

ANÁLISE PARAMÉTRICA E OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS FOTOVOLTAICAS AO SOLO

MARINA CHRYSÓSTOMO DE SIQUEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Professora Doutora Elsa de Sá Caetano

JUNHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, Helena e João, avó Lia e irmão Mateus

*“Depois de escalar uma grande montanha se descobre que existem muitas outras
montanhas para escalar.”*

Martin Luther King

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha imensa gratidão por todos aqueles que estiveram junto a mim durante a caminhada até a conclusão do curso de Engenharia Civil. Primeiramente à minha família, agradeço o apoio constante para que eu pudesse viver os meus sonhos, principalmente à minha avó Lia que é o meu exemplo de mulher forte e determinada. Também aos meus amigos e à Aline, digo obrigada pela compreensão nos momentos que não estive presente e pela ajuda de sempre. Sou imensamente grata também aos docentes os quais tive a oportunidade de ter os ensinamentos compartilhados.

Além disso, agradeço a todos que fizeram possível a realização do presente trabalho, nomeadamente:

- à minha orientadora, Professora Doutora Elsa Caetano, por acreditar em mim e pela paciência de sempre;
- ao Engº Henrique Almeida da empresa Voltalia, pela disponibilidade, atenção e incentivo;
- ao Engº Diogo Coutinho da empresa Voltalia, pelo apoio e constante disponibilidade;
- a todos que contribuíram para a correta redação deste documento;
- à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela oportunidade de integração em uma das melhores faculdades do país.

RESUMO

A crise ambiental e a iminente extinção dos combustíveis fósseis, fonte ainda mais utilizada para a produção de energia, provocam a necessidade de busca por novas alternativas para suprir a demanda atual de eletricidade.

Ao contrário da queima dos combustíveis fósseis, as energias renováveis são limpas e infinitas, ou seja, não geram gases poluentes e a energia é produzida a partir de fontes que não se esgotam. Nesse sentido, a humanidade está a ter uma maior atenção a essas alternativas tanto pelo viés sustentável quanto para a continuidade da produção de eletricidade em abundância.

O Sol, o vento, a água e a biomassa são exemplos de fontes renováveis para a produção de energia. Dentre elas, a energia solar é a que está mais a crescer globalmente devido aos incentivos governamentais e aos avanços tecnológicos. Os painéis fotovoltaicos possuem a capacidade de transformar a energia dos raios solares em energia elétrica e portanto, têm como o único requisito ter uma boa exposição solar.

Instalada em pequena ou larga escala, a tecnologia fotovoltaica é versátil e pode ser utilizada para fornecer eletricidade tanto para uma residência quanto para uma cidade inteira. Em âmbito da macrogeração, os painéis fotovoltaicos são posicionados em conjunto sobre mesas metálicas.

Essas estruturas de suporte dos painéis fotovoltaicos são sujeitas a alguns parâmetros que variam de acordo com a localização do projeto, como a inclinação dos painéis, a ação do vento, a resistência à tração do solo e a inclinação do terreno. A partir da proposta da empresa Voltalia, o presente trabalho realiza um estudo paramétrico que permite concluir sobre a influência de cada um desses fatores na quantidade de aço utilizada na estrutura.

Devido à esbelteza do aço enformado a frio que a compõe, a estrutura de suporte dos painéis possui como característica mais evidente a sua leveza. Pelo seu peso reduzido e pela grande área de contacto formada pelos painéis, o efeito do vento acaba por ser a ação mais condicionante na estrutura. Diante da ausência da caracterização da carga do vento nesse tipo de estrutura no Eurocódigo, é necessário fazer algumas interpretações e considerações da norma que são expostas neste documento.

Apesar de ótimo desempenho estrutural e econômico, o aço enformado a frio exige certa complexidade em sua verificação de segurança. Devido à espessura reduzida, os perfis são frequentemente de Classe 4 segundo o EC3 (1-1) e demandam o cálculo da secção efetiva. Tal procedimento é feito em folhas de cálculo que serão detalhadas ao longo do trabalho.

O estudo paramétrico é feito através do dimensionamento de diversos modelos com o auxílio do *software Robot Structural Analysis*. O resultado pretendido é a análise da quantidade de aço em quilogramas utilizada em cada modelo, com determinado valor de cada parâmetro, que permite concluir sobre a sua influência. Para além disso, também será feita uma análise econômica a fim de dispor maior sensibilidade em aspeto financeiro sobre a estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: energia solar, estruturas fotovoltaicas fixadas ao solo, vento, perfis de aço enformado a frio, estudo paramétrico.

ABSTRACT

The environmental crisis and the imminent extinction of fossil fuels, the worldwide most used source for the production of energy, lead to the need to search for new alternatives to supply the current demand for electricity.

Taking into consideration the fact that renewable energy is clean and naturally replenished, i.e. it does not generate polluting gases and is limitless, humanity is paying greater attention to this alternative, both from the sustainable perspective and from the continuity of electricity production in abundance.

The sun, wind, water and biomass are examples of renewable sources for energy production. Among them, solar energy is the fastest growing globally due to government incentives and technological advances. Photovoltaic panels transform the energy from the sun into electrical energy and, therefore, their only requirement is to have a good solar exposure.

Whether for small or large scale, photovoltaic technology is versatile and it can produce energy for both a single house and an entire city. In the context of macro-generator, photovoltaic panels are placed together on metallic tables.

The structural support for photovoltaic panels is subject to some parameters that vary according to the location of the project, such as the inclination of the panels, the action of the wind, the resistance to traction of the soil and the slope. Based on Voltalia's proposal, this work presents a parametric study in order to analyze the influence of each of these factors on the amount of steel used in the structure.

Due to the slenderness of the cold-formed steel that composes it, the structural support of the panels presents high lightness. Considering the reduced weight of the structure and the large contact area formed by the panels, the effect of the wind turns out to be the most conditioning action. Given the absence of wind load characterization in this type of structure in the Eurocode, it is necessary to make some interpretations and considerations of the standard presented in this document.

Despite of its excellent structural and economic performance, cold-formed steel requires a certain complexity in its safety verification. Because of the reduced thickness, profiles are often Class 4 according to EC3 (1-1) and require the calculation of the effective section. This procedure is done in detailed spreadsheets that are shown throughout this work.

The parametric study, done through the design of several models with the aid of Robot Structural Analysis software, aims to analyze the quantity of steel in kilograms used in each model with a certain value of each parameter, which allows us to conclude about its influence. In addition, an economic analysis will also be carried out in order to have greater financial sensitivity on the structure.

KEYWORDS: solar energy, ground-mounted photovoltaic structures, wind, cold-formed steel profiles, parametric study.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
 2. ESTADO DE ARTE	5
2.1. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	5
2.1.1. TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA	5
2.1.2. INTERESSE NA UTILIZAÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	8
2.1.3. DIFERENTES APLICAÇÕES DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	9
2.2. ESTRUTURAS DE AÇO ENFORMADO A FRIO	13
2.3. ESTRUTURAS FOTOVOLTAICAS FIXADAS AO SOLO	14
2.3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ESTRUTURA	21
2.3.2. AÇÕES SOLICITANTES DA ESTRUTURA	218
2.3.2.1. Ações Permanentes	219
2.3.2.2. Ação do Vento	219
2.3.2.3. Ação da Neve	219
2.3.2.4. Ação da Temperatura	20
2.3.2.5. Ação Sísmica	21
2.4. CARACTERIZAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	1421
2.4.1. ASPETOS GERAIS	221
2.4.2. AÇÃO DO VENTO SEGUNDO O EUROCÓDIGO	22
2.4.3. AÇÃO DO VENTO SEGUNDO CÓDIGO O AMERICANO	30
 3. CASO DE ESTUDO	33
3.1. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE SUPORTE	33
3.2. SECÇÕES DE AÇO ENFORMADO A FRIO	34

3.3. METODOLOGIA DO ESTUDO	36
 4. DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA.....	39
4.1. NORMAS DE APOIO AO DIMENSIONAMENTO	39
4.2. CARGAS DE CÁLCULO	39
4.2.1. AÇÕES PERMANENTES.....	40
4.2.2. AÇÕES VARIÁVEIS	40
4.2.2.1. Ação do Vento.....	40
4.2.2.2. Ação da Neve.....	42
4.3. COMBINAÇÃO DE AÇÕES	42
4.4. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL	43
 5. ESTUDO PARAMÉTRICO	51
5.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	51
5.2. ESTUDO 1: INFLUÊNCIA DO TILT.....	52
5.3. ESTUDO 2: INFLUÊNCIA DA CARGA DO VENTO	56
5.4. ESTUDO 3: INFLUÊNCIA DA CAPACIDADE RESISTENTE DO SOLO	59
5.5. ESTUDO 4: INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DO SOLO	61
 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
 ANEXOS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mesa de painéis fotovoltaicos em parque solar [5]	2
Figura 1.2 - Mecanismo do painel tipo <i>tracker</i> [6]	2
Figura 1.3 - Usina Fotovoltaica instalada na cobertura do estádio Mineirão no Brasil [7]	3
Figura 2.1 - Célula monocristalina: forno de fabrico, lingote de silício, lâminas de silício e formato [9]	6
Figura 2.2 - Célula policristalina: processo de fabrico, silício fundido em blocos e o aspeto da célula [9]	6
Figura 2.3 - Posição do Sol em um período de um ano em Santarém [9]	7
Figura 2.4 - Evolução do custo da produção face ao crescimento do mercado fotovoltaico	8
Figura 2.5 - Evolução do custo do painel fotovoltaico no mercado europeu [12]	9
Figura 2.6 - Parque solar com potência de pico de 48,9 MW instalado em Mogadouro, Portugal [15]	10
Figura 2.7 - Terraço e coberturas de parking de automóveis de empresa japonesa com painéis solares com potência de 1,6MWp [16]	10
Figura 2.8 - Fachada de edifício de supermercado na Áustria coberta por painéis solares [15] 10	
Figura 2.9 - Exemplos de instalação de painéis fotovoltaicos em residências: na cobertura e fixadas ao terreno [15]	11
Figura 2.10 - Projeto de sistemas de energia solar descentralizado na Alemanha idealizado pelo arquiteto Rolf Disch [15]	11
.....	11
Figura 2.11 - Cobertura (43,8 kW) e janela (1,1 kW) com sistema fotovoltaico integrado ao vidro numa estação de comboio em Tokyo [15]	11
Figura 2.12 - Carro coberto com painéis solares de alto eficiência (Toyota's Prius PHV) [17] ..	11
Figura 2.13 - Sistema integrando módulos fotovoltaicos quem fazem sombra e protegem as culturas agrícolas [18]	12
Figura 2.14 - Sistema de cobertura com módulos fotovoltaicos, que permite produzir energia, e simultaneamente fazer sombreamento a zonas de piscicultura, estabilizando a temperatura da água em níveis adequados à vida dos peixes [19]	12
Figura 2.15 - Plataforma flutuante de painéis fotovoltaicos instalada em barragem no Brasil....	12
Figura 2.16 - Tipos de secções de perfis enformados a frio [23]	13
Figura 2.17 - Máquina de laminagem a frio (LM-688) [21]	13
Figura 2.18 - Exemplos de <i>layouts</i> de estruturas solares com diferentes disposições dos painéis fotovoltaicos: na vertical em cima (2V3 e 2V10) e na horizontal embaixo (2H3 e 3H7)	225
Figura 2.19 - Exemplo de configuração de pórtico do tipo monoposte (imagem fornecida pela Voltalia)	22

Figura 2.20 – Exemplo de configuração de pórtico do tipo biposte (imagem fornecida pela Voltalia)	22
Figura 2.21 – Calcador lateral à esquerda e calcador central à direita (imagem fornecida pela Voltalia)	227
Figura 2.22 – Ligação do perfil metálico com o bloco de betão através de chumbadouros [23]	227
Figura 2.23 – Exemplo de parafusos de enterramento com apenas uma hélice [24]	228
Figura 2.24 – Coeficiente de forma para a carga da neve – cobertura de uma vertente [27]	20
Figura 2.25 – Coeficiente de forma μ_1 para a carga de neve de acordo com a inclinação α da cobertura [27]	20
Figura 2.26 – Protótipo utilizado no ensaio em túnel de vento [28]	22
Figura 2.27 – Coeficientes de pressão local para as direções de vento a 0°, 45°, 135° e 180° [28]	22
Figura 2.28 – Categorias de terreno e respetivos parâmetros segundo o Eurocódigo (Quadro 4.1) [29]	24
Figura 2.29 – Categorias de terreno e respetivos parâmetros segundo o Anexo Nacional (Quadro NA-4.1) [29]	24
Figura 2.30 - Representação de uma cobertura isolada vazia adaptada para o caso de uma vertente [29]	25
Figura 2.31 - Localização do centro de força para coberturas isoladas de uma vertente [29]	26
Figura 2.32 - Valores de $C_{p,net}$ e C_f para coberturas isoladas de uma vertente [29]	26
Figura 2.33 – Exemplo de estrutura solar com os elementos estruturais assinalados (imagem fornecida pela Voltalia alterada)	27
Figura 2.34 – Vista superior de uma estrutura solar com as áreas A, B e C assinaladas de acordo com a imagem em planta da cobertura de uma vertente do Quadro 7.6 do EC1 (1-4)	28
Figura 2.35 – Disposição das cargas de pressão do modelo 1 (dimensionamento das madres com $C_{p,net}$)	28
Figura 2.36 – Disposição das cargas de sucção do modelo 1 (dimensionamento das madres com $C_{p,net}$)	28
Figura 2.37 – Disposição da carga de pressão do vento na direção 0° (modelo 2)	29
Figura 2.38 – Disposição da carga de pressão do vento na direção 180° (modelo 2)	29
Figura 2.39 – Disposição da carga de sucção do vento na direção 0° (modelo 2)	30
Figura 2.40 – Disposição da carga de sucção do vento na direção 180° (modelo 2)	30
Figura 3.1 - Vista lateral de estrutura solar padrão monoposte com <i>tilt</i> de 25° (imagem concedida pela Voltalia alterada)	34
Figura 3.2 - Vista frontal de estrutura solar padrão monoposte com <i>tilt</i> de 25° (imagem concedida pela Voltalia alterada)	34
Figura 4.1 - Valores de cálculo das ações (EQU) (Conjunto A) [25]	42

