, utilizado para acoplar placas lacas OSB e MGO (Bevilaqua, 2005)

A carga exercida é transferida através dos perfis interligados pelo parafuso, que resiste ao esforço de corte. Os modos de falha que podem ocorrer são:

- **Inclinação e Alongamento:** ocorre um alongamento do furo do parafuso e também ocorre o cedimento da chapa devido à pressão induzida pelo parafuso.
- **Corte do Parafuso:** A resistência ao corte do parafuso é excedida e o parafuso divide-se em duas partes.
- **Rotura da chapa:** A resistência à tração da chapa é excedida devido à redução da secção transversal. Ocorre concentração de tensões em redor do furo que excede o limite de cedência do material. A fissura de falha é perpendicular à carga.

A falha por corte do parafuso ocorre apenas em chapa com maior espessura. Devido ao uso frequente de perfis finos como é o caso do aço leve, esse modo de falha é menos comum (Cláudio, 2018).

2.5. Perfis normalizados

Existem diferentes sistemas de designação de um aço, o Sistema EN é dada pela sua tensão de cedência, na Europa, as construções de estruturas metálicas seguem as diretrizes do Eurocódigo 3 – Projeto de Estruturas de Aço: Parte 1-3 Regras suplementares para membros e chapas enformadas a frio (EN1993-1-3,2006), que prescreve diversas classes de aços, no entanto, existe uma larga origem de chapas metálicas, que são oriundas de outros continentes, sendo comum a utilização de classes de resistência diferentes. Para construções de aço leve como as moradias e residências familiares, geralmente não há necessidade de utilizar aços com tensões de cedência acima de 280 MPa, visto que a utilização de aços mais resistentes pode aumentar o desgaste dos componentes dos equipamentos perfilhadores (Bezerra, 2016). De notar, que todo o aço utilizado é galvanizado, revestido com ligas de alumínio e zinco de 0.04mm (275g/m^2), existindo assim uma necessidade de ter um cuidado especial durante todo o processo de corte e montagem para não danificar este revestimento (Cláudio, 2018).

Existem diversas geometrias da secção transversal de aço leve, no entanto, a grande maioria das construções são compostas por perfis C, U e cantoneiras, podendo posteriormente haver várias combinações com estes elementos. A norma EC3-1-3 e parte da EC3-1-5 do ano 1991, tratam do projeto específico de estruturas de aço formado a frio, e deste modo pode-se classificar as diferentes secções de aço enformado a frio de três

formatos diferentes como remete a Figura 9: A) Secções simples abertas; B) Secções compostas abertas; C) Secções compostas fechadas.

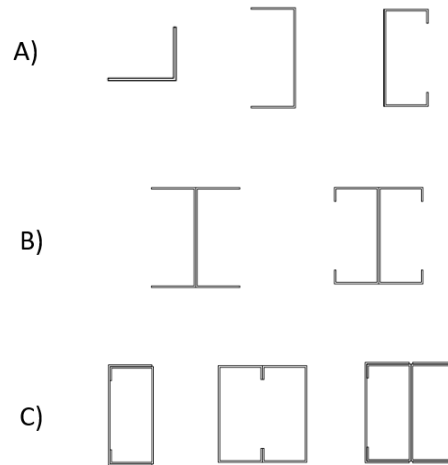


Figura 9 - A) Perfis Simples; B) Secções compostas abertas; C) Secções compostas fechadas

Os perfis C e U não tem uma medida universal (Figura 10), podendo variar as suas dimensões consoante o equipamento de produção e a necessidade do fabricante. A designação de cada secção geralmente é dada através da medida da alma do perfil, ou seja, um perfil C com uma alma (dimensão A) que tenha 90 mm é designado de “C90”, o mesmo acontece com um perfil U. Na Tabela 1 e na Tabela 2 são descritas as dimensões mais utilizadas na indústria.

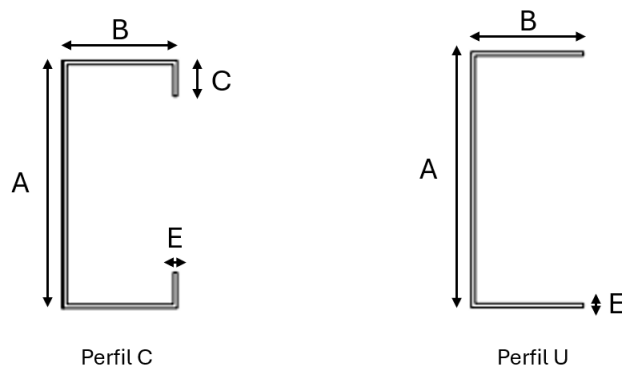


Figura 10 - Dimensionamento de Perfil C e Perfil U

Tabela 1 - Diferentes dimensionamentos de Perfis C

	Designação	A [mm]	B[mm]	C [mm]	E [mm]
Perfil C	C90	90	Entre: 40-50	Entre: 13 - 15	Entre: 1 - 2,5
	C150	150			
	C200	200			
	C250	250			
	C300	300			

Tabela 2 - Diferentes dimensionamentos de Perfis U

	Designação	A [mm]	B[mm]	E [mm]
Perfil U	U93	93	Entre: 40-50	Entre: 1 - 2,5
	U153	153		
	U203	203		
	U253	253		
	U303	303		

2.6. Constituição de Paredes e Lajes

2.6.1. Processo de Ancoragem de paredes

É importante que o processo de ancoragem dos perfis metálicos à fundação em betão seja feita de maneira segura e eficiente, de forma a proporcionar uma base sólida, assegurando a estabilidade e integridade estrutural.

Antes da colocação dos painéis nos locais corretos é necessário que o local se encontre limpo sem quaisquer objetos ou impurezas que possam interferir com o nivelamento do painel. Após este passo de inspeção e limpeza, procede-se à colocação de uma tela asfáltica, com o intuito de proteger a camada da galvanização da estrutura, e evitar os possíveis ruídos da dilatação da mesma.

Geralmente a tela asfáltica é composta com um aglutinante betuminoso e por fibras que conferem resistência e flexibilidade ao material. Este aglutinante betuminoso é responsável por proporcionar uma barreira impermeável, protegendo a estrutura metálica contra a humidade e agentes corrosivos. As fibras, por sua vez, aumentam a resistência mecânica da tela.

Assegurado o posicionamento e esquadria dos painéis procede-se à ancoragem dos mesmos. No mercado existem diversos tipos de buchas (Figura 11), podendo ser mecânicas e químicas, estas buchas são as responsáveis por fixar a estrutura à fundação. As buchas químicas de resistência antissísmica são as mais utilizadas no mercado devido à sua capacidade de fornecer uma fixação robusta e duradoura. Consistem num composto de resina e endurecedor que, quando misturados e inseridos num furo perfurado no betão, criam uma fixação extremamente forte após a cura. É especialmente eficaz às altas resistências e onde a estrutura pode estar sujeita a cargas dinâmicas, como em regiões sísmicas. (Barbieri, 2021)

As buchas mecânicas também são utilizadas, dependendo das exigências específicas do projeto. Estas funcionam por expansão dentro do furo do betão, criando uma fixação segura. No entanto, para aplicações onde as áreas são propensas a terremotos como é o caso do nosso país, o uso da bucha química é preferido.

Para assegurar uma distribuição uniforme das cargas e uma melhor eficiência da fixação, as buchas químicas devem ser espaçadas com um afastamento máximo de 1,20 metros entre si. Esta distribuição ajuda a evitar concentrações de tensão que possam comprometer a integridade da estrutura e da fundação. (Pires, 2013)



Figura 11 - Buehas Mecânicas e Químicas utilizadas na ancoragem. (Andrade, 2016)

2.6.2. Paredes

Para reduzir tempos e haver uma maior facilidade de montagem na obra, os painéis poderão ser montados em fábrica, ficando prontos para instalar no local. A Figura 12, ilustra como uma parede estrutural pode ser constituída tendo um vão de uma porta.

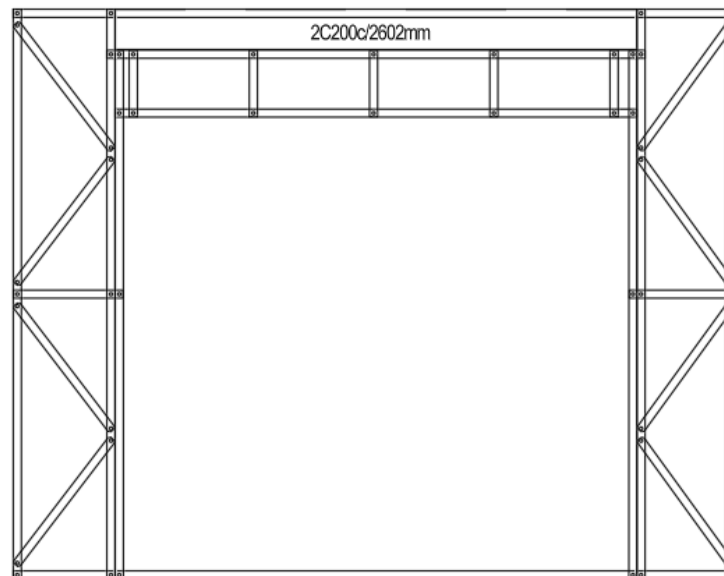


Figura 12 - Exemplo de uma Parede Estrutural com vão

É possível identificar que o painel é constituído por montantes verticais, horizontais e por diagonais. Os perfis que se encontram na diagonal servem como contraventamento impedindo que o painel saía da sua esquadria durante o seu transporte e também para resistir a cargas laterais que possam ocorrer. A horizontal que se encontra no meio da parede é designada de tarugo, tendo a função de proporcionar uma maior estabilidade à parede. Na existência de portas ou janelas como é o caso, existe a necessidade de dar apoio às ombreiras, colocando mais um ou dois montantes verticais dependendo da carga que está sujeita. Colocando apenas um montante auxiliar é designado de *King Stud*, colocando dois montantes tem o nome de *King duplo*, três montantes será *King triplo*. No fundo, o número de montantes de cada lado que auxilia a viga de cabeceira dará a sua

designação, como ilustrado na Figura 13. Neste exemplo é apenas um montante de cada lado, tendo um *King* (Rego, 2012).

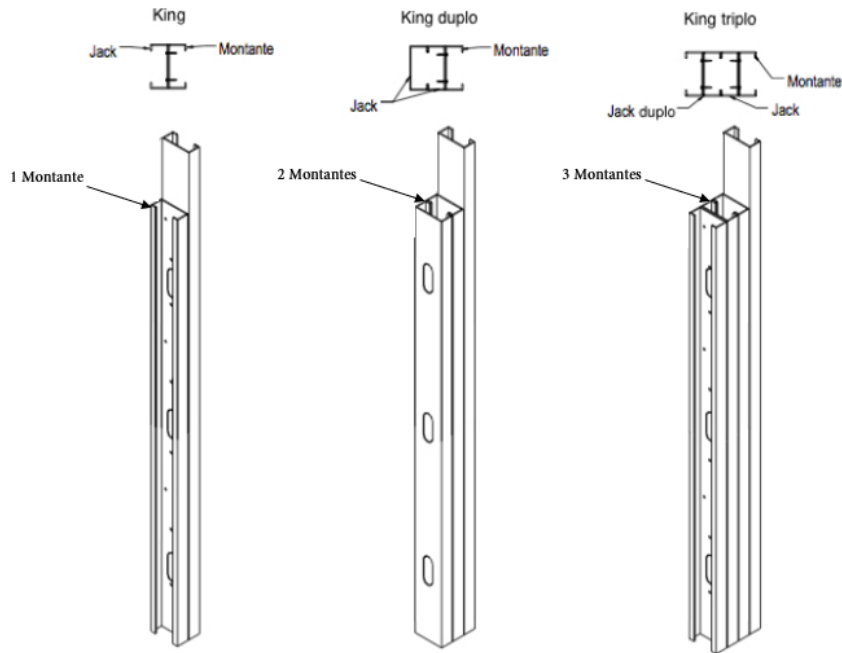


Figura 13 - Designação da ombreira consoante o número de montantes (Rego, D. J. M, 2012).

Para redirecionar a carga para os montantes mais próximos (*Kings*) foram criadas as vigas de cabeceira que por norma consistem em perfis rígidos unidos por dois perfis C costas com costas, como abordado anteriormente, resultando numa secção composta aberta, como demonstra a Figura 14. A secção dos perfis da viga de cabeceira é definida com base em informações como: a distância do vão e a possível carga a que está sujeita. Na Figura 14, observa-se que a viga de cabeceira é composta por dois perfis C200 com 2602mm cada um. A função destes perfis passa por distribuir a carga para os montantes verticais mais próximos.

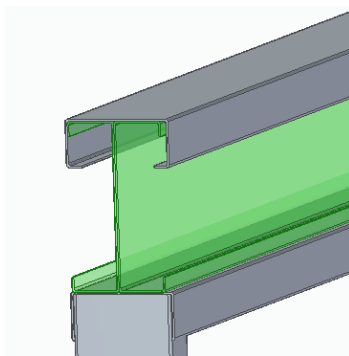


Figura 14 - Exemplo de Viga de Cabeceira

Os montantes verticais que se observam abaixo da viga de cabeceira não são estruturais, assinalado na Figura 15, estes têm a função de apenas receber as placas de isolamento e revestimento. Para serem considerados estruturais teriam que acabar no fundo do painel, ou seja, não poderiam ser interrompidos em qualquer lugar.