Figura 4.2 - Valores de cálculo das ações a utilizar na combinação de ações [25]	42
Figura 4.3 - Comprimentos de encurvadura de acordo com os apoios de cada elemento	45
Figura 4.4 - Valores de fatores de imperfeição α para perfis enformados a frio (C = secções em U) [37]	46
Figura 4.5 - Valores de coeficientes do cálculo do M_{cr} utilizados para as madres [38]	47
Figura 4.6 - Valores de coeficientes para o M_{cr} utilizados para pilares e vigas [38]	48
Figura 5.1 - Modelo de estrutura do Estudo 1 de <i>tilt</i> 25°	53
Figura 5.2 - Modelo de estrutura do Estudo 1 de <i>tilt</i> 20°	53
Figura 5.3 - Modelo de estrutura do Estudo 1 de <i>tilt</i> 15°	54
Figura 5.4 - Modelo de estrutura do Estudo 1 de <i>tilt</i> 10°	54
Figura 5.5 - Modelo de estrutura do Estudo 2 de <i>tilt</i> 25° com ação do vento referente à França	57
Figura 5.6 - Modelo de estrutura do Estudo 2 de <i>tilt</i> 25° com ação do vento referente à Portugal.	57
Figura 5.7 - Modelo de estrutura do Estudo 2 de <i>tilt</i> 25° com ação do vento referente à Albania	57
Figura 5.8 - Modelo de estrutura do Estudo 3 de <i>tilt</i> 25° no solo de resistência à tração de 7,5 kN e 10 kN	59
Figura 5.9 - Modelo de estrutura do Estudo 3 de <i>tilt</i> 25° no solo de resistência à tração de 5 kN	59
Figura 5.10 - Modelo de estrutura do Estudo 4 de <i>tilt</i> 25° no terreno com inclinação de 0° (vista frontal)	61
Figura 5.11 - Modelo de estrutura do Estudo 4 de <i>tilt</i> 25° no terreno com inclinação de 5° (vista frontal)	61
Figura 5.12 - Modelo de estrutura do Estudo 4 de <i>tilt</i> 25° no terreno com inclinação de 10° (vista frontal)	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características das secções do perfil Ω (madres e escoras)	35
Tabela 3.2 - Características das secções do perfil C (pilares e vigas)	36
Tabela 3.3 - Características do aço enformado a frio S350 Magnelis® ZM310	36
Tabela 3.4 - Valores de referência para os parâmetros fixos	37
Tabela 4.1 - Ações consideradas no dimensionamento da estrutura de suporte de painéis fotovoltaicos	39
Tabela 4.2 - Fatores utilizados no cálculo da pressão dinâmica de pico do vento dos Estudos 1,3 e 4	41
Tabela 4.3 - Fatores utilizados no cálculo da pressão dinâmica de pico do vento nos Estudos 2	41
Tabela 4.4 - Fatores utilizados no cálculo da carga da ação da neve	42
Tabela 4.5 - Valores do comprimento de encurvadura no plano y-y e z-z sendo L o comprimento da barra	46
Tabela 4.6 - Valores do comprimento de encurvadura no plano y-y e z-z sendo L o comprimento da barra	47
Tabela 5.1 - Parâmetros fixos do Estudo 1 (<i>Tilt</i> variável)	52
Tabela 5.2 - Parâmetros variáveis do Estudo 1 (<i>Tilt</i> variável) com F_w em kN/m^2	53
Tabela 5.3 - Características dos modelos do Estudo 1 (<i>Tilt</i> variável)	54
Tabela 5.4 - Secções finais e peso total da estrutura de cada modelo do Estudo 1 (<i>Tilt</i> variável)	55
Tabela 5.5 - Parâmetros fixos do Estudo 2 (vento variável)	56
Tabela 5.6 - Parâmetros fixos para cálculo da pressão dinâmica de pico q_p no Estudo 2 (vento variável)	56
Tabela 5.7 - Parâmetros variáveis do Estudo 2 (vento variável)	56
Tabela 5.8 - Características dos modelos do Estudo 2 (vento variável)	58
Tabela 5.9 - Secções finais e peso total da estrutura de cada modelo do Estudo 2 (vento variável)	58
Tabela 5.10 - Parâmetros fixos do Estudo 3 (Resistência do solo variável)	59
Tabela 5.11 - Características dos modelos do Estudo 3 (Resistência do solo variável)	60
Tabela 5.12 - Secções finais e peso total da estrutura de cada modelo do Estudo 3 (Resist. solo variável)	60
Tabela 5.13 - Parâmetros fixos do Estudo 4 (<i>Slope</i> variável)	61
Tabela 5.14 - Características dos modelos do Estudo 4 (<i>Slope</i> variável)	62

Tabela 5.15 - Secções finais e peso total da estrutura de cada modelo do Estudo 4 (<i>Slope</i> variável)	63
--	----

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

IEA – Agência Internacional de Energia

SEAOC – Associação de Engenheiros Estruturais da Califórnia

EC1 (1-3) – Eurocódigo 1, Parte 1 de 3

EC1 (1-4) – Eurocódigo 1, Parte 1 de 4

EC3 (1-1) – Eurocódigo 3, Parte 1 de 1

AM – Fator de massa de ar

UV – Ultravioleta

Esp. – Espessura

PV – Pannel fotovoltaico

GW – Giga Watts [10⁶ W]

MWh – Mega Watts Hora

€/Wp – Euro por watts pico

kg/un – Quilograma por unidade

f_y – Tensão de cedência [MPa]

f_u – Tensão última [MPa]

E – Módulo de elasticidade [MPa]

G – Módulo de distorção [MPa]

F_k – Valor característico da ação

$q_p(z)$ – Pressão dinâmica de pico do vento [kN/m²]

$v_{b,0}$ – Velocidade básica de referência do vento

v_m – Velocidade média do vento

c_{dir} – Coeficiente de direção

c_{season} – Coeficiente de sazão

c_{prob} – Coeficiente de probabilidade

c_r – Coeficiente de rugosidade

c_o – Coeficiente de orografia

k_r – Coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade

Z_0 – Comprimento de rugosidade

Z_{min} – Comprimento mínimo

C_f – Coeficiente de força global (vento)

$C_{p,net}$ – Coeficiente de pressão máxima para todas as direções do vento

$I_v(z)$ – Intensidade de turbulência à altura z

σ_v – Desvio padrão

w - Pressão do vento [kN/m^2]

F_w – Força total do vento [kN]

C_z – Coeficiente dependente da zona

H – Altitude local [m]

S_k – Valor característico da carga da neve ao nível do solo

S_d – Pressão da neve de cálculo [kN/m^2]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Desde o início de sua descoberta em meados do século XVII, a energia elétrica se tornou fundamental para o crescimento e desenvolvimento de todas as atividades humanas. A partir da eletricidade, o homem ainda é capaz de criar novas tecnologias e aumentar o conforto da sociedade.

Atualmente, a principal fonte de energia para a geração de eletricidade são os combustíveis fósseis, como o carvão mineral, o gás natural e o petróleo. Tais materiais levam milhões de anos para serem formados por meio de processos naturais, como a decomposição de organismos mortos soterrados. Além disso, este tipo de produção de energia é a principal causa do aquecimento global devido a emissão anual de cerca de 33 bilhões de toneladas de dióxido de carbono na atmosfera por conta da queima destes combustíveis [1].

Além da problemática ambiental, o fato dos combustíveis fósseis serem de caráter finito, fez com que o interesse em energias renováveis surgisse em âmbito da produção de eletricidade. Dentre as principais fontes de energia renováveis estão a solar, a eólica, a hídrica e a de biomassa e todas elas possuem em comum o fato de terem fontes inesgotáveis: o sol, o vento, a água e os materiais orgânicos.

Essas fontes de energia também representam uma alternativa para países que não possuem combustíveis fósseis disponíveis em seu território e dependem de importação desses materiais para gerar energia, como é o caso de Portugal. Em 2007, em comparação com outros países europeus, Portugal era o 6º país mais dependente do exterior em termos de sua fatura energética segundo dados do Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) [2]. Com uma localização privilegiada: extensa costa marítima, rios de densos caudais e insolação média muito superior ao valor médio da Europa, Portugal possui imenso potencial de se desenvolver frente às energias renováveis.

Segundo o panorama mundial de energia de 2020 divulgado pela IEA (*Internacional Energy Agency*), as energias renováveis estão a crescer rapidamente com a energia solar no centro desta nova geração de tecnologias de eletricidade. Apesar da energia hidrelétrica ainda ser a maior fonte renovável de eletricidade, a solar é o principal impulsionador do crescimento, uma vez que estabelece novos recordes de implantação a cada ano após 2022, seguida pelo vento *onshore* e *offshore* [3].

Na última década, a energia fotovoltaica sofreu drástica redução de custo devido aos avanços tecnológicos e às políticas de incentivo. Atualmente, na maioria dos países a implantação da energia solar em larga escala é consistentemente mais barata em relação à instalação de novas usinas a carvão ou a gás, além dos projetos solares oferecem os menores custos de eletricidade. O barateamento da energia acaba por tornar a oferta de eletricidade mais acessível, uma vez que ainda existe uma parcela

da população que vive sem o acesso à luz elétrica, como a Índia, que ultrapassa a marca de 300 milhões de pessoas nesta condição [3].

Ao mesmo tempo que possui milhões de sua população isolados de eletricidade, a Índia abriga o atual maior parque solar do mundo, o *Bhadla Solar Park*. A produzir a totalidade de sua capacidade energética de 2,25 GW desde 2020, a usina solar ocupa uma área de 5700 hectares, ou seja, mais de cinco mil campos de futebol. A região foi escolhida devido à abundância de incidência solar e à alta temperatura que possibilitaram a eficiência satisfatória do parque solar [4].

Apesar da energia solar ter sido abordada até o momento em um aspecto macro, com produção de larga escala, a aplicação de sistemas de painéis fotovoltaicos é bastante versátil e pode ser dividida em dois grandes grupos: *on-grid* e *off-grid*. Enquanto o primeiro inclui os sistemas que estão ligados à rede elétrica pública, o segundo engloba aqueles que não possuem acesso à rede e são autônomos, a produzir eletricidade para consumo próprio.

Os sistemas *on-grid* podem ser de macrogeração (grandes centrais de parques solares) ou de microgeração individual, no qual a eletricidade produzida num edifício residencial ou comercial é debitada da conta final. Já a implantação em sítios isolados da rede pública é classificada como *off-grid*, assim como pequenas estruturas como sinais de trânsito autosuficientes.



Figura 1.1 - Mesa de painéis fotovoltaicos em parque solar [5]

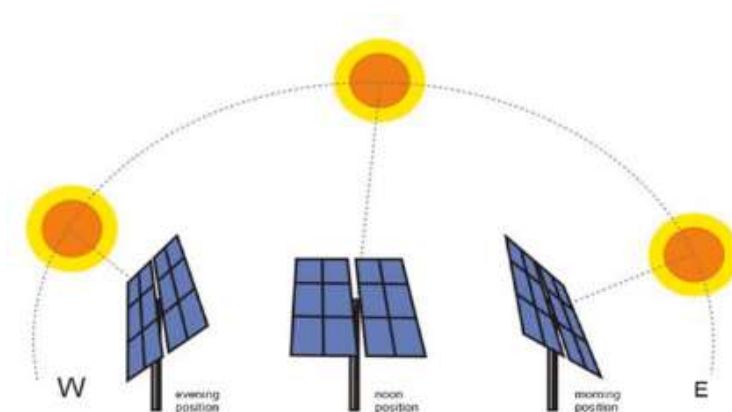


Figura 1.2 - Mecanismo do painel tipo *tracker* [6]

A Figura 1.1 mostra um exemplo de sistema *on-grid* de macrogeração, onde os painéis fotovoltaicos são dispostos lado a lado a formar mesas inclinadas fixas no solo. Também é possível observar na Figura 1.2 o mecanismo dos painéis solares do tipo *tracker*, em que o painel dispõe de um sistema rotacional a fim de estar sempre na posição que recebe maior incidência solar. Apesar de apresentar aumento de 20 a 40% no rendimento a depender da localização de implantação, a solução *tracker* é mais cara e requer uma manutenção mais trabalhosa.