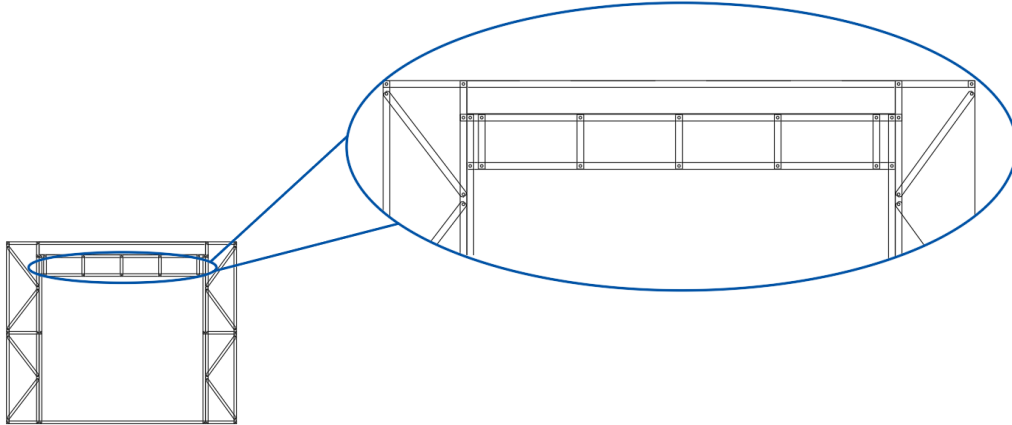


Figura 15 - Montantes verticais não estruturais

2.6.3. Lajes

Considera-se lajes, os painéis que se encontram dispostos na horizontal que têm como principal função proporcionar uma superfície plana para mobilidade como as lajes de piso ou lajes entre-piso, ou então, para suporte da cobertura designando-se lajes de cobertura.

Geralmente o espaçamento dos perfis das lajes é de 400 mm ou 600 mm, permitindo assim a fixação das placas OSB, mas mais importante é certificar que a disposição de todos os montantes da laje possam estar alinhados com os montantes da parede, isto irá fazer com que haja uma distribuição adequada das cargas garantindo uma maior estabilidade estrutural, ou seja, quando estes montantes se encontram alinhados as cargas aplicadas à laje são transferidas diretamente para os montantes da parede abaixo, que por sua vez transferem essas cargas para a fundação ajudando a prevenir eventuais deformações ou mesmo o colapso da estrutura, como demonstra a Figura 16. Além de tudo isto, facilita a instalação de serviços, como a passagem de fios elétricos e tubulações pelo simples facto de ter um caminho claro e desimpedido entre os montantes.

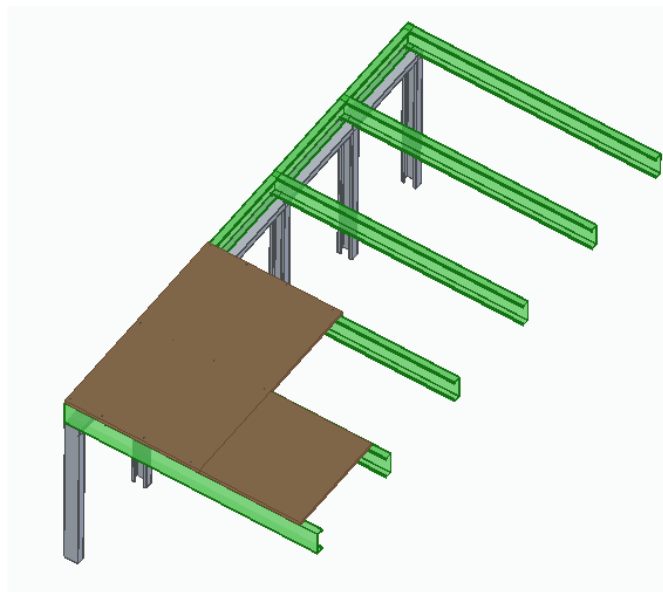


Figura 16 - Montantes da laje alinhados com montantes das paredes

Outro aspecto crucial na disposição das lajes passa pela distância entre os apoios, ou seja, a disposição das lajes deve ser otimizada para minimizar os vãos entre os apoios. Isto porque menores vãos significam menos flexão nas vigas, o que resulta por sua vez em perfis mais leves e, conseqüentemente mais económicos.

Num problema simples é possível entender este conceito utilizando valores arbitrários.

- **Problema nº1:** A figura 17 representa as paredes cotadas em milímetros, de um espaço que necessita de uma laje de cobertura. Abaixo encontram-se duas imagens como possíveis soluções, onde as linhas verdes representam as divisórias das lajes, e a tracejado os seus montantes. Na figura 18 a) as lajes estão dispostas no sentido horizontal tendo no máximo um vão com 4,5m. Por sua vez, a solução da figura 18 b) apresenta as lajes no sentido vertical tendo uma distancia de vãos de 3,6m.

Apesar de ambas as propostas serem exequíveis, a opção da figura 18 b) garante-nos um vão inferior e consecutivamente uma menor flexão comparativamente a um vão de 4,5m, como indica a figura 18 a), permitindo assim uma estrutura segura, com uma maior poupança no material utilizado, visto que, com um vão de distância superior existe a possibilidade de utilizar um perfil de dimensões superiores devido ao maior momento de inércia.

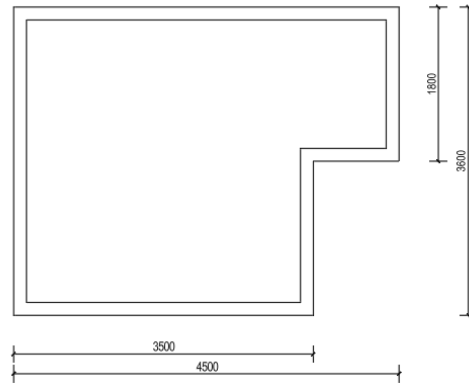


Figura 17 - Exemplo do perímetro exterior de uma casa

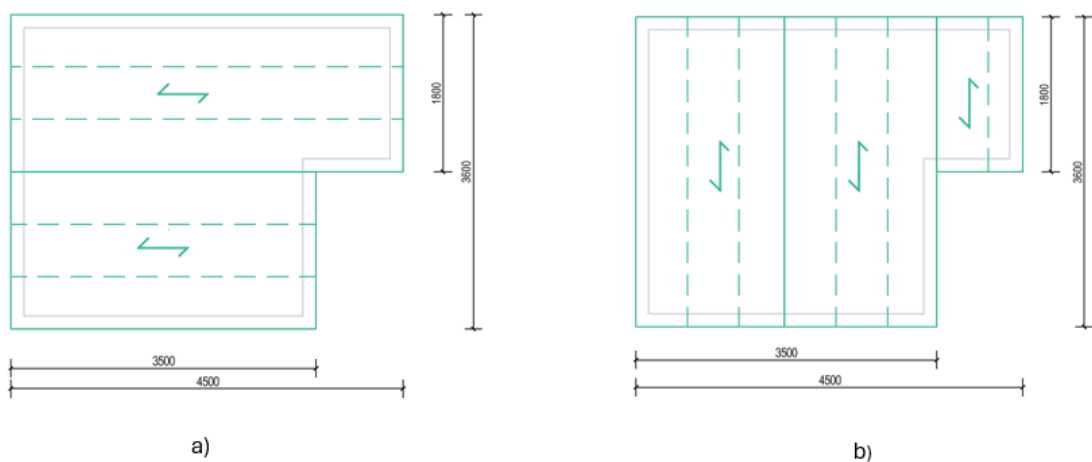


Figura 18 - Diferentes disposições da laje de cobertura; a) Lajes orientadas horizontalmente; b) Lajes orientadas verticalmente

Por vezes existe a impossibilidade de ter vãos reduzidos devido à grande distância entre apoios, criando desta forma a necessidade de colocar vigas ou pilares para obter um maior número de apoios, para uma redução da flexão dos montantes da laje.

- **Problema nº2:** Aproveitando a mesma linha de pensamento que o exercício anterior, observa-se na figura 19 uma geometria semelhante à anterior, no entanto, com dimensões ligeiramente maiores.

Desta vez a estratégia passa por uma viga com o intuito de reduzir o elevado tamanho das lajes, permitindo a utilização de um perfil mais pequeno. Há várias opções de resolução, mas são apresentadas as duas mais usadas. Nestes particulares exemplos a cor azul representa a viga e a verde a divisão das lajes de cobertura.

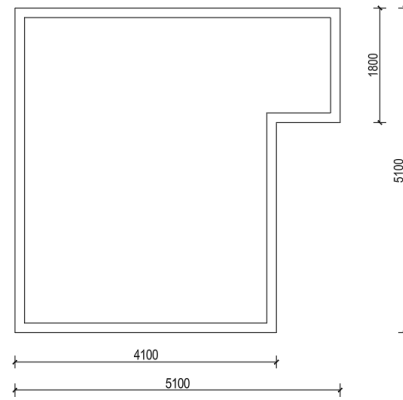


Figura 19 – Exemplo de um perímetro exteriores de uma casa

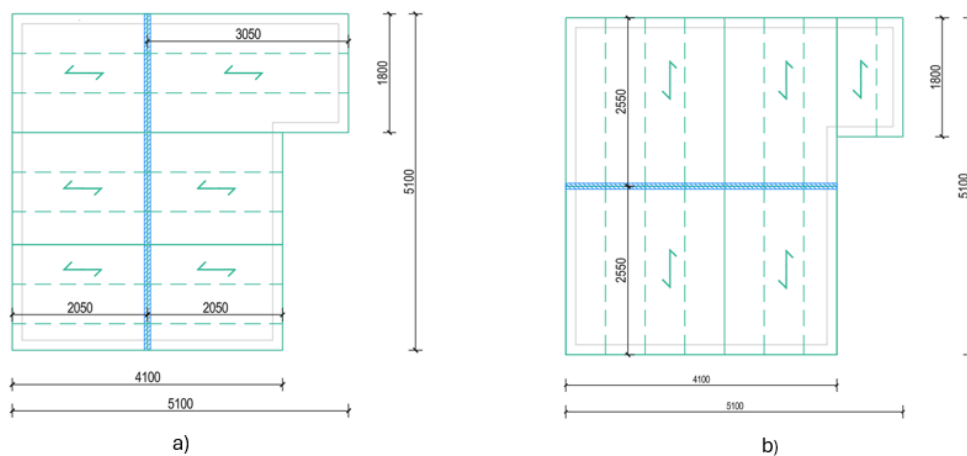


Figura 20 – Influencia da disposição de uma viga numa laje de cobertura; a) Viga disposta verticalmente; b) Viga disposta horizontalmente

Utilizando o problema do problema anteriores figuras 18a) e 18b), os vãos iriam ter 5,1m. Esta distância implicaria a utilização de um perfil consideravelmente grande para vencer esta distância. No entanto, com a utilização de uma viga pode-se observar nos exemplos da figura 20 a) e 20 b) que consegue-se diminuir esta distância em metade, tendo desta forma uma solução para reduzir as dimensões da secção do perfil.

Analisando o exemplo a), é possível obter uma distância máxima de 3,05m, recorrendo ao posicionamento da viga num sentido vertical enquanto as lajes trabalham perpendicularmente, ou seja, as cargas da laje de cobertura irão dispersar-se por toda a viga e pelas paredes.

No exemplo 20 b) a viga encontra-se num sentido horizontal, fazendo com que as lajes trabalhem perpendicular em relação à viga obtendo uma distância máxima de apenas 2,55m.

Conclui-se que a escolha de uma viga e a estratégica da posição da mesma pode impactar significativamente o dimensionamento dos perfis, permitindo otimizar o projeto estrutural, tendo implicações diretas no orçamento final.

Na figura 21, mostra-se a ligação que normalmente é efetuada para assegurar a boa ligação entre painéis e as lajes, esta é uma ligação bastante comum, e tem por norma a utilização de cantoneiras com a espessura dos perfis C, podendo ser superior em determinados casos. Geralmente esta é colocada em cada montante do painel.

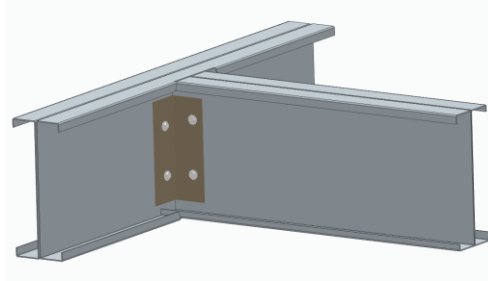


Figura 21 - Cantoneira realiza a união dos painéis nas lajes.

No que diz respeito à ligação entre os painéis das lajes e vigas (figura 22) o procedimento pode ser igual sempre que estes se encontrem no mesmo patamar, utilizando muitas das vezes parafusos “SFS SD6-H15” podendo haver a necessidade de perfurar mais que 4mm de chapa.

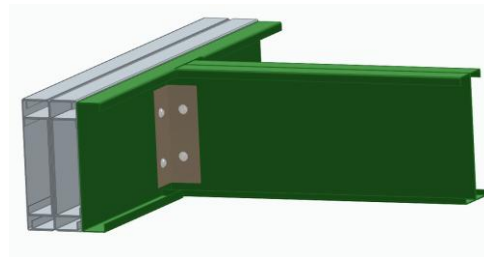


Figura 22 - Ligação entre Viga e um painel de laje

2.7. Vigas articuladas (treliças)

No sistema LSF, muitos construtores optam pela utilização de vigas articuladas, ou treliças, devido às suas vantagens estruturais e versatilidade. As treliças desempenham um papel fundamental no fornecimento de suporte estrutural, sendo projetadas para distribuir cargas de maneira eficiente através dos seus perfis interligados. Sendo este sistema de viga é uma alternativa às vigas compostas.