A instalação dos painéis solares está a ser cada vez mais comum em diversos tipos de construção. Uma vez que basta estar suficientemente exposto à radiação solar durante o dia, terraços de grandes *shoppings centers*, estádios e coberturas de estacionamentos passam a ser abrigo para os sistemas fotovoltaicos. Nesse sentido, um exemplo a ser citado é a implantação de uma usina solar na cobertura do estádio do Mineirão localizado em Belo Horizonte (Brasil), o qual agregou a autossuficiência que a energia solar proporciona com a estética de seu terraço. O sistema é capaz de gerar 1800 MWh anuais de energia, equivalente ao consumo médio de 1400 casas locais.



Figura 1.3 – Usina Fotovoltaica instalada na cobertura do estádio Mineirão no Brasil [7]

Apesar das diversas vantagens apresentadas pelos sistemas fotovoltaicos, como a produção de energia sem emissão de gases poluentes, a vida útil de 25 anos e as diversas possibilidades de local de instalação, esse tipo de produção de eletricidade também possui pontos fracos que merecem atenção. Como é evidente, em dias nublados a eficiência dos painéis é afectada com a sua capacidade de geração de energia limitada, o mesmo acontece quando eventuais sujeiras ficam depositadas na superfície das placas solares.

Diante de tantas aplicações, o presente trabalho terá como foco o estudo da estrutura de suporte dos painéis fotovoltaicos que compõem os parques solares. Essas mesas são compostas por pilares fixados no solo e por isso possuem fatores dependentes das características do terreno em que se encontra, mas este não é o fator mais condicionante. Por serem estruturas compostas por perfis leves de aço enformado a frio e terem grande superfície de contacto plana, o efeito do vento sobre a estrutura tem grande relevância em seu dimensionamento.

A ausência de uma metodologia fornecida por normas padronizadas gera dificuldade na caracterização da ação do vento em painéis solares inclinados fixados ao solo. Apesar de oferecer orientação na determinação do efeito do vento em diversos tipos de estrutura, o Eurocódigo não atende a mesma necessidade no dimensionamento dos painéis solares. Para a definição de tais cargas, é necessário fazer considerações e interpretações do código que podem variar de projetista para projetista, fato que pode conduzir a situações de sobredimensionamento ou até mesmo subdimensionamento.

Além da atuação do vento, o dimensionamento da mesa dos parques solares é sujeito a diversos fatores importantes como a inclinação do painel, a localização geográfica e as características do terreno em que será implantada. A determinação da influência desses parâmetros na quantidade de aço utilizada na estrutura é essencial para elaboração de projetos que visam a economia tanto em âmbito financeiro quanto ambiental. Em vista disso, a empresa Voltalia realizou a proposta do tema da presente tese com o intuito de proporcionar maior sensibilidade ao projetista diante dos fatores envolvidos nesse tipo de estrutura.

1.2. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Uma vez que o dimensionamento da estrutura de suporte dos painéis fotovoltaicos é condicionado por fatores que variam de acordo com o projeto, o principal objetivo da presente dissertação consiste em avaliar a influência desses fatores na quantidade de aço utilizada e consequentemente no custo total da estrutura. Para tal efeito, é realizado um estudo paramétrico no qual as variantes são: a inclinação dos painéis denominada *tilt*, a carga do vento, a resistência do terreno e a inclinação do terreno denominada *slope*.

O trabalho é dividido em seis capítulos, os quais primordialmente dão uma noção geral do assunto de painéis fotovoltaicos e seus envolventes para depois abordarem a modelação e a análise das estruturas. O primeiro capítulo trata da introdução e busca apresentar o cenário das energias renováveis no mundo e dos sistemas fotovoltaicos disponíveis no mercado, assim como relatar a organização do trabalho.

Já no segundo capítulo, são expostos resultados de pesquisas sobre estudos que têm como tema a tecnologia fotovoltaica no geral, a comentar sobre as vantagens e desvantagens dos sistemas solares e as suas diferentes aplicações. As principais características das estruturas solares serão abordadas, em termos de material, possibilidades de configuração e fundações. A caracterização de todas as ações solicitantes em estruturas solares é abordada nesta sessão, assim como em mais específico a determinação da carga do vento nesse tipo de estrutura segundo o Eurocódigo. A caracterização do vento ainda é abordada sob a visão de um estudo científico que gera coeficientes específicos para a estrutura abordada e também são feitos comentários sobre a ação do vento de acordo com o código americano.

No terceiro capítulo, o caso de estudo será apresentado, no qual a estrutura estudada será descrita de maneira geral a partir da apresentação do tipo de painel solar utilizado e suas características, além do catálogo de secções de aço enformado a frio que se pretende utilizar. A metodologia e as etapas em que o estudo foi dividido também são explicadas nessa sessão.

O quarto capítulo trata da apresentação das normas que são seguidas no dimensionamento da estrutura, explicitando a quantificação das cargas permanentes e variáveis, além das combinações de ações. As considerações e interpretações do Eurocódigo 1 (1-4) para a quantificação da carga do vento já abordadas no segundo capítulo serão levadas em conta para o dimensionamento e os parâmetros de *input* para tal quantificação serão expostos nesta sessão. Por último, é explicado como será realizada a análise estrutural segundo o EC3 de acordo com todas as verificações necessárias para o aço enformado a frio.

O quinto capítulo trata do detalhamento de cada etapa do estudo paramétrico, tanto os parâmetros fixos quanto os variáveis de cada estudo são expostos. Além disso, são detalhadas as alterações que cada modelo sofreu desde a concepção inicial assim como a imagem da sua versão final desenvolvida no programa de cálculo automático *Robot Structural Analysis*. Também são apresentados os resultados de cada modelo abordado nos estudos, ou seja, as diferenças do peso final das estruturas, assim como a variação em termos econômicos.

O último capítulo diz respeito às conclusões finais do trabalho realizado.

2

ESTADO DE ARTE

2.1. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**2.1.1. TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA**

Diante da necessidade de fontes de energias alternativas em um mundo em que ainda tem a maior parte da eletricidade produzida pela queima de combustíveis fósseis, as energias renováveis chamam a atenção por serem infinitas e não poluírem o ambiente. Atualmente, dentre essas energias, aquela que possui o melhor cenário de crescimento mundial é a solar [3].

Os painéis solares possuem a capacidade de converter diretamente a radiação solar em eletricidade, processo denominado fotovoltaico. Os sistemas fotovoltaicos detêm células que convertem a luz solar em eletricidade, dentro de cada célula existem camadas de um material semicondutor, que por sua vez convertem a energia da radiação solar em corrente elétrica. Um campo elétrico é criado entre as camadas assim que a luz incide sobre a célula gerando um fluxo de energia [8].

Geralmente o painel solar é composto por 36, 60 ou 72 células fotovoltaicas ordenadas. Hoje em dia existem alguns tipos de células que se diferem no material ou no modo de produção. O mais tradicional em painéis solares para geração de energia elétrica são as de silício cristalino devido a sua maior eficiência e disponibilidade abundante. As células existentes no mercado são descritas a seguir nomeadas pelo material que as compõem [9]:

- Silício Mono Cristalino (mono-Si): presente na maioria dos painéis solares, é a mais eficiente com rendimento de até 14% em produção em série, porém possui elevado custo de produção. O formato da célula é octogonal com os cantos chanfrados, além disso os painéis compostos por esse tipo de célula possuem um padrão distinto aos demais com pequenos diamantes brancos;
- Silício Policristalino (multi-Si): também feita de silício purificado, mas com o processo de fundição diferente, uma vez que o silício é fundido em grandes blocos. Tem a eficiência máxima de produção em série de 13%;
- Filme Fino (*thin-film*): produzida de maneira completamente diferente das células tradicionais de silício cristalino, apresenta eficiência de conversão menor do que elas, de dois a três pontos percentuais. Ao mesmo tempo é uma ótima tecnologia para a utilização em pequenas aplicações como em máquinas de calcular simples;
- Silício Amorfo (a-Si): utilizada em pequena escala e muitas, vezes quando combinada com outras células aumentam a eficiência de produção em até 9%;

- Telureto de Cádmio (CdTe): proporciona o melhor custo-benefício em placas solares finas com a sua eficiência média de produção em série de 9%;
- Arsenato de Gálio: restrita à indústria espacial, possui alto custo devido a sua eficiência de 28%;
- Híbrida (HJT – Heterojunção): combinação de camadas finas de silício amorfo depositadas em *wafers* de silício monocristalino que aumenta a eficiência em 20%, sendo a tecnologia com maior potencial de crescimento;
- Orgânica (OPV): utiliza condutores orgânicos para absorver a luz do sol e transportar a carga de energia elétrica para a produção de eletricidade limpa. É aplicada em sistemas fotovoltaicos de baixo custo, principalmente em residências e em pequenos estabelecimentos comerciais por ser flexível e eficiente.

É importante ressaltar o crescimento em potencial da eficiência de painéis compostos por silício cristalizado, principalmente o policristalino, devido ao aprimoramento proveniente de avanços tecnológicos no âmbito das técnicas de produção desse tipo de células. Além disso, por conta de incentivos governamentais e o aumento da demanda, as células fotovoltaicas tiveram redução significativa no preço nas últimas quatro décadas [9].



Figura 2.1 – Célula monocristalina: forno de fabrico, lingote de silício, lâminas de silício e formato [9]



Figura 2.2 – Célula policristalina: processo de fabrico, silício fundido em blocos e o aspeto da célula [9]

A quantidade de energia que é gerada pelas células é proporcional à intensidade da luz que radia sobre elas. Tal radiação varia de acordo com a orientação dos painéis. No caso de Portugal, a orientação ótima é a direção Sul, inclinado a 35°, a gerar mais 15% de energia do que se estivesse disposto na horizontal [10].

Como a radiação é sempre maior numa área que recebe os raios solares perpendicularmente, é essencial o conhecimento da posição do Sol no local de implantação de sistemas fotovoltaicos. Quando a posição do Sol é perpendicular à superfície da Terra, a luz solar atravessa um percurso mais curto, ao mesmo tempo em que quanto mais baixo for o ângulo de incidência solar, mais longo é o caminho percorrido pela radiação na atmosfera. Um indicador da posição solar num local específico é a Massa de Ar (fator AM), que possui a seguinte relação com a altura do Sol (γ_s):

$$AM = \frac{1}{\sin(\gamma_s)} \quad (2.1)$$

À título de exemplo, são apresentadas na Figura 2.3 as relações entre a massa de ar AM e altura do Sol em Santarém com latitude de 39° . A altura solar máxima é atingida no verão com o AM próximo ao valor unitário, que seria o cenário ideal de $\gamma_s = 90^\circ$. Ao mesmo tempo, no inverno essa posição varia até o seu ângulo mínimo em que a intensidade solar é menor com o $AM = 2,15$.

Deve-se considerar ainda que em seu percurso na atmosfera, a radiação é reduzida pela reflexão atmosférica, absorção pelas moléculas O_3 , H_2O , O_2 e CO_2 , dispersão molecular de Rayleigh e dispersão por partículas de pó e poluição do ar [10].

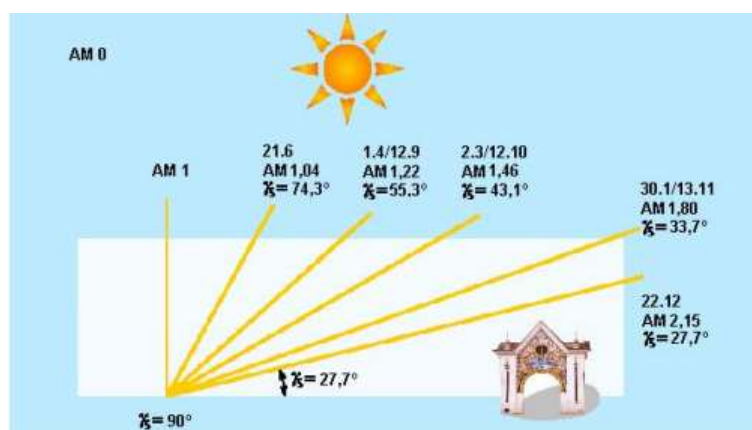


Figura 2.3 – Posição do Sol em um período de um ano em Santarém [9]

Na implantação dos sistemas fotovoltaicos, a determinação da radiação solar em certo local é feita por meio de sensores fotovoltaicos que confirmam a inclinação ideal do painel, além da orientação dele. Dessa forma, chama-se a atenção para a importância da inclinação na eficiência dos sistemas.

Segundo o relatório anual de 2020 publicado pelo *Phoovoltaic Power Systems Programme* da *International Energy Agency*, a investigação se faz constante em busca de novas tecnologias avançadas e acessíveis. Pesquisadores analisam a possibilidade de implantação de novos materiais para as folhas frontais, revestimentos ópticos, encapsulantes, conexões, entre outros. Além disso, são investigados a aplicação de vidros mais finos e polímeros transparentes a fim de reduzir o peso dos módulos e possibilitar a flexibilização deles em superfícies curvas garantindo a durabilidade quando expostos à radiação UV.

Ainda declaram sobre a substituição de componentes a fim de facilitar a reciclagem dos painéis solares, além de buscarem tornar as células fotovoltaicas mais tolerantes a fissuras, sem que haja rompimento da condutividade da energia, resultando em módulos menos suscetíveis à perda de eficiência.

2.1.2. INTERESSE NA UTILIZAÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A utilização exaustiva dos combustíveis fósseis fez com que surgisse a necessidade de buscar fontes renováveis para a produção de energia. Além do caráter infinito, também há a demanda por uma energia limpa que não gere poluição como a combustão gera. Nesse sentido, as energias renováveis surgem como solução, nomeadamente as energias: hídrica, solar, eólica e a de biomassa.

Em vista dos vários tipos de alternativas de energia limpa, em certos casos a produção a partir dos painéis fotovoltaicos apresenta algumas vantagens em relação às outras. Talvez o principal ponto forte da instalação fotovoltaica seja a sua adaptação à escala macro e micro, podendo ser implantada na cobertura de uma residência assim como em parques solares que abastecem uma população inteira.

Outro ponto é o fato dos painéis fotovoltaicos serem leves e não representarem dificuldade no transporte e na montagem, além de possibilitar a implantação em terraços extensos de edifícios comerciais sem prejudicar a cobertura do mesmo. A possibilidade de armazenamento da eletricidade gerada em baterias também faz com que a energia solar seja competitiva frente às demais.

É frequente que uma tecnologia recente ingresse no mercado com um preço inicial alto e sofra redução de custos com o tempo. Foi o que ocorreu com a energia solar, que já teve o custo muito elevado em relação às outras fontes, porém esse cenário já apresenta alterações significativas atualmente. O gráfico da Figura 2.4 representa a curva de experiência de um estudo suíço que compara a evolução do custo do painel fotovoltaico com o volume produzido de energia que confirma a tendência de queda do preço do produto [11].

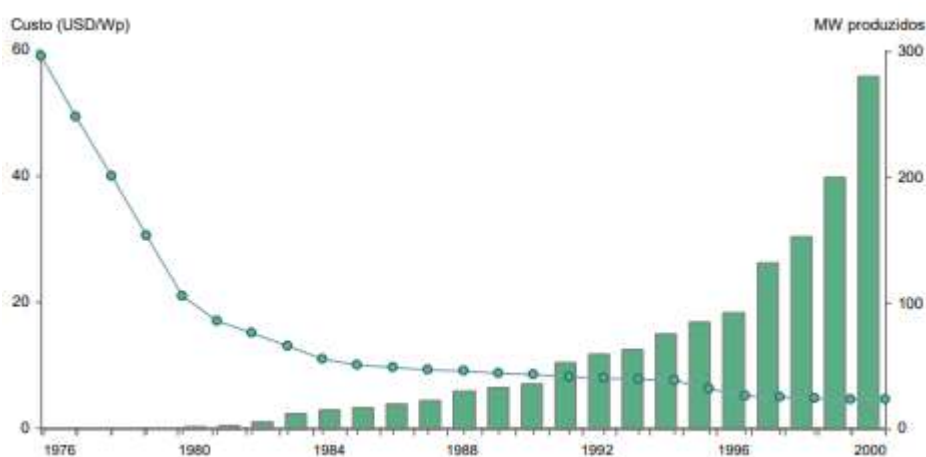


Figura 2.4 – Evolução do custo da produção face ao crescimento do mercado fotovoltaico [11]

A extrapolação da curva para os próximos anos parece coincidir com a realidade atual de custo dos painéis segundo a Figura 2.5, retirada do índice anual de 2020 feito pela empresa alemã *pvXchange*. Uma vez que o preço dos sistemas PV em 2005 rondava os 5€/Wp [11], ao ser comparado com a curva de modelo mais caro em dezembro de 2020 apresenta uma diferença significativa de 4,67€/Wp, ou seja, uma redução de 93%.

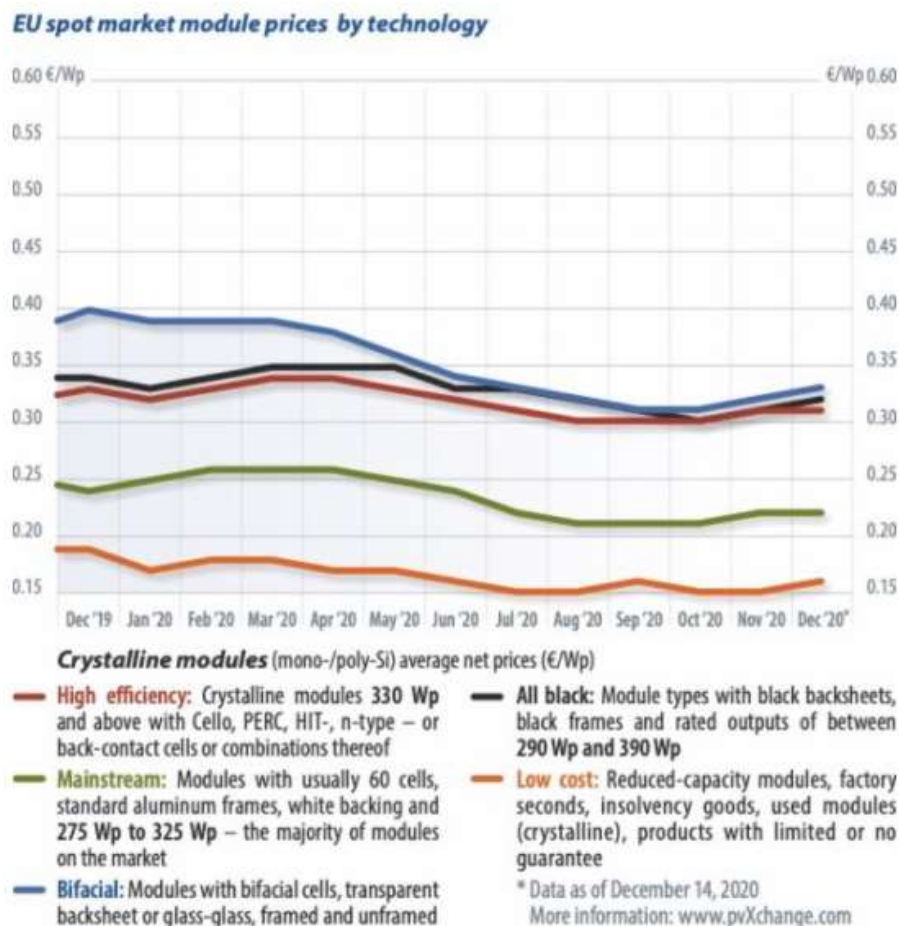


Figura 2.5 – Evolução do custo do painel fotovoltaico no mercado europeu [12]

Diante das diversas vantagens apresentadas, tanto de caráter ambiental quanto econômico, é plausível afirmar que a tecnologia fotovoltaica é promissora no âmbito da produção de energia. Tal afirmativa se faz ainda mais consistente no caso de implantação em países com alta exposição solar como é o caso de Portugal, que possui localização favorável com uma das maiores radiações solares da Europa [13].

Quanto às desvantagens, pode ser apontado a dependência da eficiência do sistema fotovoltaico em relação à localização geográfica e ao clima, uma vez que a produção de energia é diretamente proporcional com a quantidade de luz solar que incide nos painéis. A oscilação do clima com possibilidade de longos períodos chuvosos pode apresentar dificuldade na implantação da energia solar como fonte principal de energia em determinada região.

Outro fator condicionante é o fato de que o preço das baterias de lítio ainda possuem um valor alto no mercado e essas são essenciais, já que a energia é produzida apenas durante o dia. Além disso, apesar de estar em queda, o preço dos painéis em si em alguns países ainda é superior ao custo da produção de energia com outras fontes de energia [14].

2.1.3. DIFERENTES APLICAÇÕES DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Com o principal requisito de ter boa exposição solar, os painéis fotovoltaicos possuem uma grande diversidade em sua aplicação. Com os avanços tecnológicos, as aplicações estão a ser cada vez mais

diversas. A seguir serão apresentados alguns exemplos de implantação dos painéis fotovoltaicos, além do caso dos parques solares, trabalhado no presente estudo.



Figura 2.6 – Parque solar com potência de pico de 48,9 MW instalado em Mogadouro, Portugal [15]



Figura 2.7 – Terraço e coberturas de parking de automóveis de empresa japonesa com painéis solares com potência de 1,6MWp [16]



Figura 2.8 – Fachada de edifício de supermercado na Áustria coberta por painéis solares [15]



Figura 2.9 - Exemplos de instalação de painéis fotovoltaicos em residências: na cobertura e fixadas ao terreno [15]



Figura 2.10 - Projeto de sistemas de energia solar descentralizado na Alemanha idealizado pelo arquiteto Rolf Disch [15]



Figura 2.11 – Cobertura (43,8 kW) e janela (1,1 kW) com sistema fotovoltaico integrado ao vidro numa estação de comboio em Tokyo [15]



Figura 2.12 - Carro coberto com painéis solares de alto eficiência (Toyota's Prius PHV) [17]



Figura 2.13 - Sistema integrando módulos fotovoltaicos quem fazem sombra e protegem as culturas agrícolas [18]



Figura 2.14 - Sistema de cobertura com módulos fotovoltaicos, que permite produzir energia, e simultaneamente fazer sombreamento a zonas de piscicultura, estabilizando a temperatura da água em níveis adequados à vida dos peixes [19]



Figura 2.15 – Plataforma flutuante de painéis fotovoltaicos instalada em barragem no Brasil [20]

2.2. ESTRUTURAS DE AÇO ENFORMADO A FRIO

É inegável que objetivo do projetista vai além da verificação da segurança das estruturas, uma vez que a preocupação com o aspecto econômico do projeto é evidente, já que as empresas estão sempre a buscar pela solução ótima que utilize o mínimo possível de material e consequentemente, tenha o menor custo. Em vista disso, está a ser cada vez mais frequente a utilização dos perfis enformados a frio nas estruturas metálicas devido a elevada resistência atrelada ao peso reduzido.

Durante anos, a oferta de aço para construções metálicas era de apenas perfis de aço laminados a quente e perfis de chapa soldada, que por sua vez ainda dominam este cenário. O processo de fabrico dos perfis laminados a quente consiste no aquecimento do material a grandes temperaturas para posteriormente ser moldado por um trem de laminagem, já os de chapa soldada são obtidos através da junção por soldadura de chapas nas zonas de ligação [21].

Os perfis enformados a frio são fabricados através da dobragem de chapas de pequena espessura por meios mecânicos: laminagem a frio ou quinagem. Enquanto o primeiro método é bastante comum e pode ser automatizado em fábrica, o segundo é menos utilizado pois tem o comprimento da chapa e as configurações de secções limitados. A laminagem a frio consiste na passagem de chapas de aço sobre vários pares de rolos que comprimem e dobram até a forma pretendida e a quinagem é a prensagem das chapas contra negativos [21].

O custo final dos perfis está diretamente ligado ao processo de fabrico do mesmo, além do detalhamento da secção que se pretende ter, porém é fato que a laminagem a frio é mais econômica que a laminagem a quente [20].

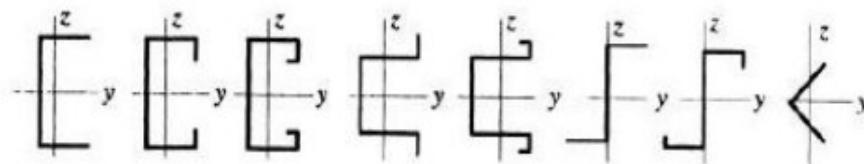


Figura 2.16 – Tipos de secções de perfis enformados a frio [23]

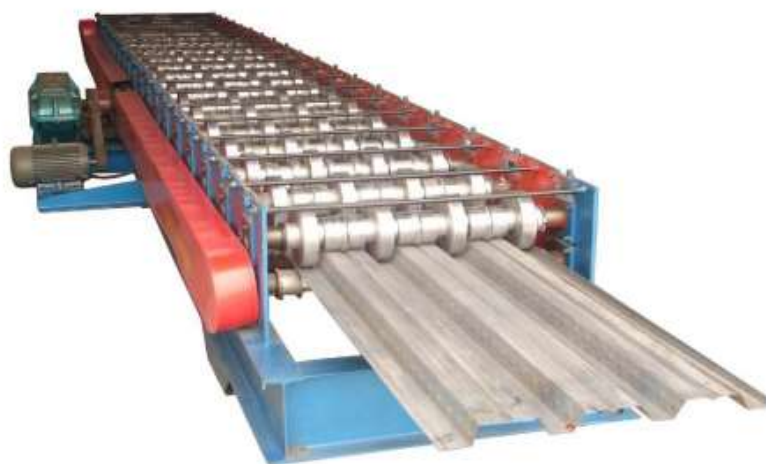


Figura 2.17 – Máquina de laminagem a frio (LM-688) [21]

A aplicação dos perfis de aço enformado a frio abrange a construção de edifícios, pontes, galpões de armazém, produtos de autoestradas, torres de transmissão, corpo de automóveis, além do caso estudado: estruturas de suporte de painéis fotovoltaicos. A sua aplicação diversa se dá devido ao conjunto de vantagens que esses perfis oferecem, como [22]:

- Elevada eficiência estrutural com ótima relação entre resistência elevada e peso reduzido;
- Grande versatilidade de fabrico, possibilitando a produção de uma gama variada de geometrias e dimensões com a espessura a variar normalmente de 0,4 à 6,35 milímetros.
- Há a possibilidade de produção de secções encaixáveis permitindo maior economia e facilidade na montagem;
- A fabricação em larga escala garante a qualidade dos elementos;
- O processo de fabrico em comparação aos perfis laminados a quente representa um custo muito inferior quando a produção envolve elementos para serem submetidos à cargas reduzidas;
- Os elementos são recicláveis e podem ser reaproveitados.