Aplicações das Treliças em LSF

As treliças são utilizadas em diversos locais da construção LSF, incluindo **Telhados** onde são amplamente utilizadas nas coberturas de telhados devido à sua capacidade de suportar grandes cargas, sendo uma alternativa aos barrotes de madeira antigamente utilizados. Nos **Pisos** as treliças podem fornecer um suporte eficiente e simultaneamente reduzir a necessidade de vigas adicionais. Nas **Paredes**, as treliças podem ser incorporadas para melhorar a resistência estrutural e a sua estabilidade, especialmente em áreas sujeitas a forças laterais.

Vantagens

A utilização de treliças no sistema LSF oferece várias vantagens, tanto em termos de desempenho estrutural quanto de eficiência construtiva.

- **Eficiência de Material:** A configuração triangular das treliças permite o uso de menos material para suportar a mesma carga em comparação com perfis sólidos ou compostos, resultando em uma construção mais leve e econômica.
- **Facilidade de Montagem:** As treliças podem ser pré-fabricadas em fábrica e transportadas para o local da obra, onde são rapidamente montadas, acelerando o processo de construção.
- **Redução de Peso:** A utilização de treliças diminui o peso total da estrutura, o que pode resultar em fundações menores e menos dispendiosas.

O projeto das treliças deve ser cuidadosamente elaborado para garantir que todas as cargas sejam adequadamente distribuídas e suportadas. O processo de fabricação envolve várias etapas, incluindo o corte preciso dos perfis de aço e o aparafusamento de todos os elementos.

É essencial prestar atenção ao cálculo das cargas que as treliças precisam de suportar, otimizando o design para maximizar a eficiência e a resistência.

Desvantagens

Para construir uma treliça no sistema LSF, como no exemplo abaixo (figura 23), são necessários montantes verticais, horizontais e diagonais. Sendo a treliça realizada com o método industrial, os montantes diagonais possuem uma característica distinta em relação aos restantes: as suas extremidades são "arredondadas", um processo realizado por equipamentos CNC utilizando o comando "Chamfer", este comando facilita a inserção das diagonais nos outros montantes, que neste caso são os montantes horizontais.

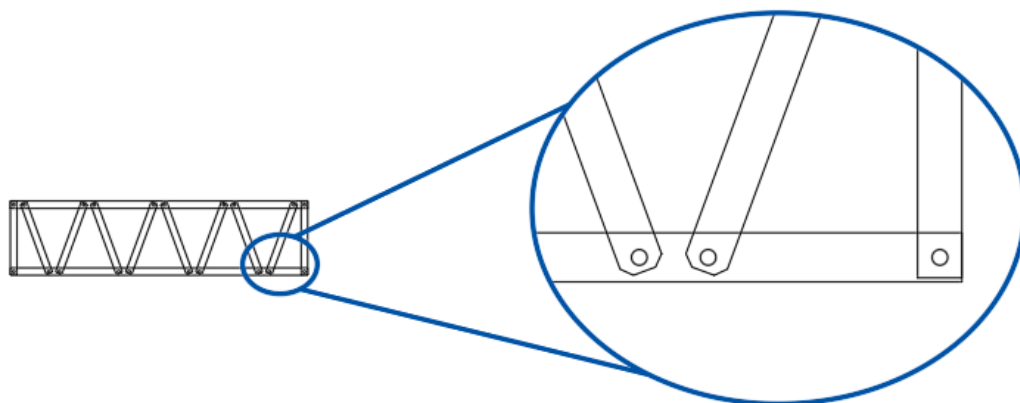


Figura 23 - Detalhe das ligações numa treliça articulada

Como as extremidades das diagonais não tocam na alma dos montantes horizontais, a força maior é exercida nos parafusos localizados nos pontos onde se encontra o "dimple". É por esta razão que estas vigas são designadas como vigas articuladas, pois não estão

completamente fixas como nas treliças de aço laminado, que são unidas por cordões de soldadura, e não existem quaisquer movimentos. Neste contexto, acaba por haver uma única união por aparafusamento, no resulta numa pequena rotação aumentando a fragilidade que está associada neste local podendo ocorrer o esmagamento como demonstra a figura 24 (Daltro, 2016).

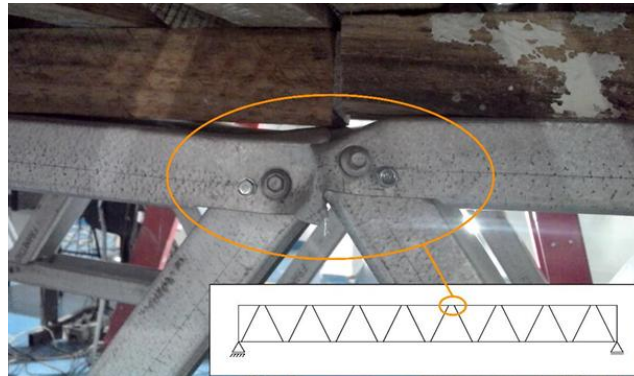


Figura 24 - Colapso por esmagamento de um nó (Daltro, 2016)

Existem outras formas de conceção de treliças, no entanto, o sistema de fabrico e montagem são distintos do anterior.

As treliças industrializadas requerem o corte personalizado nas extremidades das diagonais, e o “dimple” no local do aparafusamento. Alternativamente, o método tradicional, exige um tratamento de corte e costura. O aparafusamento é realizado na alma dos perfis, ou seja, os perfis são colocados costas com costas e toda a carga é exercida nos parafusos, como ilustra a figura 25.

Nestes casos, existem pelo menos duas soluções para garantir uma boa coesão da estrutura. Uma das soluções passa pela utilização de mais parafusos no mesmo espaço, distribuindo as cargas entre si. Necessário ter em atenção que apesar de existirem mais parafusos não significa uma forte ou melhor ligação, isto porque se estes não estiverem devidamente bem posicionados, com distâncias de segurança entre si, acabam por fragilizar a alma do perfil. Outra das soluções passa pela utilização de reforços em cada ligação utilizando uma chapa de ligação de maior espessura capaz de interligar os dois perfis.

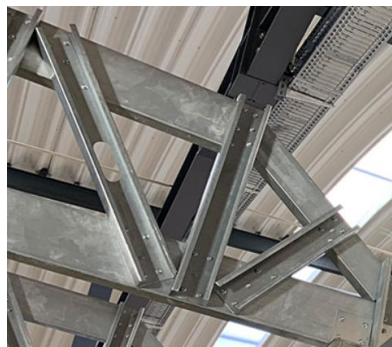


Figura 25 - Treliça com aparafusamento nas almas do perfil C (Bloken 2018)

3. Perfis e métodos

3.1. Perfis em análise

3.1.1. Perfis Simples

A parceria estabelecida com a empresa Bloken, sediada em Pombal, especializada no desenvolvimento de estruturas e construção em aço leve, foi crucial para a realização deste projeto. Através desta colaboração, foi possível conduzir diversos estudos utilizando o software Tricalc. Com este software foi possível simular o comportamento estrutural dos perfis fabricados pela empresa, com secções do tipo “C” e “U”. O aço utilizado para todos os perfis tem a tipologia de S280GD – Z275 e as dimensões das secções podem ser observadas nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Dimensões para possíveis perfis C (Perfis BLOKEN)

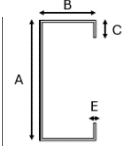

Perfil C		Designação	A [mm]	B[mm]	C [mm]	E [mm]
		C90	90	40,9	13	1,5
C150	150					
C200	200					

Tabela 4 - Dimensões para possíveis perfis U (Perfis BLOKEN)

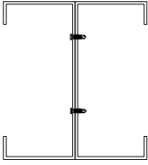

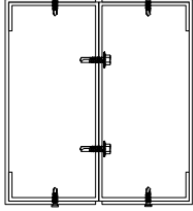
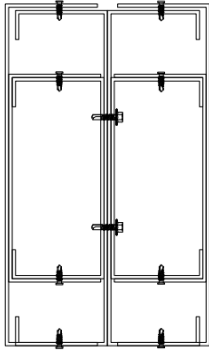
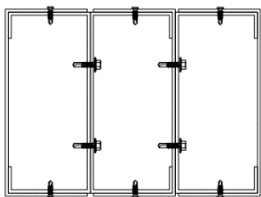
Perfil U		Designação	A [mm]	B[mm]	E [mm]
		U93	93	40,9	1,5
U153	153				
U203	203				

3.1.2. Vigas Compostas

Uma viga composta é uma técnica de construção que utiliza perfis C e perfis U acoplados uns aos outros com o intuito de compensar a esbelteza da secção do perfil, seja devido às elevadas cargas que tenha que suportar, ou um maior espaçamento entre dois pontos, para poder fornecer uma maior estabilidade e resistência à estrutura, a estas vigas podem também ser chamadas de vigas rígidas. Estas vigas são normalmente utilizadas como suporte de lajes de coberturas, vigas de pisos, vãos de janelas e portas entre outras.

Existem vários tipos de vigas composta que se podem criar com o intuito de conferir uma maior resistência. Na tabela 5 encontram-se algumas variações:

Tabela 5 - Diferentes tipos de Vigas Compostas

Designação	Perfis	Descrição	Imagem
Back to back	- 2 Perfis C90;	- Perfis C90 acoplados “costas com costas”	
Viga R	- 1 Perfil C90; - 1 Perfil U93;	As abas superiores e inferiores do perfil U93 são aparafusadas às abas do perfil C90.	
Viga 2R -	- 2 Perfis C90; - 2 Perfis U93;	Primeiramente os perfis C90 são acoplados “costas com costas”, de seguida as abas superiores e inferiores dos perfis U93 são aparafusadas às abas dos perfis C90.	
Viga 2R – de diferentes secções	- 2 Perfis C90; - 2 Perfis C150; - 2 Perfis U93; - 2 Perfis U153;	Os perfis C90 e perfis U93 são aparafusados aos perfis C150 fechando a viga com o aparafusamento dos perfis U153 em ambas as abas.	
Vigas 3R	- 3 Perfis C90 - 3 perfis U93	Realizar uma Viga 2R e acoplar uma Viga R.	

A escolha da viga recai sobre o projetista, sendo que normalmente esta é escolhida consoante a sua capacidade de resistir perante os esforços que deverá suportar, no entanto, esta seleção pode ser alterada devido a certas condicionantes como a altura ou largura disponível para a colocação da mesma. Neste casos, uma das opções é a utilização de duas vigas viga R numa só, ou seja, duas vigas R com perfis de diferentes secções, onde a soma

dos varios perfis resulta numa menor esbelteza e maior resistencia, tendo praticamente a mesma largura e uma altura igual a uma Viga R simples.

3.2. Software Tricalc

O software *Tricalc* pertencente à empresa *Arktec* que permite a criação dos painéis LSF e para além da sua capacidade de modelação possibilita também a realização da análise estrutural e dimensionamento tanto da estrutura LSF como as fundações em betão onde irá assentar os perfis metálicos (Tricalc 2024).

3.2.1. Processo geral para análise do comportamento de perfis :

Tudo começa com a definição da secção do perfil. Este primeiro passo é de extrema importância devido ao facto de que todos os cálculos que são realizados dependem dos dados que compõem a secção.

Já na etapa da introdução de ações estáticas e dinâmicas, a representação dos painéis e as suas ligações é feita em termos de linhas (representando os elementos estruturais) e nós (representando os pontos de conexão entre esses elementos). As ações estáticas podem incluir cargas permanentes e variáveis, enquanto as dinâmicas podem envolver análises de vibração como num sismo ou vento.

Após definidas as secções que compõem os elementos dos painéis e as cargas a que serão sujeitas é possível proceder ao cálculo de esforços e deslocamentos.

3.2.2. Análise Tricalc - Comportamento dos perfis C

Ao seguir os primeiros passos do processo geral do programa tricalc, foram introduzidos os dados conhecidos das secções C90, C150, e C200, como demonstra a figura 26. Preenchendo os dados (h;b;h1;h2;e;r) o software calcula por si os restantes campos.

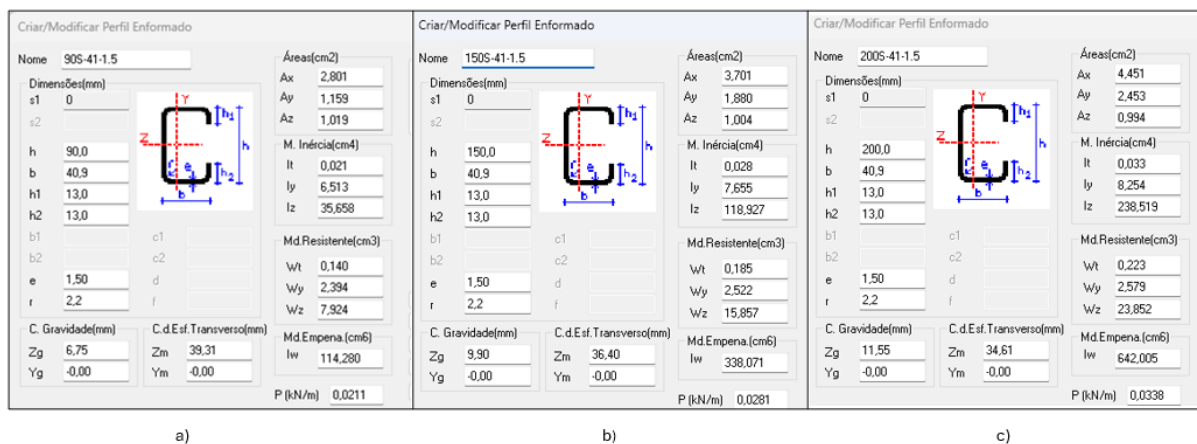





Figura 26 - Dimensionamento de perfis no software Tricalc; a) C90; b) C150; c) C200

Após a definição das secções, foi utilizado a teoria de viga de Bernoulli. Primeiramente foi definido arbitrariamente o comprimento dos perfis, tendo uma distância

de 2m, os apoios ao perfil foram colocados em ambas as extremidades apoiados em 3 eixos (tabela 6), todos os perfis foram sujeitos a um teste com cargas transversalmente distribuídas, inicialmente foi utilizada uma carga de 1kN/m e a segunda carga com 5kN/m, foram obtidos resultados como: deslocamentos, momento fletor e flecha.