Por outro lado, os perfis enformados a frio também apresentam pontos fracos, nomeadamente:

- Baixa resistência ao fogo quando comparado com os perfis laminados a quente, por conta da maior esbelteza;
- Suscetíveis à corrosão e por isso se faz necessário a galvanização do aço;
- A instabilidade quanto aos fenômenos de encurvadura local é condicionante nesses perfis por causa da sua espessura reduzida.

A desvantagem que mais tem influência no presente trabalho é a última, uma vez que a análise e dimensionamento de estruturas compostas por esses perfis leves e esbeltos ficam condicionados aos fenômenos de instabilidade local e global, fato que não é comum ocorrer nos outros tipos de perfis. Além disso, possuem grande deformabilidade à torção devido à baixa inércia de torção das secções de paredes finas e ao fato do centro de gravidade não corresponder com o centro de corte [22].

Diante aos valores reduzidos de espessura, é frequente que as secções de paredes finas sejam de Classe 4 segundo o EC3 (1-1), com isso, o fenômeno de encurvadura local se torna ainda mais importante. Vale comentar que a complexidade envolvida na análise dos perfis enformados a frio fez com que a terceira parte do Eurocódigo 3 tenha sido criada, tal documento indica os procedimentos a serem seguidos no dimensionamento específico desse tipo de perfil metálico.

Sendo assim, antes de passar para a verificação de segurança a secção frequentemente de classe 4 deve ter a sua secção reduzida pelo método das secções efetivas que fará com que todos os seus parâmetros de resistência também reduzam. Todo o processo de análise e verificação dos perfis enformados a frio é detalhado no item 4.4 deste documento.

2.3. ESTRUTURAS FOTOVOLTAICAS FIXADAS AO SOLO

2.3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ESTRUTURA

Ao se tratar em específico das estruturas de suporte de painéis fotovoltaicos fixadas ao solo, há a possibilidade de selecionar diferentes configurações tanto no âmbito da disposição dos painéis quanto na quantidade de pilares em cada apoio.

A disposição dos painéis fotovoltaicos pode ser feita na vertical ou na horizontal, além da quantidade de linhas e colunas de painéis também poder variar. Esse *layout* da estrutura solar normalmente é traduzida por três dígitos, no qual o primeiro refere-se ao número de linhas de painéis solares, o segundo a posição vertical (V) ou horizontal (H) e o terceiro o número de colunas de painéis. Para exemplificar, a Figura 2.18 a seguir expõe alguns desses *layouts*.

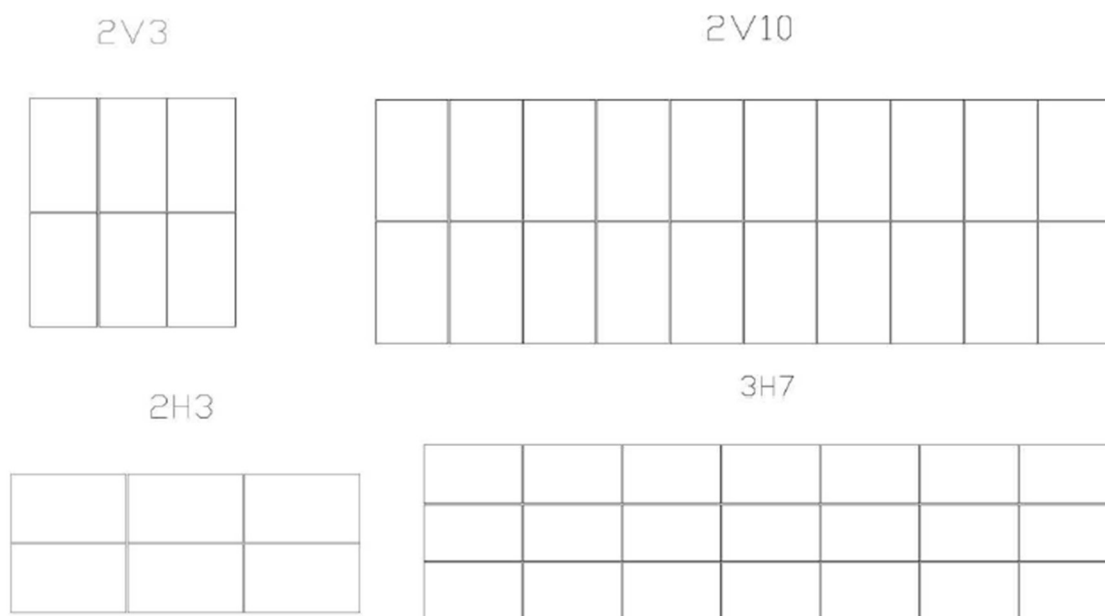


Figura 2.18 – Exemplos de *layouts* de estruturas solares com diferentes disposições dos painéis fotovoltaicos: na vertical em cima (2V3 e 2V10) e na horizontal embaixo (2H3 e 3H7)

Em geral, existem dois tipos de pórticos possíveis: mono-poste e bi-poste. Enquanto o primeiro é caracterizado por possuir um pilar por apoio, o segundo diz respeito a um pórtico composto por dois pilares em cada apoio. Normalmente, o *layout* escolhido para a mesa fotovoltaica influencia no tipo de pórtico a adotar, uma vez que essa escolha define a largura da mesa e quanto maior esse parâmetro mais conveniente é ser adotada a solução bi-poste. A solução bi-poste possibilita a distribuição mais uniforme dos esforços transmitidos ao solo, mas pode resultar também numa estrutura mais pesada. Nas Figuras 2.19 e 2.20 é possível verificar as duas configurações possíveis de pórticos através de desenhos da vista lateral de estruturas solares concedidos pela Voltalia.

Para além das características citadas, outro parâmetro das estruturas solares que pode variar é a altura mínima do painel fotovoltaico ao solo, representada por 500 milímetros na Figura 2.19 a título de exemplo. Essa altura mínima influencia na definição da distância horizontal entre linhas de mesas fotovoltaicas, a fim de evitar sombras nos painéis solares de linhas consecutivas. Ademais, também é importante para evitar sombras causadas por eventuais vegetações do local de implantação ou até para evitar a obstrução dos raios solares nos painéis devido ao acúmulo de neve em zonas mais frias.

Segundo o acervo de projetos da Voltalia, essa altura mínima geralmente denominada de H_{min} varia de 400 a 800 milímetros. É de fácil compreensão que quanto maior o H_{min} maior é o pilar e então maior também o braço da força resultante na mesa fotovoltaica em relação ao solo, aumentando dessa forma o momento basal dos pilares. Portanto, é um parâmetro que pode afetar o peso final da estrutura.

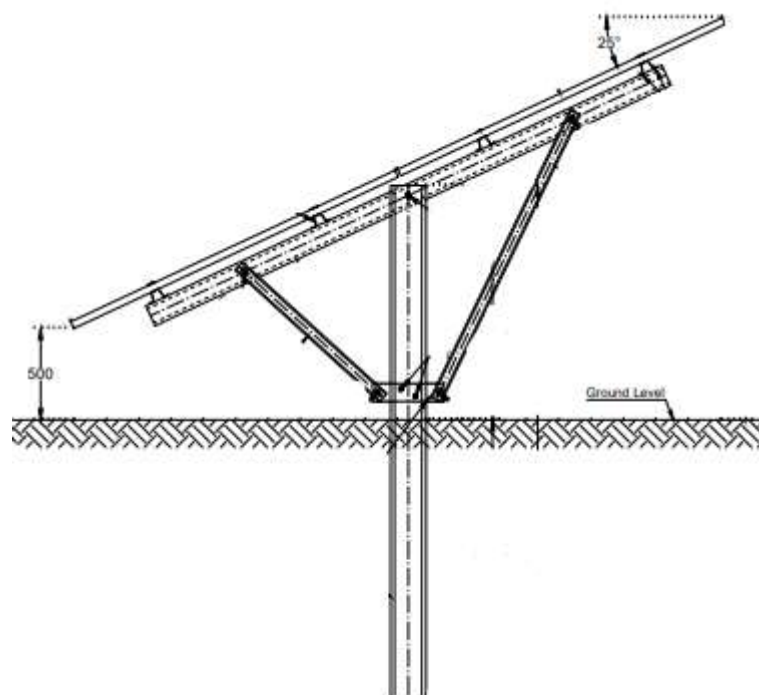


Figura 2.19 – Exemplo de configuração de pórtico do tipo monoposte (imagem fornecida pela Voltalia)

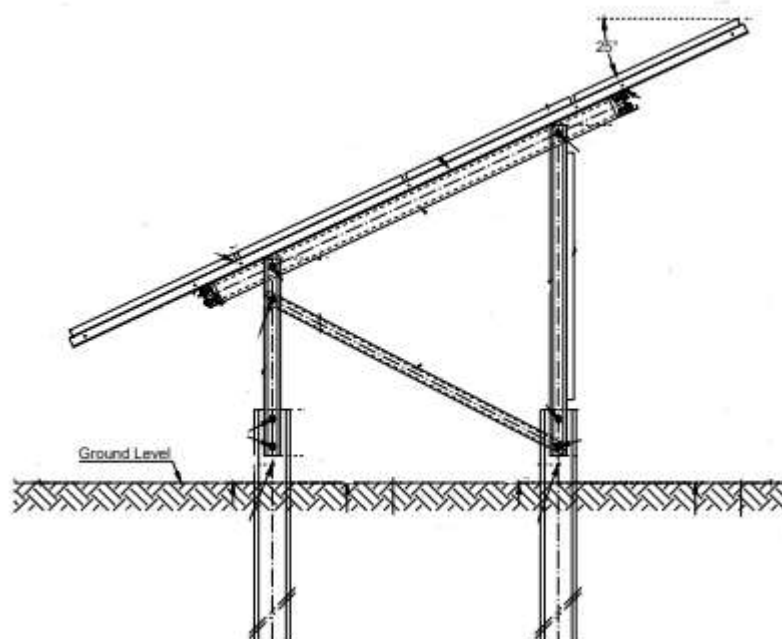


Figura 2.20 – Exemplo de configuração de pórtico do tipo biposte (imagem fornecida pela Voltalia)

A fixação dos painéis fotovoltaicos nas madres é normalmente feita através de calcadores, os quais consistem em pequenas peças de alumínio em conjunto com um parafuso e mais uma peça metálica que funciona como batente. Os calcadores que ficam entre dois painéis solares são chamados de centrais e devem ter suas dimensões levadas em conta no dimensionamento do espaçamentos entre painéis. Além dos calcadores centrais, os painéis também são fixados no bordo quando se encontram nas extremidades da mesa e são denominados de calcadores laterais. A Figura 2.21 a seguir mostra os dois tipos de calcadores citados.



Figura 2.21 – Calcador lateral à esquerda e calcador central à direita (imagem fornecida pela Voltaia)

Para além dos aspetos já referidos nesta sessão, outro ponto relevante que pode variar de acordo com a localização de implantação da estrutura solar é o tipo de fundação a ser adoptada, com ou sem recurso de betão. Primeiramente, a fim de realizar a seleção da solução de fundação a adoptar, é necessário que ensaios de resistência do solo sejam feitos no local. Quando o solo permite, a solução geralmente seleccionada é a de estaca cravada com bate-estacas, onde a estaca é o próprio perfil do pilar, uma vez que é a solução mais barata. Ao utilizar a opção de estaca cravada, é importante ter atenção à espessura conferida ao pilar, já que perfis pouco espessos não resistem ao processo de cravação ao solo.

Outra alternativa possível sem utilizar o betão é com parafusos de enterramento em que o perfil do pilar é aparafusado a um tubo circular metálico com uma hélice helicoidal na ponta que é cravado ao solo com uma máquina específica que “aparafusa” o tubo ao solo na profundidade requerida. Essa solução é ilustrada na Figura 2.23, é ideal para solos mais fracos e é mais eficaz sob o efeito de cargas de arrancamento na estrutura, porém é uma solução cara e pouco utilizada.

Entre as soluções que utilizam o recurso do betão estão a de pré-furo e a de bloco de betão armado. O pré-furo consiste na abertura de um furo ao solo onde o pilar é inserido e depois o furo é preenchido com betão. Já os blocos de betão armado trabalham como sapatas e os pilares são fixados por meio de uma flange soldada ao perfil que são aderidos ao bloco por meio de chumbadouros, essa ligação pode ser observada em detalhe na Figura 2.22.

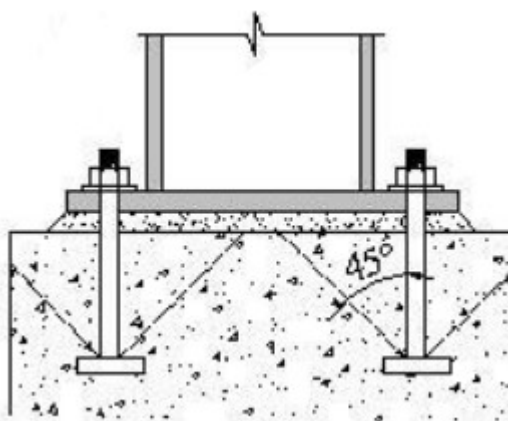


Figura 2.22 – Ligação do perfil metálico com o bloco de betão através de chumbadouros [23]



Figura 2.23 – Exemplo de parafusos de enterramento com apenas uma hélice [24]

2.3.2. AÇÕES SOLICITANTES DA ESTRUTURA

O ponto de partida do dimensionamento de qualquer estrutura é definido pela determinação das ações em que estará submetida ao longo de sua vida útil. O Eurocódigo 1 classifica tais ações de acordo com a sua variação temporal, essas classificações são nomeadas como [25]:

- Permanentes (G): ação com elevada probabilidade de atuar durante um período de referência e cuja variação de intensidade no tempo é desprezável ou é sempre no mesmo sentido (monotónica) até atingir um valor limite. (Exemplo: peso próprio da estrutura)
- Variáveis (Q): cuja variação de intensidade no tempo não é desprezável nem monotónica. (Exemplos: ação da neve e do vento)
- Acidente (A): ação normalmente de curta duração mas com intensidade significativa, com pequena probabilidade de ocorrência numa dada estrutura durante o tempo de vida útil do projeto. (Exemplos: incêndios e sismos)

O valor característico F_k é o principal valor representativo de uma ação, o qual é escolhido a modo a corresponder a uma dada probabilidade de não ser excedido no sentido desfavorável, durante um período da vida útil da estrutura [25].

O dimensionamento das estruturas solares fixadas ao solo pode variar de projeto para projeto a depender da localização de implantação e dos critérios do projetista. Para o presente estudo, a seleção das ações

solicitantes da estrutura solar foi feita baseada na observação de um padrão apresentado nos projetos da Voltalia. Nos itens a seguir são apresentadas as ações permanentes assim como as variáveis, nomeadamente a ação do vento, da neve, da variação de temperatura e ação sísmica.

2.3.2.1. Ações Permanentes

Como descrito anteriormente, as cargas permanentes consideradas serão o peso próprio da estrutura e o peso próprio dos painéis fotovoltaicos. O peso próprio da estrutura é calculado de acordo com o peso específico do material utilizado (valor retirado do Eurocódigo 1 (1-1) [26]) e com o peso total da estrutura, tal processo geralmente é feito de forma automática pelo programa de cálculo com o *input* apenas do peso específico do material.

Já o peso próprio dos painéis solares é introduzido manualmente e é traduzido na estrutura como uma carga local distribuída aplicada ortogonalmente em todas as madres. A quantificação de tal carga é feita por meio do peso unitário fornecido nas especificações do modelo de painel fotovoltaico utilizado.

2.3.2.2. Ação do Vento

A ação do vento sobre os painéis solares é a mais condicionante das cargas envolvidas no dimensionamento das estruturas de suporte do sistema fotovoltaico. Acima de tudo, as cargas de sucção do vento são as mais relevantes devido à leveza dessas estruturas de aço enformado a frio. Devido a sua importância e complexidade, a carga do vento será abordada de forma mais detalhada no item 2.4 deste capítulo.

2.3.2.3. Ação da Neve

A ação da neve é caracterizada como uma ação variável fixa segundo o EC1 (1-3) [27]. O valor característico da carga da neve S_k pode ser determinada tanto pelo Anexo C do Eurocódigo ou pelo Anexo Nacional.

Segundo o Anexo Nacional, o S_k pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$S_k = C_z [1 + (H/500)^2] \quad [27] \quad (4.11)$$

em que:

- C_z é o coeficiente dependente da zona (0,3 para Z_1 ; 0,2 para Z_2 e 0,1 para Z_3);
- H é a altitude do local em metros.

Por outro lado, de acordo com o Anexo C do Eurocódigo, o valor característico S_k é calculado para uma área mais abrangente da Península Ibérica dividida em três zonas, em que Portugal faz parte da zona A segundo a figura C.5 do anexo.

$$S_k = (0,190Z - 0,095) \left[1 + \left(\frac{A}{524} \right)^2 \right] \quad [27] \quad (4.12)$$

em que:

- Z é o valor correspondente à zona (0,1 para Zona 1; 0,3 para Zona 2 e 0,7 para Zona 3);
- A é a altitude do local em metros.

A carga da neve é então determinada através da seguinte equação:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad [27] \quad (4.13)$$

em que:

- μ_i é o coeficiente de forma da cobertura;
- C_e é o coeficiente de exposição (valor recomendado de 1,0 para topografia normal);
- C_t é o coeficiente térmico (valor recomendado de 1,00 para coberturas em que a fusão da neve devida ao fluxo térmico pode ser desprezada).

Uma vez que não há uma regra específica para a quantificação da carga da neve em estruturas solares, a mesa fotovoltaica é tratada como uma cobertura de uma vertente, abordado no item 5.3.2 do EC1 (1-3) como pode ser exemplificado pela Figura 2.24 retirada da norma.

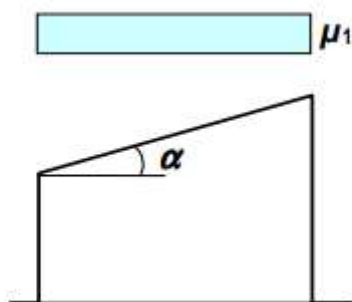


Figura 2.24 – Coeficiente de forma para a carga da neve – cobertura de uma vertente [27]

Uma vez que os valores de tilt correntes estão dentro do intervalo de 0° a 30° , essa é a gama de inclinações adoptada para a determinação do coeficiente de forma μ_1 pode ser retirado do quadro 5.2 do EC1 (1-3) representado na Figura 2.25. Portanto o coeficiente de forma adoptado para a quantificação da carga da neve possui o valor de 0,8.

Angulo de inclinação da vertente α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_i	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0

Figura 2.25 – Coeficiente de forma μ_1 para a carga de neve de acordo com a inclinação α da cobertura [27]

2.3.2.4. Ação da Temperatura

A variação da temperatura não é incluída nas ações atuantes em estruturas solares uma vez que esta possui um mecanismo de liberação de tensão com furos de tamanho apropriado ou superdimensionados.

4.2.2.5. Ação Sísmica

O peso reduzido dos painéis fotovoltaicos e da estrutura de aço enformado a frio faz com que as cargas sísmicas não sejam relevantes quando comparadas às cargas do vento e da neve. Por isso, a seguir a

maioria dos projetos apresentados pela Voltalia, optou-se por não considerar o sismo no dimensionamento da estrutura solar.

2.4. CARACTERIZAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

2.4.1. ASPETOS GERAIS

Apesar de algumas normas já apresentarem coeficientes específicos para painéis solares instalados em coberturas de edifícios, as mesas solares fixadas ao solo ainda sofrem com a falta de uma metodologia padronizada de caracterização do vento. Por esses motivos, tal assunto é de grande relevância no âmbito do dimensionamento das estruturas de suporte de painéis fotovoltaicos.

Sendo assim, para a caracterização da carga do vento, em ordem decrescente de escala do projeto, normalmente é feito um dos três procedimentos: ensaios em túnel de vento, elaboração de *softwares* próprios ou interpretação do código vigente. Claramente a primeira opção é a que proporciona o resultado mais fidedigno à realidade, o segundo normalmente é baseado em diversos experimentos que reproduzem os resultados de um caso para outros em outras condições.

Já a terceira opção, a da interpretação do código é a que normalmente é seguida no dimensionamento dos parques solares. No caso do Eurocódigo, geralmente a mesa de painéis fotovoltaicos é tratada como uma cobertura inclinada de uma vertente por conta da semelhança entre as geometrias das duas estruturas. Dessa forma, é possível obter por meio da norma os coeficientes de forma relativos à essa geometria a fim de quantificar a força resultante do vento na estrutura. O fato que gera maior contraste entre a caracterização feita por diferentes projetistas é a disposição das cargas na estrutura solar, podendo levar ao uso excessivo de aço ou até ao subdimensionamento.

Em âmbito científico, segundo o artigo publicado em 2019, A. Lopez conclui sobre a influência da inclinação do painel solar nos valores de coeficientes de pressão tanto em pressão descendente quanto em ascendente. Além disso, constata sobre as direções críticas do vento que são as ortogonais (0° e 180°) com o aumento de média de 60% com o ângulo a variar de 15° a 23° [28].

Por outro lado, os valores máximos de coeficientes de pressão foram localizados nos limites dos painéis em uma área muito pequena para os ataques de vento nas direções de 45° e 135° . Esses valores máximos indicam o risco de danos locais nessas regiões descritas e devem ser levados em consideração [28].

Na Figura 2.26 é possível observar o modelo do protótipo realizado no estudo durante o teste em túnel de vento e também a descrição das direções do vento levadas em conta no ensaio. Os coeficientes de pressão local resultantes do estudo são expostos na Figura 2.27, onde podem ser analisados os valores de pico concentrados em pequenas áreas nas direções de 45° e 135° , além da evolução do coeficiente nas duas direções principais.

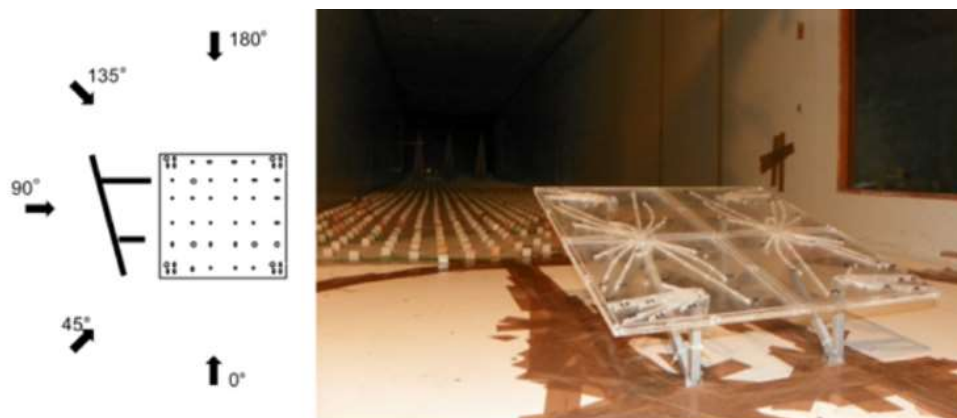


Figura 2.26 – Protótipo utilizado no ensaio em túnel de vento [28]

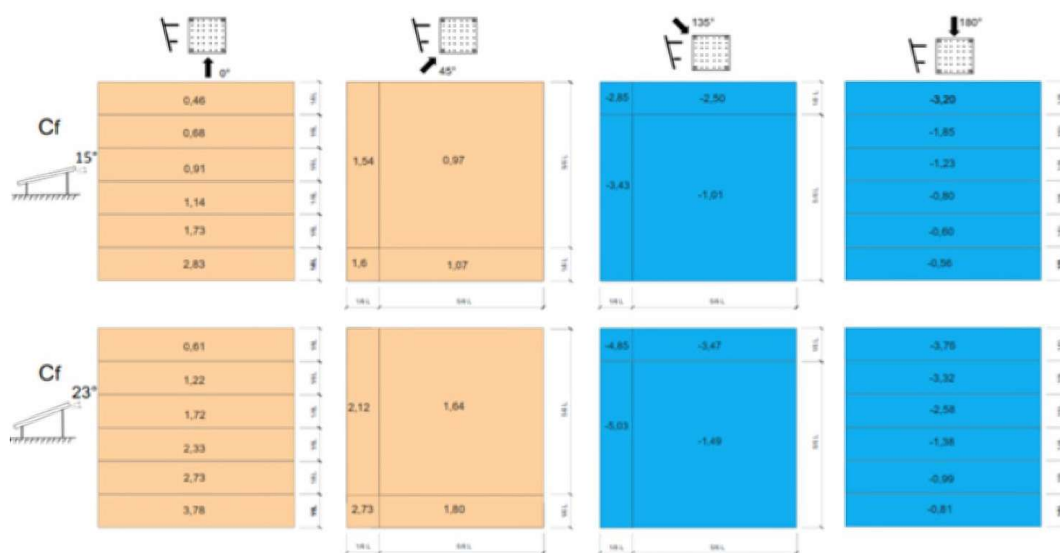


Figura 2.27 – Coeficientes de pressão local para as direções de vento a 0°, 45°, 135° e 180° [28]

2.4.2. AÇÃO DO VENTO SEGUNDO O EUROCÓDIGO

Como já citado, a partir da ausência de uma sessão do Eurocódigo que caracterize a ação do vento especificamente para estruturas de suporte de painéis fotovoltaicos fixados ao solo, é frequente que os projetos europeus apresentem diferentes abordagens. Tal situação faz com que não haja uma padronização do dimensionamento da estrutura em questão, assim como existe no de edifícios.

A seguir será abordada a metodologia seguida no presente estudo para a caracterização do vento segundo o EC1 (1-4) [29]:

Primeiramente, a mesa de painéis fotovoltaicos é considerada como uma cobertura isolada inclinada, ou seja, a cobertura de uma construção que não tem paredes permanentes, como é o caso, por exemplo, em estações de serviço e armazéns agrícolas abertos, como é descrito no item 7.3 do documento na edição de 2010.

A iniciar o cálculo, para determinação da pressão dinâmica de pico $q_p(z)$, é preciso ter a localização em que a estrutura é implantada para chegar ao valor básico de referência do vento $v_{b,0}$.

A partir do valor básico $v_{b,0}$ é calculado o valor de referência do vento, que leva em conta a direção do vento e a época do ano a uma altura de 10 metros acima da superfície de um terreno de categoria II e é calculado da seguinte forma:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad [29] (2.1)$$

em que:

- c_{dir} é o coeficiente de direção (valor recomendado de 1,0);
- c_{season} é o coeficiente de sazão (valor recomendado de 1,0).