Tabela 6 - Definição dos perfis apoios e distâncias.

Perfil:	C90	C150	C200
Apoios:	X ; Y ; Z	X ; Y ; Z	X ; Y ; Z
Distância:	2 m	2 m	2 m
Imagem:			

Além de todos os resultados numéricos que o tricalc oferece, este indica-nos se os perfis têm a capacidade de resistir às cargas sem que estas cheguem ao ponto de rotura.

O Momento Fletor máximo para uma carga distribuída 1kN/m foi de 0,7 kNm para todos os perfis, enquanto que para uma carga de 5kN/m foi de 3,4kNm. Abaixo é ilustrado um exemplo para um perfil C90 com dois metros de comprimento sujeito à carga de 1kN/m.

- Peso do Perfil C90 por metro: 0.021kN
- Peso do perfil para 2 metros: $0,021 * 2 = 0.042 \text{ kN}$

Sendo “G” a letra representante para as cargas permanentes obtém-se:

$$G = \text{Carga distribuída} + \text{Peso do perfil}$$

$$G = 1,0 + 0,042$$

$$G = 1,042 \text{ kN}$$

Colocando um fator de majoração de 1,35, este é no fundo um multiplicador que aumenta a carga com o intuito de garantir uma margem de segurança.

$$P = 1,35 * G$$

$$P = 1,35 * 1,042$$

$$P = 1,407 \text{ kN}$$

Para calcular o momento fletor (M) para uma viga com carga distribuída utiliza-se a fórmula:

$$M = (PL^2) / 8$$

$$M = (1,407 * 2^2) / 8$$

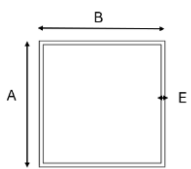
$$M = 0,7035 \approx 0,7 \text{ cm}$$

3.2.3. Análise Tricalc - Comportamento dos perfis SHS (Square Hollow Sections)

Foi realizado um estudo para compreender os comportamentos de uma secção enformada a frio sem ligações aparafusadas. Esta pequena análise surge com intuito de entender as diferenças entre uma secção com ligações aparafusadas e sem ligações aparafusadas.

Para termos de comparação foram utilizadas dimensões semelhantes aos perfis C que estudamos, ou seja, tubos quadrangulares (SHS - Square Hollow Sections) de 90, 150 e 200mm todos eles com uma espessura de 1,5mm, tal como indica a tabela 7. No software Tricalc foram dimensionadas as secções (figura 27) para assim poder realizar os estudos comparativos com os restantes perfis.

Tabela 7 - Dimensões de perfis quadrados (SHS)

Perfil SHS		Designação	A [mm]	B [mm]	E [mm]
		SHS90	90	90	1,5
SHS150	150	150	1,5		
SHS200	200	200	1,5		

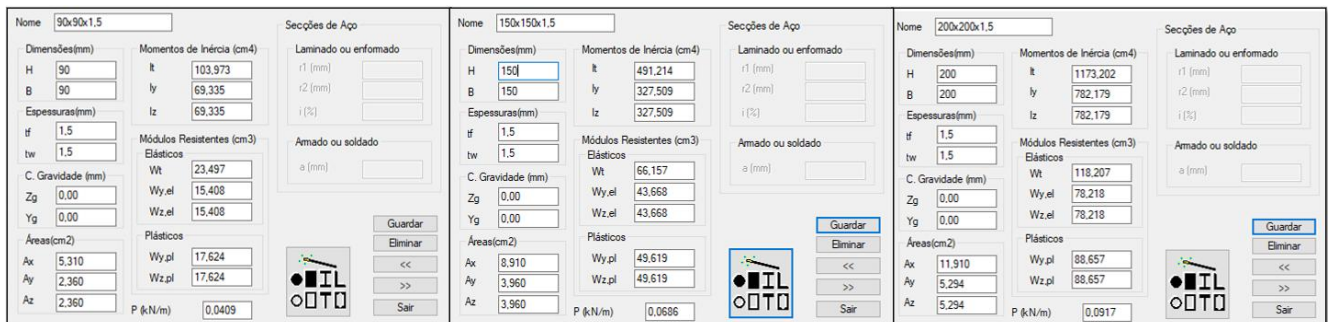


Figura 27 - Dimensionamento de perfis quadrangulares (SHS)

3.3. Análise Abaqus

O Abaqus (ABAQUS/CAE 2010) é um conjunto abrangente de ferramentas de simulação computacional voltadas para as diversas aplicações de engenharia. Baseado no método dos elementos finitos, este, oferece capacidades de resolução que abrangem desde análises lineares simples até simulações complexas e não lineares. Com ele, é possível modelar praticamente qualquer tipo de geometria, além de simular o comportamento de uma vasta gama de materiais de engenharia. (Farfan & Neto, 2017)

3.3.1. Análise Abaqus – Comportamento dos Perfis C

O programa dispõe de uma vasta gama de elementos finitos, como sólidos, de casca, de viga, entre outros. Neste caso, para a discretização dos perfis simples e das secções compostas foram utilizados os elementos finitos de casca. Foram inseridas algumas propriedades do material com uma densidade de $[7,85 \times 10]^{-09}$ kg/mm³, um módulo de Young de 210000 MPa e um rácio de Poisson de 0,29. Tal como os perfis testados no programa Tricalc foi dado uma espessura de 1,5mm.

3.3.2. Perfis C

Após a definição das propriedades foram inseridas as cargas e restrições, como as condições de fronteira. Toda a carga inserida foi distribuída pela área da aba do perfil e as condições de fronteira foram colocadas nas extremidades dos perfis estando apoiadas nos eixos X,Y,Z sem qualquer rotação nos respetivos eixos, tendo 6 graus de liberdade. Na figura 28, com as referências A),B) e C), é possível compreender o comportamento de um perfil C perante a carga distribuída. A figura 28A), assinala as cargas e as restrições nas extremidades, a figura 28 B) demonstra a deformação ao longo de todo o perfil. Onde as cores azuis indicam áreas de baixa deformação, enquanto o vermelho indica áreas de maior deformação. Analisando a figura com a figura C), parece haver uma concentração de deformações aba superior, onde o perfil C não tem qualquer suporte, havendo também uma ligeira torção de todo o perfil. Durante a análise de todos os perfis os valores da deformação são analisados na alma do perfil, isto porque, o valor máximo que nos é dado no deslocamento será o valor do deslocamento na aba, onde o perfil não tem qualquer suporte.

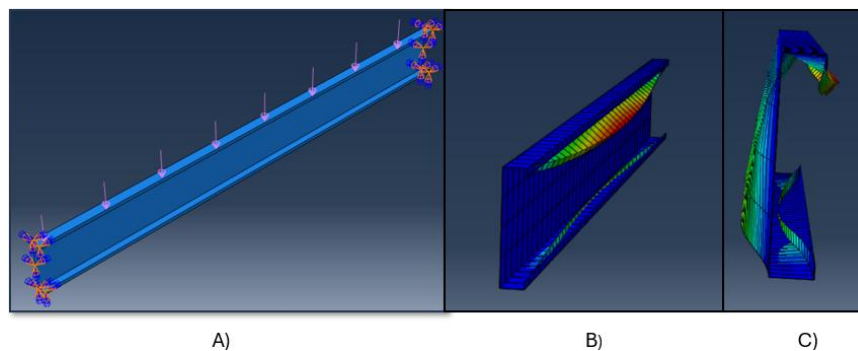


Figura 28 --A) Definição de apoios e cargas em Perfis C; B) Deformação do perfil no seu comprimento; C) Deformação da secção vista frontal

3.3.3. Vigas Compostas 2C e 2R

Nas vigas compostas 2C existe a necessidade de colocar pontos de restrição indicando o posicionamento das ligações aparafusadas. Na figura 29 tem indicado na referência A) o ponto de conexão dos dois perfis “costas com costas”, a referência B) evidencia a carga distribuída sobre a viga composta e as suas restrições na extremidade, na referência C) é possível observar as tensões ao longo de todo o comprimento, realçando uma maior tensão no meio da viga. Por último com a referência D) compreende-se que

existe a possibilidade de uma torção lateral mesmo havendo ligações aparafusadas. Estas ligações forçam a abertura da viga ao centro enquanto as abas se deformam.

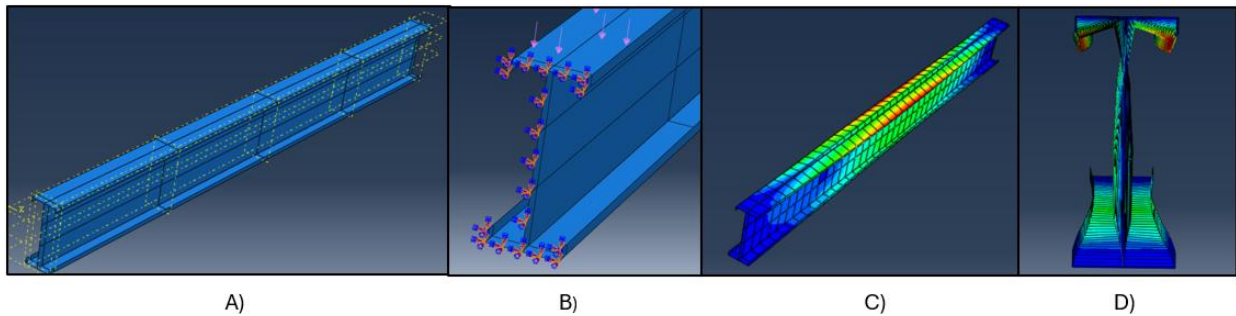


Figura 29 - Processo de simulação e análise de Vigas compostas 2C; A) Colocação de pontos de união; B) Condições Fronteira e cargas; C) e D) Análise de Deformações

A simulação de uma viga composta 2R tem um processo bastante semelhante à viga composta 2C, no entanto necessita de mais restrições por necessitar de mais ligações aparafusadas. A figura 30, apresenta quatro referências tal como a viga 2C, mas as principais conclusões a retirar remetem para o comportamento de todo o conjunto capaz de suportar melhor as tensões. Tendo uma secção fechada com um reforço no seu centro, elimina quase por completo as torções que antes ocorriam.

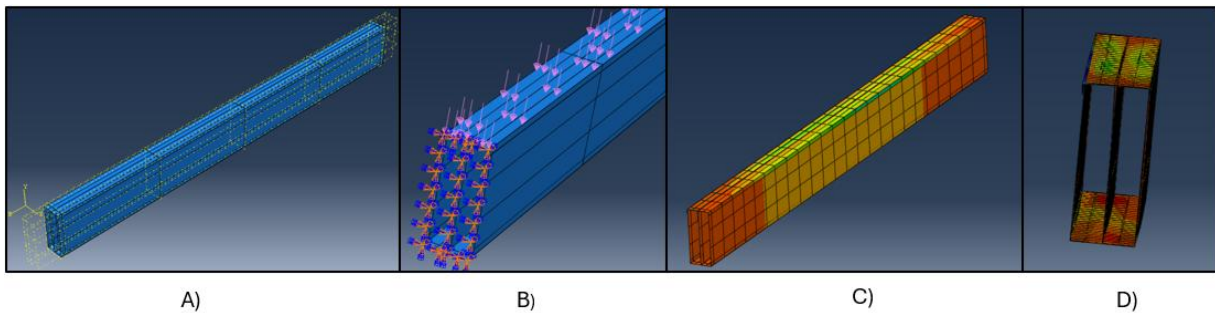


Figura 30 - Processo de Simulação e análise de vigas compostas 2R; A) Colocação de pontos de união; B) Condições Fronteira e cargas; C) e D) Análise de Deformações

3.3.4. Análise Abaqus – Comportamento dos Perfis Quadrados (SHS - Square Hollow Sections)

O procedimento para analisar o comportamento dos perfis quadrados é o mesmo procedimento utilizado para analisar os perfis C, ou seja, é necessário indicar quais as características do material, bem como as suas restrições e cargas. A maior diferença passa pela ausência de ligações, sendo este um perfil fechado. Para realizar uma viga composta utilizando perfis C e U, são necessárias ligações aparafusadas. A realização de um ensaio com tubos quadrados surge da necessidade de remover da equação as ligações aparafusadas podendo comparar a eficácia das mesmas. Sendo uma secção fechada como se observa na Figura 31, não é necessário colocar pontos de ligação, assim podemos focar apenas na colocação de restrições nas extremidades e forças na base superior.

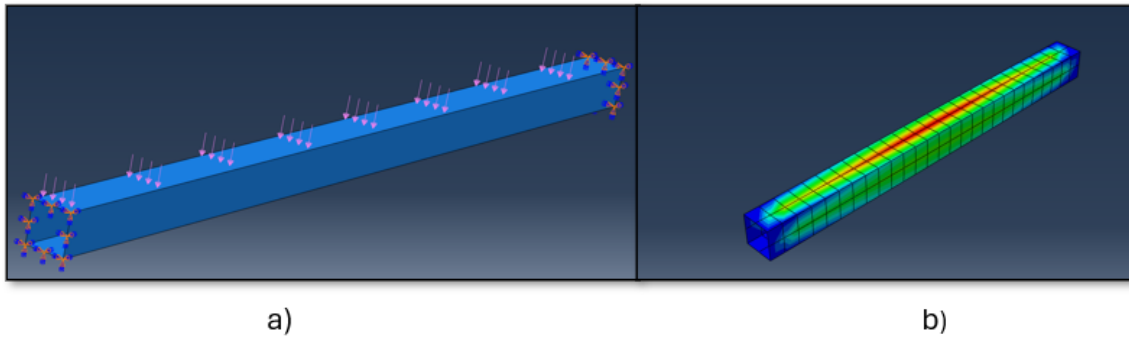


Figura 31- Simulação e análise de cargas de vigas compostas em perfis SHS; A) Condições Fronteira e cargas; B) Análise de Deformações

4. Resultados e discussão

4.1.1. Análise Perfis simples - lajes

Normalmente para lajes de piso ou de cobertura os perfis mais utilizados pela indústria são os perfis C150 e C200, principalmente quando as dimensões dos vãos são consideravelmente grandes. Na realização do projeto é essencial estudar e analisar a melhor disposição das lajes para que estas tenham menores distâncias, de modo a ter um melhor comportamento perante as cargas que são exercidas sobre elas garantindo a segurança estrutural.

Para entender o problema apresentado na figura 17, foi realizado um estudo para entender o conceito acima referido. A figura 32 demonstra a área de influência em cada viga da laje de cobertura, permitindo saber que carga está a ser exercida sobre cada viga individualmente. Com o traço contínuo é possível observar os limites de cada laje e a tracejado as vigas que pertencentes às lajes.

Análise do Problema 1

1. Disposição das lajes de cobertura e determinação da carga

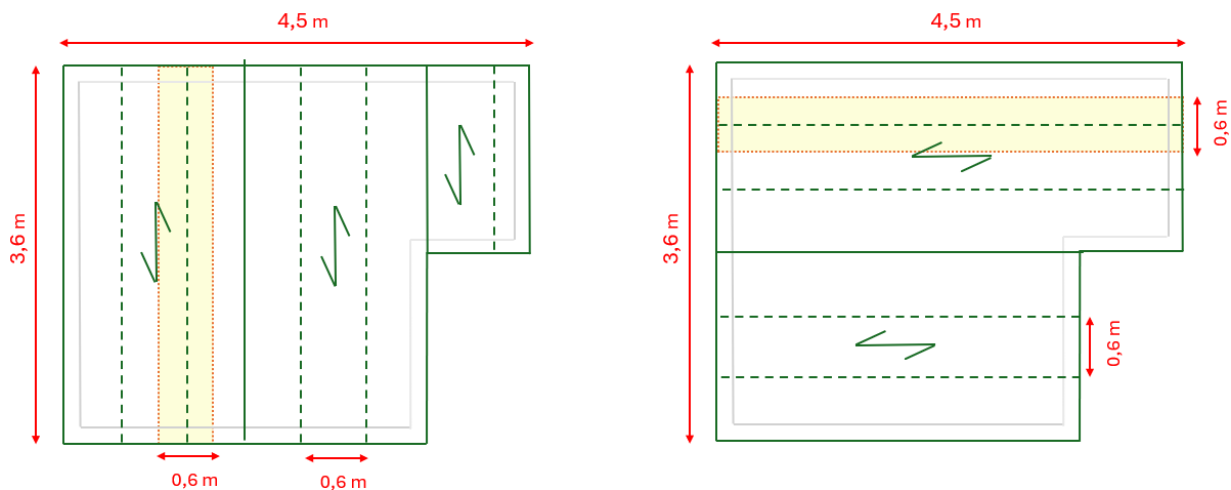


Figura 32 -- Área de influência em cada perfil da laje

Sendo este problema uma ilustração de uma laje de cobertura é necessário considerar os materiais para obter a carga que irá ser exercida sob os perfis. Desta forma foi considerado uma tela impermeabilizante, isolamento térmico em XPS, OSB, uma camada de gesso cartonado e o peso próprio dos perfis metálicos.

$$\text{Carga: } Q_1 = 0,7 \text{ kN/m}^2$$

$$A_{\text{Influência}} = 0,6 \text{ m}$$

$$Q = Q_1 * A_{\text{Influência}}$$

$$Q = 0,7 \text{ kN/m}^2 * 0,6 \text{ m} = 0,42 \text{ kN/m}$$

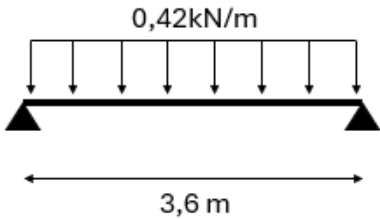
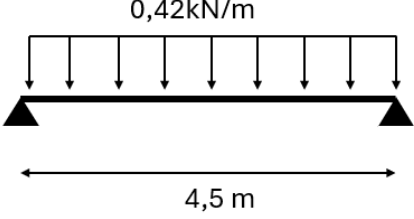
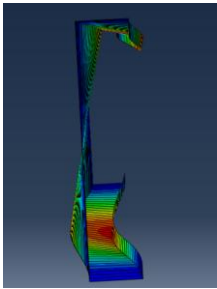
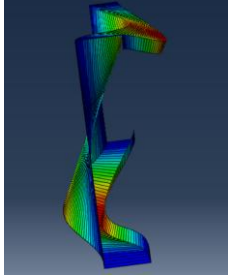
Independentemente da orientação das lajes a carga uniformemente distribuída por cada perfil é igual. Isto porque a diferença entre perfis é sempre a mesma, neste caso com uma distância de 0,6m.

2. Estudo dos momentos fletores:

Para uma viga simplesmente apoiada com carga distribuída uniforme, o momento fletor é dado por:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{Q * l^2}{8}$$

Tabela 8 – Estudo dos momentos fletores

Viga com 3,6m	Viga com 4,5m
	
$M_{m\acute{a}x} = \frac{Q * l^2}{8}$ $M_{m\acute{a}x} = \frac{0,42 * 3,6^2}{8}$ $M_{m\acute{a}x} = 0,68 \text{ kN/m}$	$M_{m\acute{a}x} = \frac{Q * l^2}{8}$ $M_{m\acute{a}x} = \frac{0,42 * 4,5^2}{8}$ $M_{m\acute{a}x} = 1,06 \text{ kN/m}$
Simulação Abaqus	Simulação Abaqus
	
Deslocamento: 5,14 mm	Deslocamento: 12,16 mm

Apesar da carga ser igual em ambos os casos, a orientação dos perfis numa laje influencia o tipo de perfil a utilizar, pois como apresentado, ao aumentar o vão aumenta-se também o valor do momento fletor ao qual o perfil terá de resistir. Quanto maior o comprimento, maior será o momento fletor. As alternativas para superar o maior, passam por modificar o perfil substituído por outro mais resistente capaz de satisfazer os requisitos da estrutura ou utilizar vigas composta como esta representado nas figuras 20 a) e 20 b).

Posicionando as lajes de forma que a carga seja transferida para a viga composta, diminuindo assim o vão, não sendo necessário perfis mais resistentes. Ao evitar a utilização de perfis mais resistentes geralmente o custo será mais reduzido.

É também possível observar a simulação no software Abaqus. Com um perfil C200 consegue-se analisar as consequências de um vão maior comparativamente a um vão mais reduzido.

4.1.2. Análise com Software Tricalc

Na figura 32 observa-se o perfil C90 em dois testes. Na figura 33 a) o perfil encontra-se sob esforço de uma carga de 1kN/m, onde o programa indica que tem um bom aproveitamento e não chegou ao seu ponto de rotura. Na figura 32 b) Consegue-se observar que com uma carga de 5kN/m o perfil não resiste acabando por se partir, ou seja, os valores obtidos pelo deslocamento do perfil C90 são até ao seu ponto de rotura.

Este ensaio em que o perfil não resistiu à carga de 5kN/m foi o único a chegar ao seu ponto de rotura, todos os outros resultados sugerem que os perfis resistem à carga a que foram sujeitos.

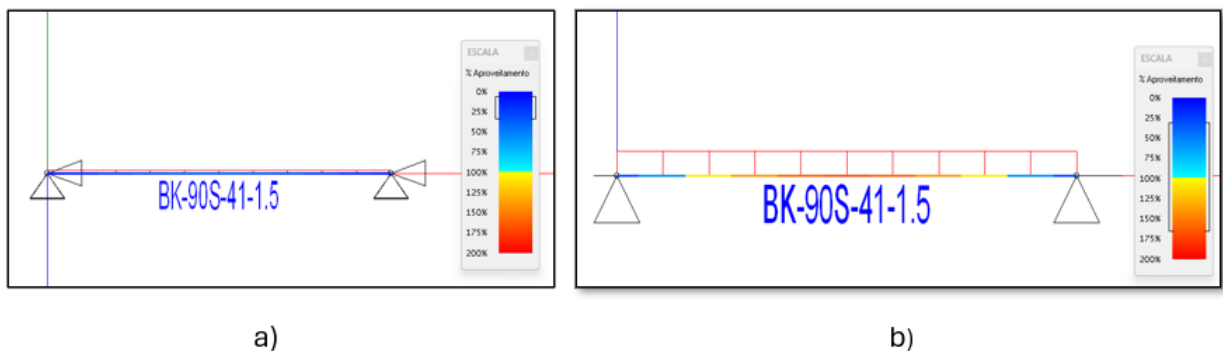


Figura 33 - Resistência do perfil C90 a cargas de: a) 1kN e b) 5kN

Os resultados indicam que o perfil com uma alma superior tem um melhor desempenho no que diz respeito ao deslocamento, sendo este menor. As tabelas 9 e 10 demonstram o comportamento aquando sujeito à carga distribuída de 1kN/m e 5kN/m.

Tabela 9 - Deslocamento de diferentes secções a uma carga distribuída de 1kN/m – (Software Tricalc)

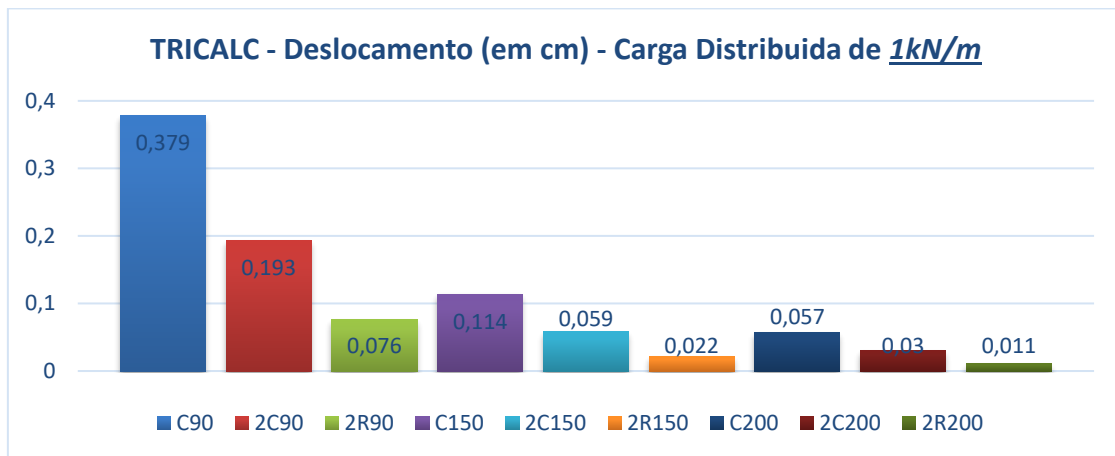
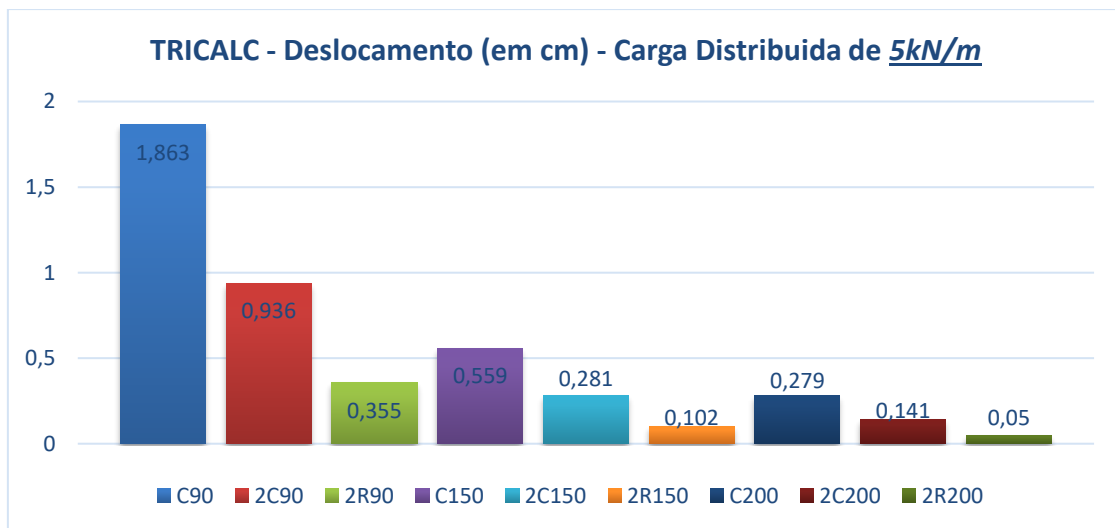


Tabela 10 - Deslocamento de diferentes secções a uma carga distribuída de 5kN/m – (Software Tricalc)



Pelo comportamento dos deslocamentos das diferentes secções observa-se que quanto mais robusta a viga composta, menor o deslocamento. Os perfis 2R90, 2R150, e 2R200 apresentam as menores flechas, como observado na tabela (0,263 cm, 0,076 cm, e 0,037 cm respetivamente).