Segundo a norma, a velocidade média do vento, referida a períodos de 10 minutos, com a probabilidade anual p de ser excedida é determinada multiplicando o valor de referência da velocidade do vento v_b pelo coeficiente de probabilidade c_{prob} calculado segundo a seguinte expressão:

$$c_{prob} = \left(\frac{1 - K \cdot \ln(-\ln(1 - p))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n \quad [29] (2.2)$$

em que:

- K é o parâmetro de forma, função do coeficiente de variação da distribuição de valores extremos ($K = 0,11$ segundo o Anexo Nacional; $K = 0,2$ segundo o Eurocódigo);
- n é o expoente ($n = 1$ segundo o Anexo Nacional; $n = 0,5$ segundo o Eurocódigo);
- p é dado pelo inverso do período de vida útil da estrutura, que nesse caso é de 25 anos.

A velocidade média do vento a uma altura z acima do solo, $v_m(z)$ depende da rugosidade do terreno, da orografia e do valor de referência da velocidade do vento v_b , e deverá ser determinada através da expressão a seguir:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad [29] (2.3)$$

em que:

- $c_r(z)$ é o coeficiente de rugosidade definido em (3.4);
- $c_o(z)$ é o coeficiente de orografia (considerado igual a 1,0 salvo especificação).

Para o cálculo do coeficiente de rugosidade é necessário determinar antes a categoria do terreno em que a estrutura está implantada de acordo com o item A.1 do EC1 (1-4). Dessa forma, é possível calcular o $c_r(z)$ através da equação:

$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{min}) & \text{para } z \leq z_{min} \end{aligned} \quad [29] (2.4)$$

em que

- Z_0 é o comprimento de rugosidade (Figura 2.28 e Figura 2.29);
- Z_{min} é a altura mínima definida por categoria de terreno (Figura 2.28 e Figura 2.29);

- Z_{max} é a altura máxima considerada 200 metros;
- Z é a altura da estrutura, ou seja, do ponto mais alto dos painéis ao solo;
- k_r é o coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade Z_0 calculado através de:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$$

[29] (2.5)

em que:

- $Z_{0,II} = 0,05$ m (categoria de terreno II);

Categoria de terreno	z_0 [m]	z_{min} [m]
0 Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar	0,003	1
I Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação negligenciável e livre de obstáculos	0,01	1
II Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	2
III Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	5
IV Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	10
NOTA: As categorias de terreno estão ilustradas em A.1.		

Figura 2.28 – Categorias de terreno e respetivos parâmetros segundo o Eurocódigo (Quadro 4.1) [29]

Categoria de terreno	z_0 [m]	z_{min} [m]
I Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	1
II Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	3
III Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	15
NOTA 1: As categorias de terreno II, III e IV estão ilustradas em A.1.		
NOTA 2: O coeficiente de rugosidade, $c_f(z)$, é ilustrado na Figura NA.1.		

Figura 2.29 – Categorias de terreno e respetivos parâmetros segundo o Anexo Nacional (Quadro NA-4.1) [29]

Após concluir o cálculo da velocidade média do vento, é necessário determinar a intensidade de turbulência à altura Z que é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min})$$
[29] (2.6)

em que:

- k_I é o coeficiente de turbulência (valor recomendado de $k_I = 1$);
- σ_v é o desvio padrão da turbulência dado por:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I$$
[29] (2.7)

Finalmente, é possível realizar o cálculo da pressão dinâmica de pico $q_p(z)$, que resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração de velocidade de vento.

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)$$
[29] (2.8)

em que:

- ρ é a massa volúmica do ar (valor recomendado de $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$).

Referente à sessão 7.3 da norma, a estrutura é classificada como cobertura isolada vazia (sem obstrução, $\varphi = 0$), como é representado na Figura 2.30 adaptada para o caso em questão.

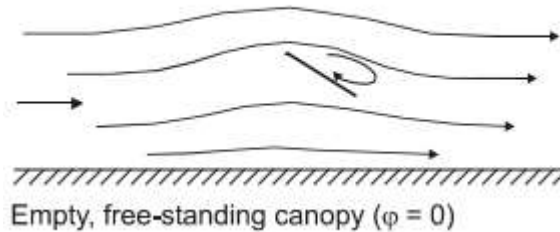


Figura 2.30 - Representação de uma cobertura isolada vazia adaptada para o caso de uma vertente [29]

O código instrui que uma cobertura isolada de uma vertente deve resistir aos casos de carga em que o centro de pressão está posicionado a uma distância $d/4$ do bordo de barlavento (d = dimensão na direção do vento), como é representado na Figura 2.31. Para além disso, afirma que o coeficiente de força global C_f traduz a força resultante e o coeficiente de pressão resultante $C_{p,net}$ representa a pressão máxima para todas as direções do vento, este último deve ser utilizado para o cálculo dos elementos de cobertura e ligações. Tais coeficientes citados estão dispostos no Quadro 7.6 do EC1 (1-4) e está representado na Figura 2.32, a inclinação da cobertura α é considerada igual ao valor determinado para o tilt, ou seja, para a inclinação dos painéis fotovoltaicos na mesa.

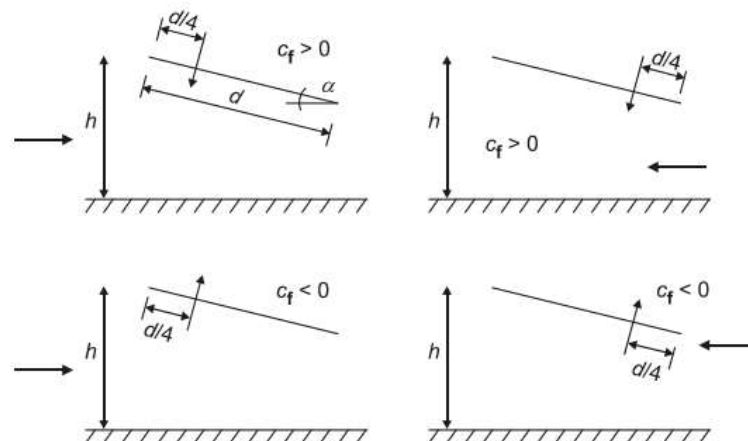


Figura 2.31 - Localização do centro de força para coberturas isoladas de uma vertente [29]

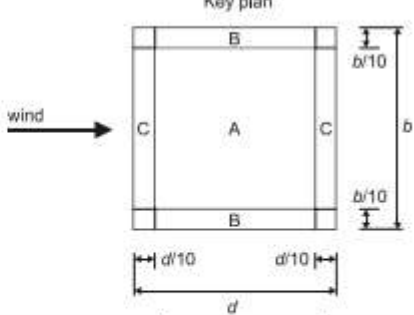
			Coeficientes de pressão resultante $c_{p,net}$ Key plan 		
Inclinação da cobertura α	Obstrução φ	Coeficientes de força global c_f	Zona A	Zona B	Zona C
0°	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,2 - 0,5 - 1,3	+ 0,5 + 0,6 - 1,5	+ 1,8 - 1,3 - 1,8	+ 1,1 - 1,4 - 2,2
5°	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,4 - 0,7 - 1,4	+ 0,8 - 1,1 - 1,6	+ 2,1 - 1,7 - 2,2	+ 1,3 - 1,8 - 2,5
10°	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,5 - 0,9 - 1,4	+ 1,2 - 1,5 - 1,6	+ 2,4 - 2,0 - 2,6	+ 1,6 - 2,1 - 2,7
15°	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,7 - 1,1 - 1,4	+ 1,4 - 1,8 - 1,6	+ 2,7 - 2,4 - 2,9	+ 1,8 - 2,5 - 3,0
20°	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,8 - 1,3 - 1,4	+ 1,7 - 2,2 - 1,6	+ 2,9 - 2,8 - 2,9	+ 2,1 - 2,9 - 3,0
25°	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 1,0 - 1,6 - 1,4	+ 2,0 - 2,6 - 1,5	+ 3,1 - 3,2 - 2,5	+ 2,3 - 3,2 - 2,8
30°	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 1,2 - 1,8 - 1,4	+ 2,2 - 3,0 - 1,5	+ 3,2 - 3,8 - 2,2	+ 2,4 - 3,6 - 2,7
NOTA: O sinal + indica uma acção resultante do vento com sentido descendente. O sinal - indica uma acção resultante do vento com sentido ascendente.					

Figura 2.32 - Valores de $C_{p,net}$ e C_f para coberturas isoladas de uma vertente [29]

Com o intuito de ter melhor visualização da estrutura em questão e seus elementos estruturais, a Figura 2.33 apresenta um exemplo de estrutura de layout 2V3 monoposte com a identificação de seus elementos, nomeadamente: madre, viga, escora e pilar.

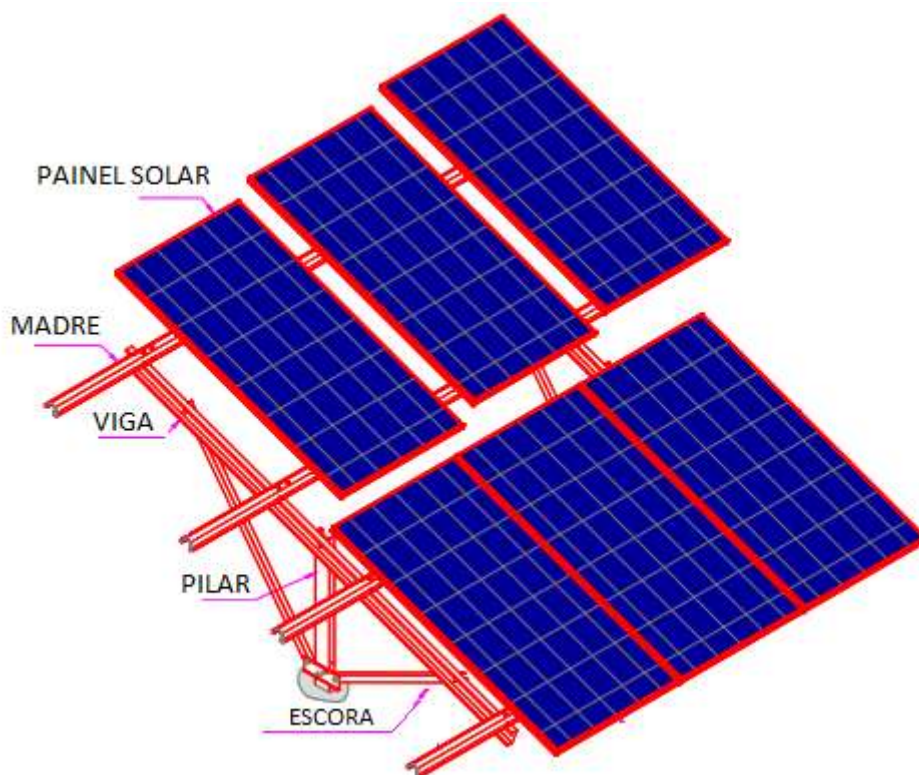


Figura 2.33 – Exemplo de estrutura solar com os elementos estruturais assinalados (imagem fornecida pela Voltalia alterada)

Como em uma cobertura, a mesa de painéis fotovoltaicos também possui madres as quais a principal função está em receber diretamente a sobrecarga e distribuir aos demais elementos da infraestrutura. Dessa forma, as madres são interpretados como elementos de cobertura, e por isso são dimensionadas com o coeficiente de pressão resultante $C_{p,net}$, como designa a norma. Dessa forma, o dimensionamento das madres deve ser feito em um modelo a parte submetido às cargas resultantes do $C_{p,net}$ apenas.

Assim sendo, os demais elementos componentes da infraestrutura, nomeadamente as vigas, escoras e pilares, são dimensionados a partir da utilização do coeficiente de força global C_f para as duas direções principais de coberturas isoladas: as ortogonais. Estas direções são denominadas neste trabalho como 0° e 180° , ou seja, a direção do vento perpendicular ao comprimento longitudinal da mesa em sentido à parte frontal (0°) como mostra no lado direito da Figura 2.31 e em sentido à parte posterior (180°) como está do lado esquerdo da mesma figura.

Com a pressão dinâmica de pico e os coeficientes de cobertura isolada de uma vertente determinados, finalmente é possível calcular a pressão em exercida pelo vento para cada modelo:

- Modelo 1: dimensionamento das madres

$$w = qp(z) \cdot C_{p,net} \quad (2.9)$$

- Modelo 2: dimensionamento das vigas, escoras e pilares

$$w = qp(z) \cdot C_f \quad (2.10)$$

A disposição das cargas distribuídas nas madres no modelo 1 deve seguir o que é descrito na imagem da planta da cobertura disposta na Figura 2.32, a considerar as dimensões da mesa (b = comprimento; d = largura). As zonas A, B e C descritas na norma são então assinaladas nas madres da estrutura solar da seguinte maneira:

- Zona A: todas as madres internas
- Zona B: todas as madres externas de comprimento $\leq b/10$
- Zona C: na primeira e última madres internas

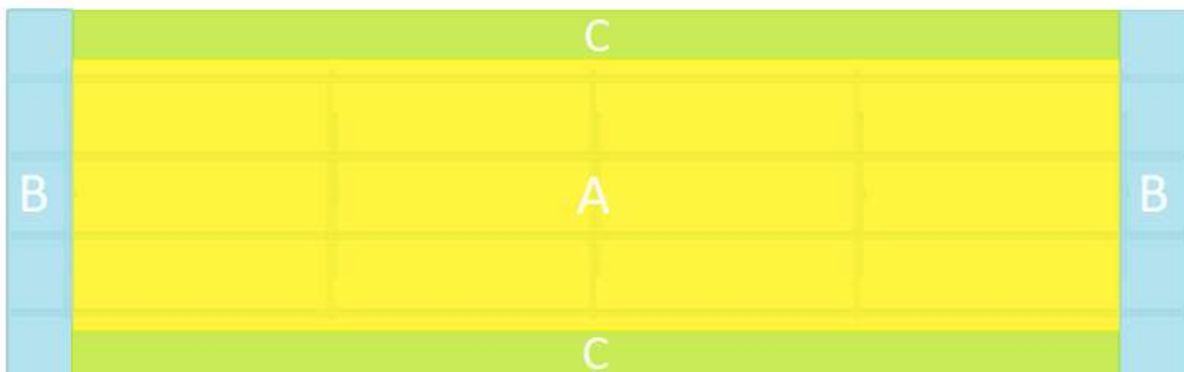


Figura 2.34 – Vista superior de uma estrutura solar com as áreas A, B e C assinaladas de acordo com a imagem em planta da cobertura de uma vertente do Quadro 7.6 do EC1 (1-4)

A partir do valor da carga de superfície de cada zona é possível realizar a quantificação das cargas lineares de pressão e sucção do vento em parte das madres como é possível observar nas Figuras 2.35 e 2.36 a seguir.