No entanto, pode-se observar que em determinado momento o perfil C200 tem um desempenho melhor que a viga composta 2R90. Isto sugere que, apesar da adição de reforço no perfil 2R90, uma secção com uma alma maior pode superar o desempenho de uma viga composta com uma alma menor. Por exemplo, o deslocamento do perfil C200 sob uma carga de 5kN/m é de 0,279 cm, enquanto o perfil 2R90 apresenta um deslocamento de 0,355 cm. Desta forma, conclui-se que, em certas situações, a altura da alma do perfil pode ter um impacto mais significativo na redução do deslocamento do que a adição de reforços.

Já em relação à flecha o resultado é o esperado, observando as tabelas 11 e 12, entende-se que a adição de reforços e o aumento da altura da alma dos perfis são estratégias eficazes para reduzir a flecha e melhorar a rigidez estrutural. As vigas

compostas 2R têm um desempenho superior, com o 2R200 sendo o melhor exemplo de minimização da flecha.

Tabela 11 - Flecha das diferentes secções para uma carga distribuída de 1kN/m – (Software Tricalc)

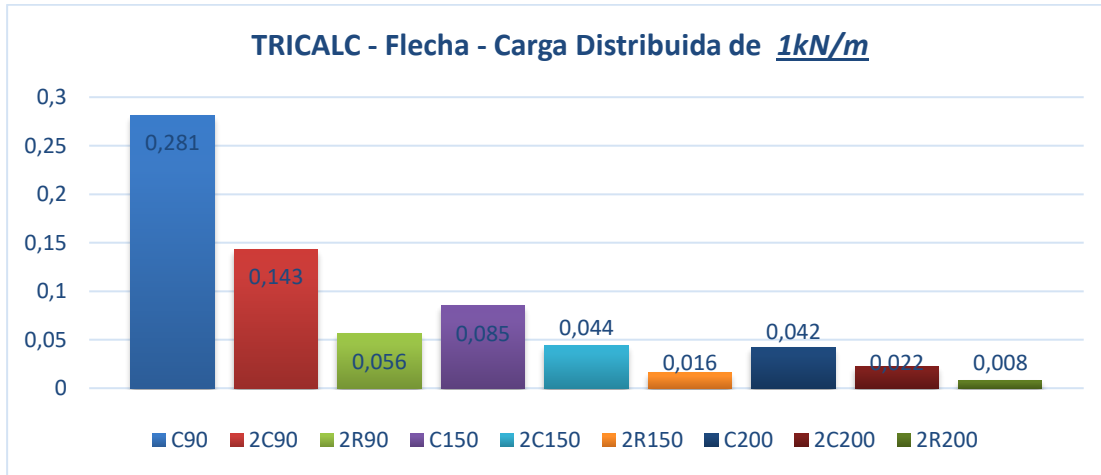
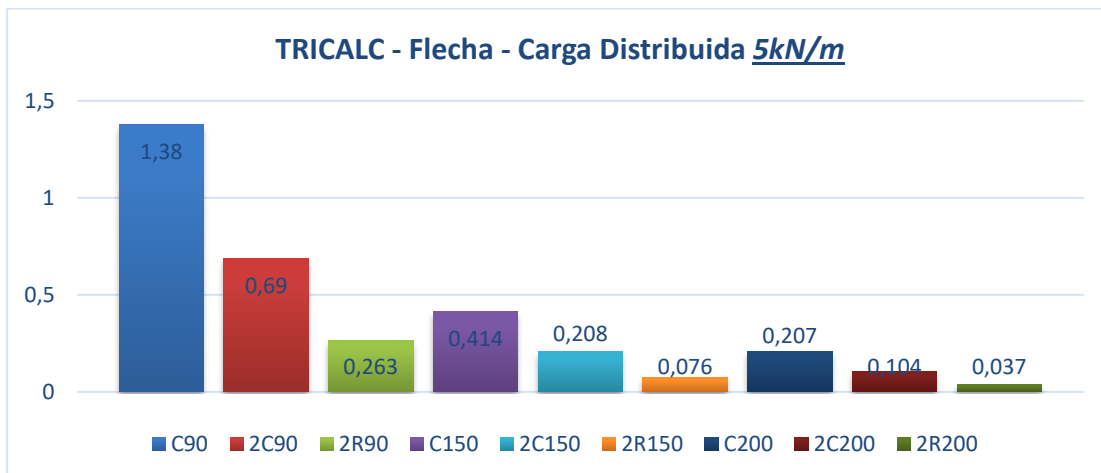


Tabela 12 - Flecha das diferentes secções para uma carga distribuída de 5kN/m (Software Tricalc)



Estas observações são úteis na tomada de decisão, isto porque, fatores como custo, desempenho, segurança e durabilidade devem ser considerados. Nesse contexto, é necessário realizar uma análise de custo-benefício, onde o uso de perfis mais altos, perfis U e reforços aumenta o custo devido ao maior uso de material. No entanto, essa escolha pode ser justificada quando a redução de deformação é uma prioridade.

Tal como foi realizado para os perfis C, foi observado se as secções quadrangulares conseguem resistir às cargas de 1kN/m e 5kN/m, não chegando ao seu ponto de rotura. É possível observar na figura 33 que o perfil 90x90x1,5 resiste à carga mais elevada de 5kN/m, o que não acontecia com o perfil C90.

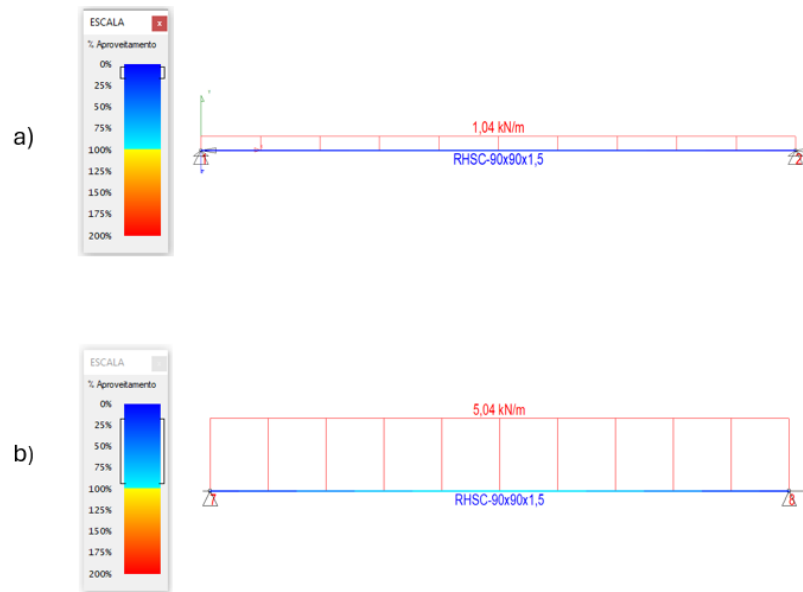


Figura 34 - Resistência de perfis SHS90 a uma carga de 1kN/m e 5kN/m

Os estudos realizados aos tubos quadrangulares concederam a mesma a mesma conclusão que os perfis C, onde o perfil com maior dimensão é capaz de resistir a maiores cargas. Analisando as tabelas 13 e 14 consegue-se observar que o tubo de 200 x 1,5 tem um menor deslocamento.

Tabela 13 - Deslocamento de diferentes secções SHS sujeito a uma carga distribuída de 1kN/m (Software – Tricalc)

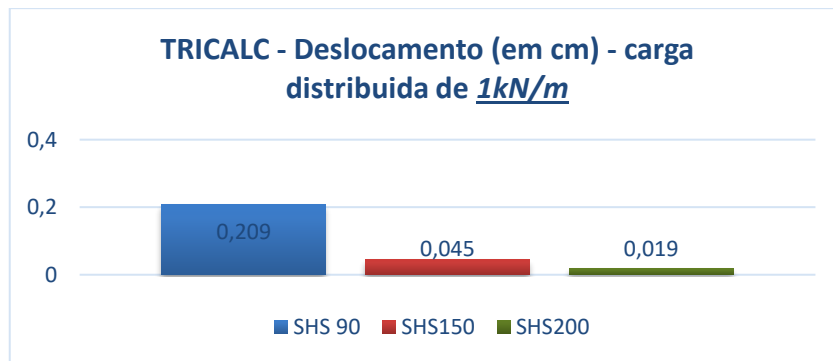
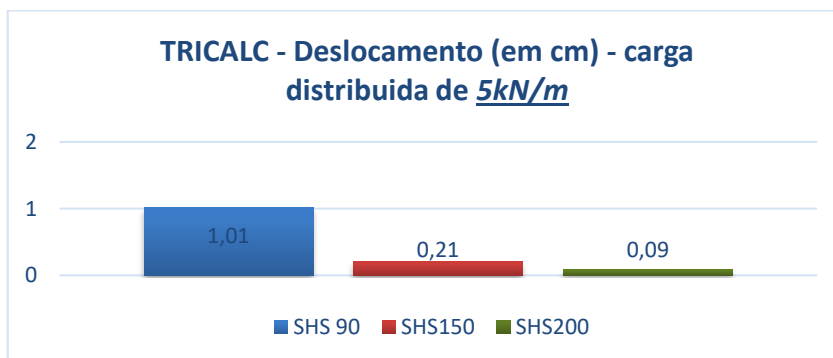


Tabela 14 - Deslocamento de diferentes secções SHS sujeito a uma carga distribuída de 1kN/m (Software – Tricalc)



4.1.3. Análise com Software Abaqus

Nas Tabelas 15 e 16, é possível analisar os resultados obtidos pelo software Abaqus, onde os resultados evidenciam que um perfil com maior momento de inércia apresenta menos deslocamento. O perfil C90 apresenta de longe o pior desempenho comparado com as restantes seções. Por sua vez a viga composta 2R apresenta o menor deslocamento, devido à sua secção fechada e maior inércia. Tal como tinha ocorrido na simulação do software Tricalc.

Tabela 15 - Deslocamento de diferentes seções a uma carga distribuída de 1kN/m – (Software Abaqus)

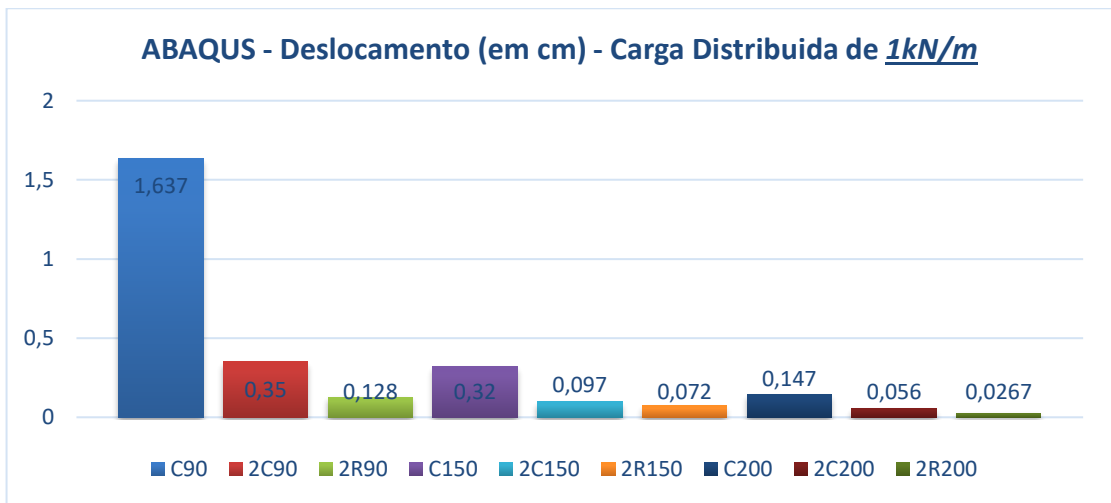
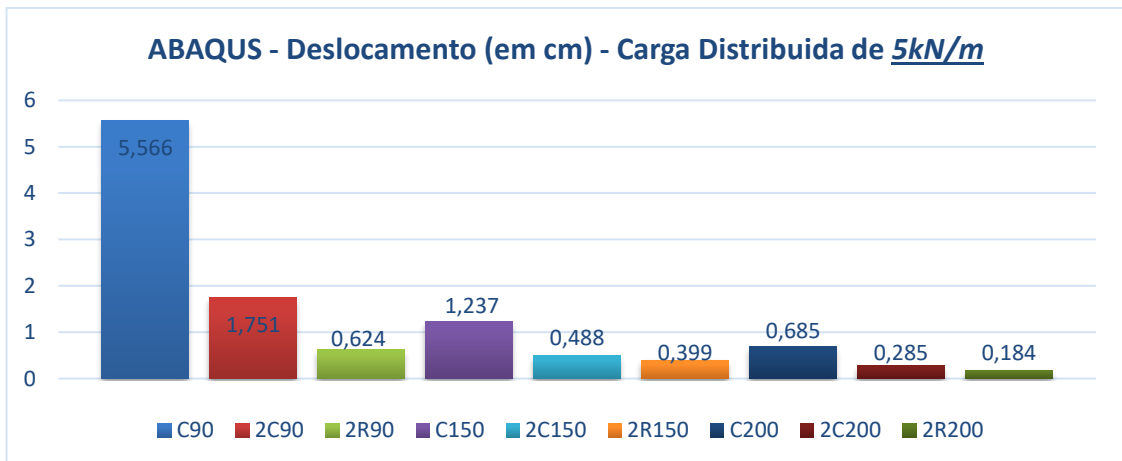


Tabela 16 - Deslocamento de diferentes seções a uma carga distribuída de 5kN/m – (Software Abaqus)



Relativamente ao estudo da secção quadrada (SHS 90, 150 e 200) os resultados são idênticos. Como é possível analisar nas Tabelas 17 e 18, mais uma vez o maior perfil tem o menor deslocamento.

Tabela 17 - Deslocamento de seções SHS perante uma carga distribuída de 1kN/m

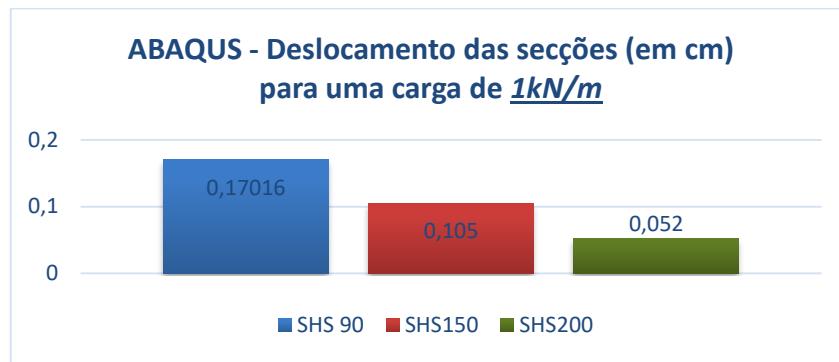
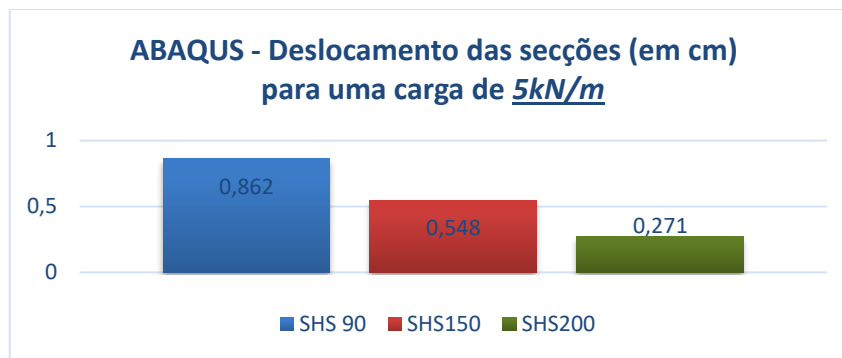


Tabela 18 - Deslocamento de seções SHS perante uma carga distribuída de 5kN/m



4.1.4. Análise comparativa global de resultados

Os resultados obtidos indicam que os perfis quadrados e retangulares são estruturalmente mais resistentes que os perfis C. Assim, para estruturas ou locais que precisam de maior rigidez e o menor deslocamento possível, os perfis fechados retangulares ou quadrados são mais recomendados. Com as Tabelas 19 e 20 consegue-se analisar a variação entre os diferentes programas, onde o software Abaqus indica deslocamentos superiores aos do Tricalc.

Tabela 19 - Comparação de resultados dos Softwares Tricalc e Abaqus (Perfis C; 2C; 2R - carga 1kN/m)

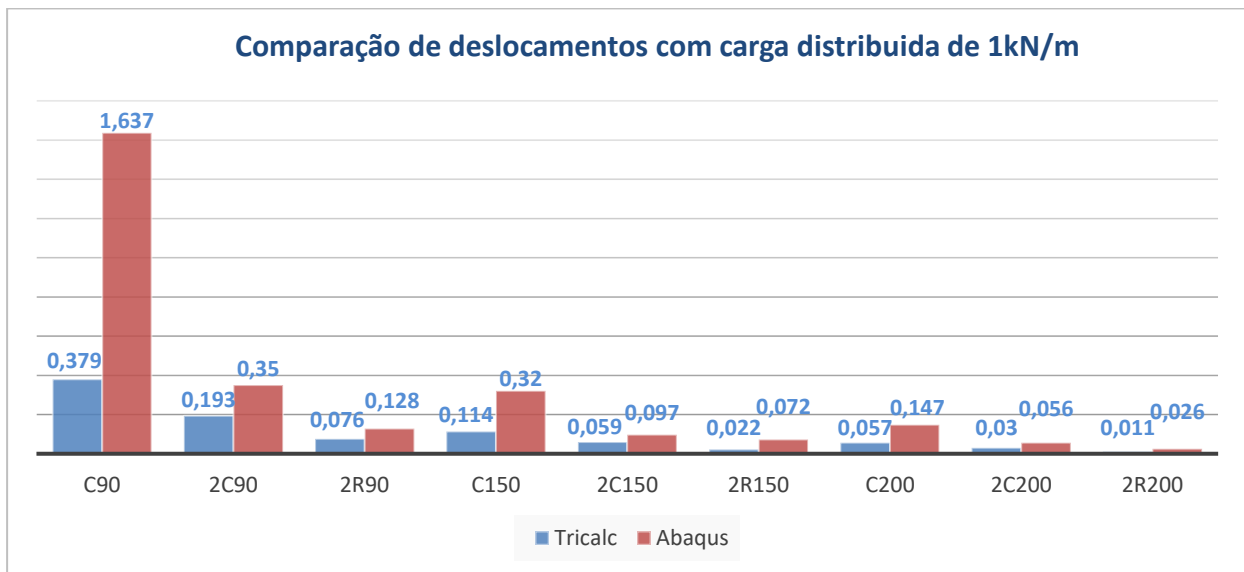
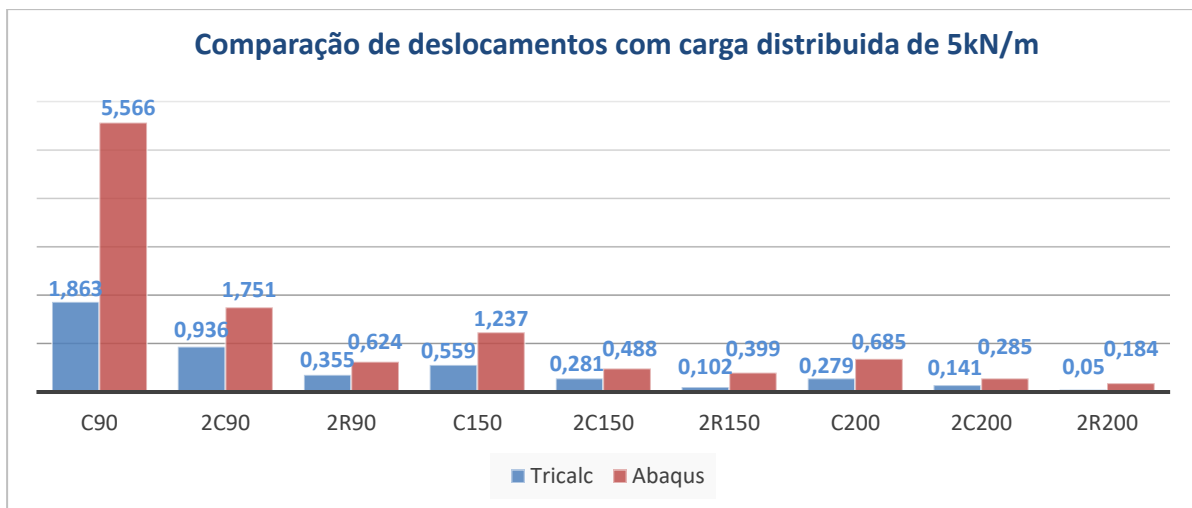


Tabela 20 - Comparação de resultados dos Softwares Tricalc e Abaqus (Perfis C; 2C; 2R - carga 5kN/m)



O Perfil C90 destaca-se com uma discrepância evidente entre os valores obtidos nos dois softwares. Esta diferença pode estar relacionada pelas diferentes análises que cada software faz. No Software Abaqus, o elemento de torção aparenta estar muito presente ao analisar a secção de um Perfil C, isto porque não existe simetria em relação ao eixo vertical, logo os elementos de casca do Abaqus simulam esse efeito, enquanto no Software Tricalc a torção não demonstra estar a ser representada quando se analisa um deslocamento com uma carga vertical devido ao uso da teoria da viga de Bernoulli que não simula esse efeito (Figura 34 A e B são resultados Abaqus enquanto a figura 34 C apresenta o resultado de um Perfil C). No software Tricalc as vigas compostas apesar de serem modeladas com mais do que um perfil o software executa os cálculos como uma viga inteira. O que não acontece no Abaqus, são vários perfis com a mesma distância unidos por ligações aparafusadas.

Este aparenta ser um dos fatores para a diferença de deslocamentos, visto que ao caminhar para secções de maiores dimensões e de vigas compostas abertas e fechadas os valores não exibem uma discrepância tão grande no descolamento.

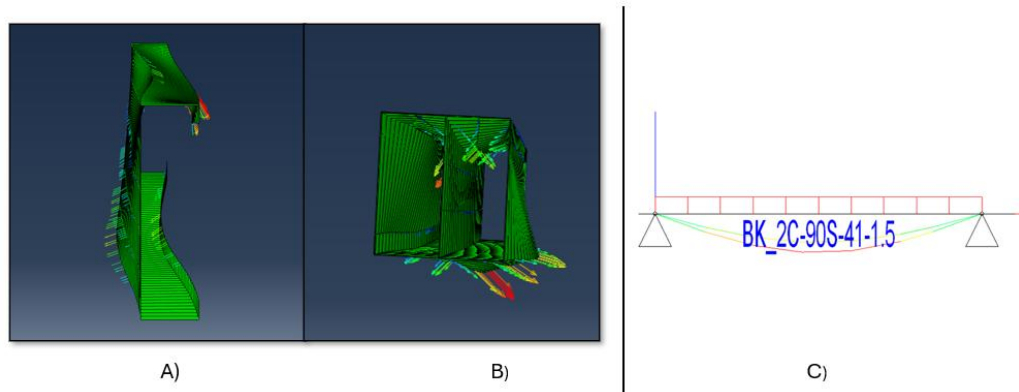


Figura 35 - Apresentação do elemento de torção nos perfis C e 2R (Abaqus)

No que diz respeito aos perfis SHS a diferença entre softwares não demonstra ser muito grande, devido ao facto de a torção não ter um papel tão relevante visto que são perfis fechados e sem quaisquer pontos de ligação (Tabela 21 e 22).

Tabela 21 - Comparação de resultados dos Softwares Tricalc e Abaqus (Perfis SHS - carga 1kN/m)

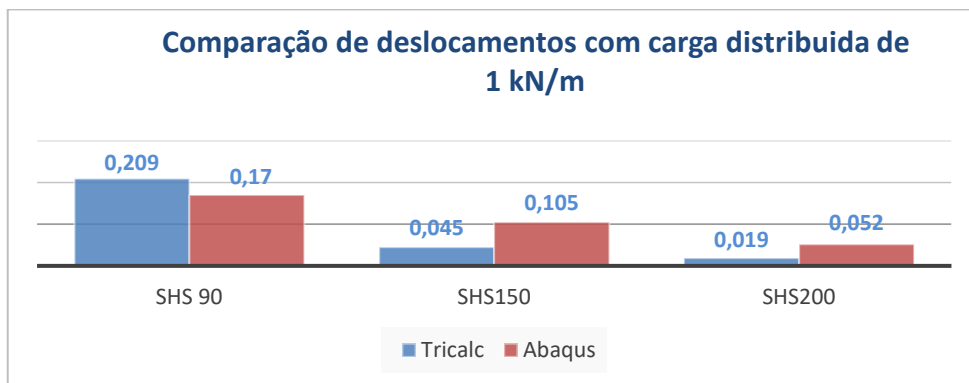
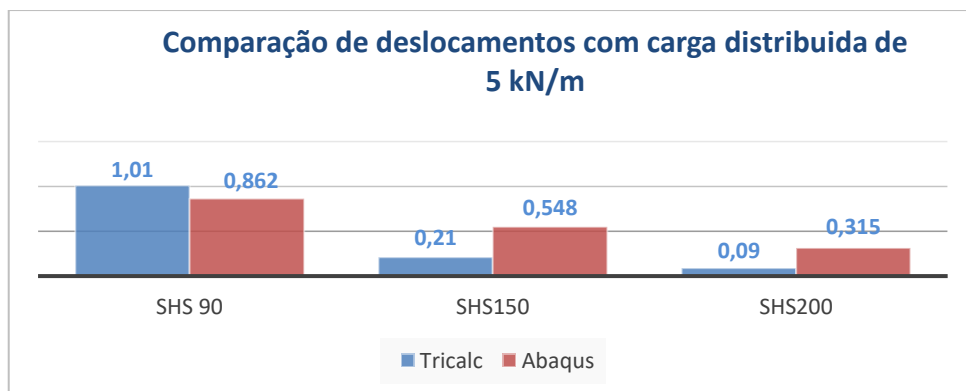


Tabela 22 - Comparação de resultados dos Softwares Tricalc e Abaqus (Perfis SHS - carga 5kN/m)



A maior diferença aparenta ser nos perfis de maiores dimensões SHS200 a uma carga de 5kN/m (tabela 21), isto porque, apesar do perfil fechado a área de influência onde a carga incide é maior, fazendo com que as laterais da secção abram e o topo do perfil que sofre a carga apresenta uma maior deformação devido à flexão (figura 35)

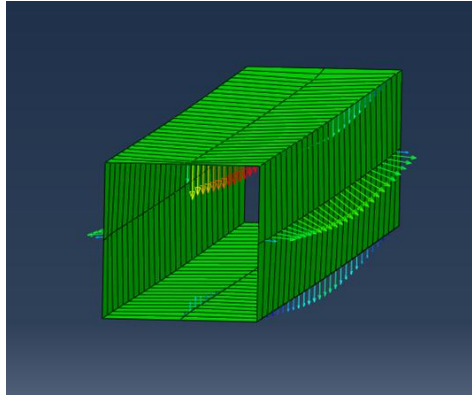
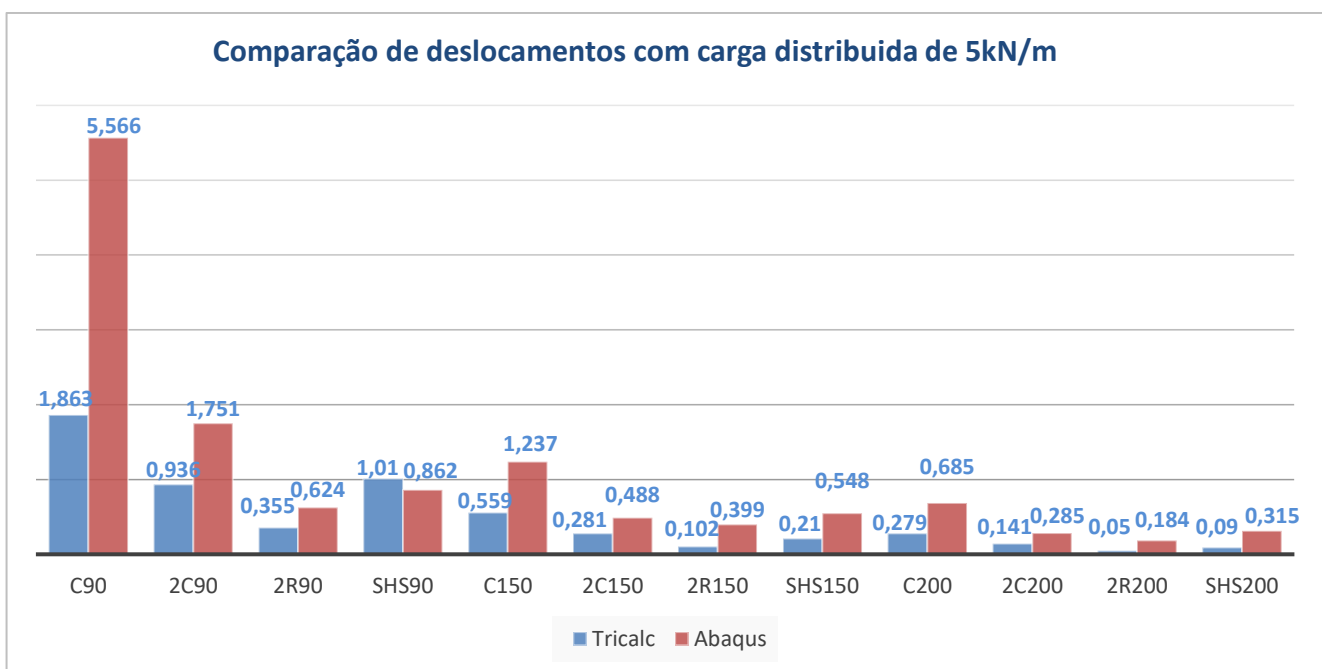


Figura 36 - Comportamento de um perfil SHS sujeito a cargas

Utilizando apenas os valores dos deslocamentos obtidos até agora, para uma carga distribuída de 5kN/m, a tabela 23 indica-nos que os perfis quadrados como seria de esperar apresentam melhor resistência que os perfis C. No entanto os perfis 2R apresentam um melhor desempenho que os perfis quadrados, este resultado talvez seja possível devido ao facto de ser uma viga composta fechada e de esta combater o problema da esbelteza com a união de vários perfis. A relação da viga composta aberta 2C e dos perfis quadrados é mais interessante, isto porque à medida que se aumenta as dimensões dos perfis quadrados pior é o seu desempenho apesar de os valores serem muito próximos.

Tabela 23 - Comparação de resultados dos Softwares Tricalc e Abaqus (Perfis C; 2C; 2R e SHS - carga 5kN/m)



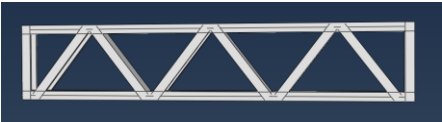

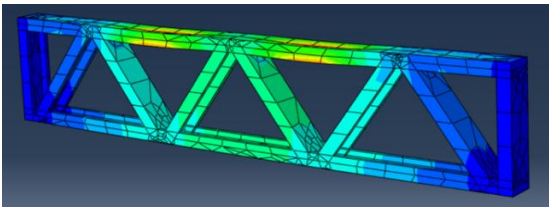
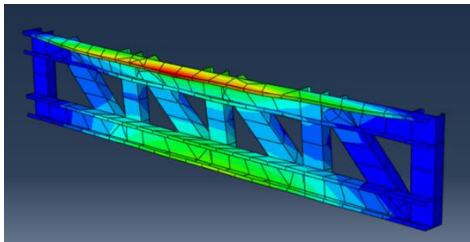
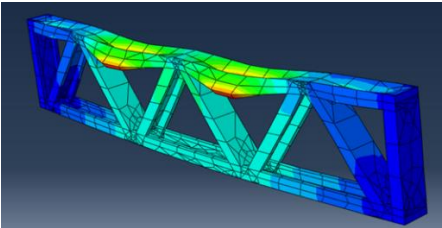
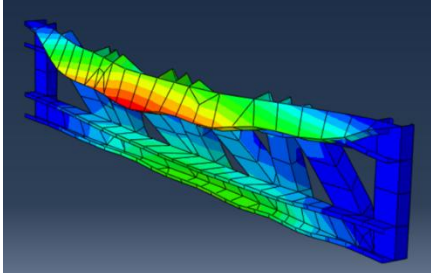
4.1.5. Estudo comparativo de treliças

Foi realizado um simples estudo para compreender o comportamento dos diferentes tipos de treliças abordadas no ponto 2.7.

Analisando a Tabela 24 onde é demonstrado o resultado do estudo comparativo de treliças. Observa-se que a Treliça Articulada, mais conhecida por Treliça Warren, apresenta por sofrer uma maior deformação na alma e causar mais pressão nos pontos de ligação quando sujeita a carga. Já em relação à treliça com ligações aparafusadas na alma (treliça Pratt), percebe-se que não sendo exatamente simétrica faz com que haja uma deformação maior na aba do perfil C. e que apesar dos elementos verticais e as diagonais não se encontram tanto em esforço, o facto de esta treliça não ser simétrica faz com que exista uma torção total da treliça.

Segundo as simulações realizadas, a treliça articulada apresenta melhores resultados. Com deslocamentos menores comparativamente aos deslocamentos de uma treliça com ligações aparafusadas na alma dos perfis.

Tabela 24 - Estudo comparativo de treliças

Treliça Articulada	Treliça com ligações na alma
	
Carga: 1 kN – Deslocamento: 0,0804 cm	Carga: 1 kN – Deslocamento: 0,371 cm
	
Carga: 5 kN – Deslocamento: 0,3828 cm	Carga: 5 kN – Deslocamento: 1,767 cm
	

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1.1. Conclusões

Neste projeto, foi abordado o sistema *Light Steel Framing* (LSF) como uma solução construtiva moderna e inovadora, com um foco especial na análise estrutural de perfis metálicos enformados a frio e no comportamento das vigas compostas. Estas são resultantes da combinação de perfis C e U. As vigas compostas fechadas demonstraram um desempenho estrutural superior, proporcionando uma maior capacidade de suportar carga, tornando-as elementos cruciais para aplicações em estruturas mais exigentes. A escolha dos perfis é um fator determinante neste processo, influenciando diretamente o desempenho e a eficiência de todo o sistema. Os perfis otimizados em termos de seção e espessura, são capazes de atender às necessidades estruturais, não só garantindo a resistência e estabilidade da estrutura, como também permite uma significativa poupança de material, reduzindo os custos sem comprometer a segurança.

Por meio de simulações computacionais utilizando ferramentas computacionais como o software Abaqus e Tricalc, foram conduzidos estudos para compreender as diferenças entre ambos e a diferença entre perfis. Estas ferramentas computacionais são indispensáveis no processo de validação de modelos estruturais, que permitem prever com precisão deformações e tensões das estruturas sob diversas condições de carga. Os resultados obtidos destacaram as vantagens das vigas compostas, capazes de suportar maiores cargas.

Foi possível evidenciar que o sistema LSF oferece algumas vantagens em relação aos métodos construtivos tradicionais, especialmente no que diz respeito à leveza, sustentabilidade e rapidez de montagem. A combinação de materiais, como EPS, gesso cartonado e lã, são essenciais para a redução de cargas permanentes, contribuindo para a eficiência estrutural e para o conforto térmico e acústico dos edifícios.

No entanto, o sistema LSF ainda enfrenta alguns desafios que necessitam ser superados para se expandirem no mercado. A necessidade de profissionais habilitados é um ponto crítico, assim como o aprimoramento de alguns métodos de conexão entre elementos estruturais, de modo a garantir uma maior eficiência nas montagens. Além disso, é essencial promover avanços tecnológicos que tornem este sistema mais competitivo em termos de custos, sendo uma alternativa robusta e sustentável no setor da construção civil.

5.1.2. Trabalhos Futuros

Com base nas limitações observadas, é interessante que futuras investigações aprofundem aspetos como a introdução de novos perfis, como por exemplo aqueles estudados neste projeto, e a adaptação do sistema LSF para edifícios de maior envergadura, podem abrir novos horizontes para esta tecnologia, consolidando-a como uma solução robusta e versátil no mercado da construção civil. A realização de um estudo detalhado de ligações e conexões entre os elementos estruturais, ou uma análise de vários tipos de treliças possíveis de realizar, e se são ou não uma melhor alternativa às vigas compostas.

Bibliografia

- ABAQUS/CAE. (2010). *Standard User's Manual, version 6.10-1, Simulia Corp., USA.*
- Andrade, R. M. (2016). *Estudo Comparativo Entre Construção Tradicional E Light Steel Framing (LSF).*
- Bevilaqua, R. (2005). Estudo Comparativo do desempenho estrutural de prédios estruturados em perfis formados a frio segundo os sistemasaporticado e “light steel framing”.
- Bezerra, D. (2016). Elementos de Apoio ao dimensionamento de secções compostas em light steel framing.
- Bloken. (2016). *Construção Em Aço Leve | Construção E Engenharia Em Aço Leve.* Obtido de <https://www.acoleve.pt/portfolio/industria-auditorio-figueira-da-foz/>
- Cardoso, D. (2018). Avaliação do desempenho funcional de uma habitação com .
- Cláudio, N. R. (2018). Thermal Performace of Lightweight Steel Framing (LSF) .
- Daltro, A. (2016). *Análise teórico Experimental de treliças leves de perfis de chapa dobrada.*
- Farfan, M., & Neto, C. (2017). Avaliação do impacto do processo de fabrico na análise estrutural de um fundido.
- Ferreira, M. S. (2014). O sistema construtivo com estrutura leve em aço.
- Filhos, S. &. (2021). *Como funciona o LSF* . Obtido de Seixas & Filhos. Seixas & Filhos: <https://seixasefilhos.com/como-funciona/>
- Futureng. (2024). Obtido de SFS. Futureng.pt: <https://www.futureng.pt/parcerias/fornecedores/sfs>
- Headers. (2017). Perfis Compostos em LSF – Analysis and Modelling of Composite . *Caso das Vergas Use* .
- Laim, L. &. (2011). Análise Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas em Aço Enformado a Frio. *VIII Congresso de Construção Metálica e Mista.*
- Martins, C. M. (2015). Desempenho Térmico de Paredes com Estrutura Leve em Aço Enformado a Frio.
- N.Soaes. (2017). Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) .
- Pinheiro, P. B. (2015). Desenvolvimento de um Sistema Fibroso Multicamada para Reabilitação de Edifícios.

- Pires, J. M. (2013). O método prescritivo na construção de moradias em aço leve .
- Placa magoxx. (2024). *MGO Board*. Obtido de Placa de Magnésio MGO:
<https://mgoboard.pt/>
- Rego, D. J. (2012). Estruturas de Edifícios em Light Steel Framing.
- Santos, P., & Poologanathan, K. (2021). The importance of stud flanges size and shape on the thermal performance of lightweight steel framed walls. *Sustainability (Switzerland)*.
- Silvestre, N., Pires, J., & Santos, A. (2013). *Manual de Conceção de Estruturas e edifícios em LSF* .
- Tangentescala. (2015). *Sistemas LSF, COonstrução em aço leve*. Obtido de Componentes do Sistema “LSF”: <https://tangentescala.pt/sistema-lsf/componentes-do-sistema-lsf/#1453903041319-75ed843d-a0a7>
- Tricalc. (2024). *Cálculo E Análise Estrutural Para Betão, Aço, GRAITEC Portugal* . .
Obtido de <https://graitec.com/pt/products/tricalc/>