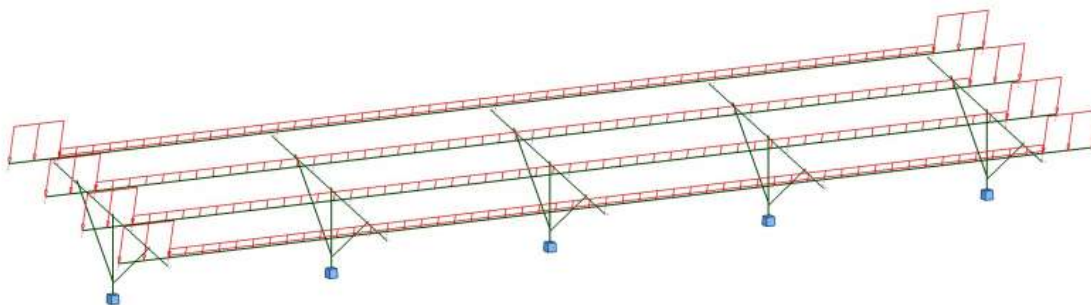


Figura 2.35 – Disposição das cargas de pressão do modelo 1 (dimensionamento das madres com $C_{p,net}$)

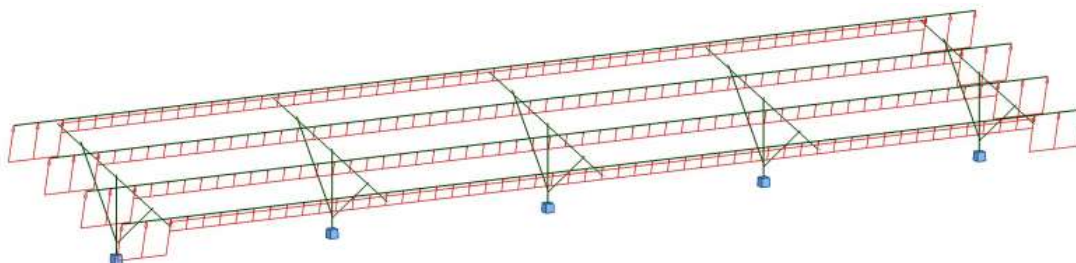


Figura 2.36 – Disposição das cargas de sucção do modelo 1 (dimensionamento das madres com $C_{p,net}$)

Já o modelo 2, o qual utiliza os coeficientes de força C_f no cálculo da ação do vento, tem a caracterização das cargas dividida em cargas distribuídas e cargas nodais. Primeiramente, deve ser calculada a força total do vento F_w através da pressão multiplicada pela área da mesa, depois essa força é distribuída ao longo da largura da mesa (d) gerando a carga q_w .

Por meio de um programa de cálculo estrutural simples, a viga pode ser representada por uma barra simplesmente apoiada com os apoios espaçados com o valor de espaçamento entre as madres. Ao ser submetida a carga q_w , as reações nesses apoios resultam na parcela de carga que cada madre recebe. Finalmente, o valor em kN dessas reações é dividido pelo comprimento das madres (b) e se tem então a carga distribuída do modelo 2.

Como já citado, a estrutura deve resistir aos casos de carga em que o centro de pressão está posicionado a uma distância $d/4$ do bordo de barlavento, ou seja, deve resistir ao momento de uma força concentrada a um quarto de d em relação ao centro de gravidade da viga. Por isso, com a carga já calculada F_w determina-se o momento total em que a mesa deveria resistir e ao considerar o momento gerado pelas cargas distribuídas é possível ter a diferença entre esses dois valores que será a parcela de momento que falta impor na estrutura.

Esta parcela de momento que falta ser imposta é gerada por um binário de forças nodais aplicadas perpendicularmente à madre no ponto afastado $d/4$ do centro de gravidade da viga, tal ponto coincide com o ponto de intersecção da escora com a viga no caso da estrutura de exemplo. Enquanto as vigas internas recebem uma parcela de $[1/(n-1)]$ do momento, sendo n o número de pilares, as vigas externas recebem metade desse valor.

Além disso, a fim de representar as duas direções do vento ortogonais aos painéis, são elaborados dois casos de carga tanto para pressão quanto para sucção, onde o sentido do momento gerado pelo binário se diferencia entre eles. Na direção de pressão a 0° e de sucção a 180° , o binário gera um momento em sentido horário, enquanto na direção de pressão a 180° e na de sucção a 0° gera em sentido anti-horário.

Portanto, as cargas distribuídas variam apenas com o *tilt* da estrutura, enquanto as nodais variam também com o número de pilares que a estrutura possui. À título de exemplo, são apresentadas algumas figuras que representam a disposição das cargas na estrutura do modelo 2.

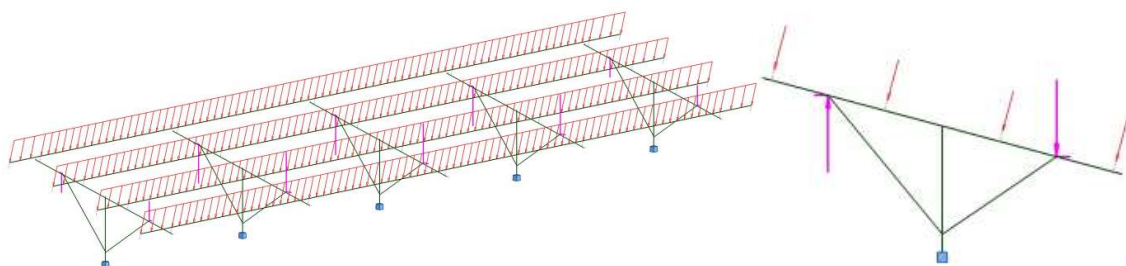


Figura 2.37 – Disposição da carga de pressão do vento na direção 0° (modelo 2)

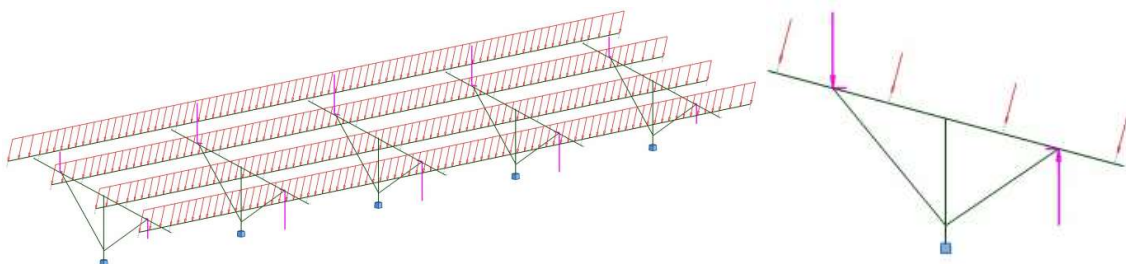


Figura 2.38 – Disposição da carga de pressão do vento na direção 180° (modelo 2)

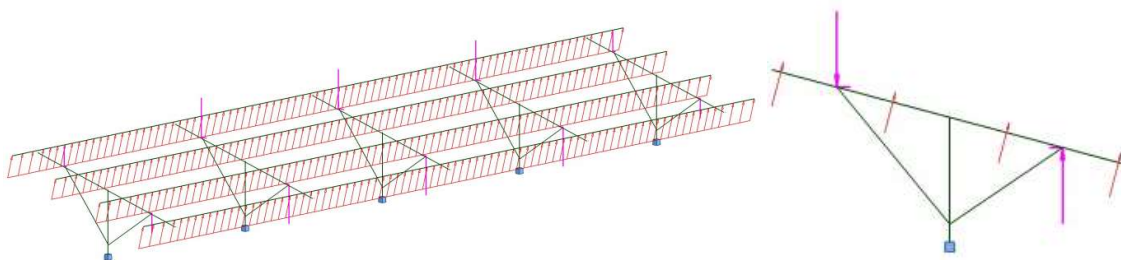


Figura 2.39 – Disposição da carga de sucção do vento na direção 0° (modelo 2)

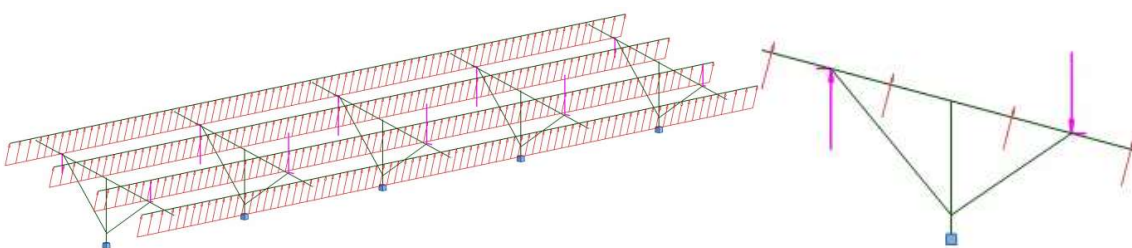


Figura 2.40 – Disposição da carga de sucção do vento na direção 180° (modelo 2)

E assim fica concluída a caracterização da ação do vento segundo o Eurocódigo segundo a interpretação da autora em conjunto com a orientadora deste documento.

Em termos comparativos os coeficientes de pressão do Eurocódigo com os coeficientes locais obtidos na pesquisa de A. López, considera-se os seguintes parâmetros: vento em direção ortogonal (0° e 180°) na zona da primeira borda que recebe o vento num painel de inclinação de 15° . Os coeficientes retirados de cada sítios são os seguintes:

- Pressão (descendente): 1,8 (EC – Zona C) e 2,83 (A. López – 0°)
- Sucção (ascendente): 3 (EC – Zona C) e 3,20 (A. López – 180°)

Dessa forma, já é possível observar a disparidade entre a caracterização do vento numa estrutura de suporte de painéis fotovoltaicos a partir da interpretação do Eurocódigo e a partir de coeficientes gerados a partir de um ensaio de túnel de vento. Nesse caso, a estrutura pela norma europeia estaria subdimensionada em termos de danos locais principalmente pela pressão do vento que apresenta maior diferença de valor do que a sucção.

2.4.3. AÇÃO DO VENTO SEGUNDO CÓDIGO O AMERICANO

Em 2015, engenheiros estruturais responsáveis pelo cálculo das cargas eólicas em projetos solares de grande escala apresentaram na convenção da *Structural Engineers Association of California* (SEAOC) resultados de pesquisas que comprovam a ineficácia dos coeficientes de cobertura inclinada presentes no código americano. A justificativa levantada pelos engenheiros foi o facto de que cargas dinâmicas são tão importantes quanto as estáticas [30].

A constatação foi baseada em testes em túnel de vento com vários painéis solares montados no solo quem demonstraram repetidamente efeitos de borda significativos, o mais comum deles é a liberação de vórtices. Conforme o vento encontra a primeira fileira de painéis antes de atingir a matriz, ele estabelece um padrão de fluxo que cria pressões alternadamente altas e baixas, o efeito dessa liberação de vórtice

de primeira linha é gerar cargas dinâmicas que flutuam em uma frequência específica. Essa frequência está relacionada ao ângulo de inclinação do módulo, o tamanho e a forma dos sistemas de mesas e a velocidade do vento [30].

Acontece que a energia contida nesses vórtices flutuantes costuma se concentrar perto das frequências naturais das próprias estruturas solares. Quando isso acontece, há o grande risco do vento e os vórtices introduzirem energia no painel solar e criarem cargas dinâmicas que rapidamente sobrecarregam o sistema, causando uma falha catastrófica [30].

Dessa forma, foi concluído que quanto mais leve a estrutura, mais susceptível elas serão às forças dinâmicas do vento. Nesse sentido, a melhor abordagem seria conduzir uma análise abrangente baseada em túnel que capture os efeitos estáticos e dinâmicos possibilitando que o equilíbrio seja garantido entre a economia de material e a integridade estrutural [30].

Dois anos depois, em 2017, foi publicado pela SEAOC a nova extensão do código americano ASCE 7 chamada PV2-2017 “*Wind Design for Solar Arrays*” que contém regras específicas para a caracterização do vento em painéis solares instalados em coberturas. A pressão do vento é calculada no código principal, enquanto os coeficientes relacionados com as características dos painéis, com inclinação e presença de obstáculos é feita na nova parte [31].

Tanto o código europeu como o americano, contam com coeficientes similares para o cálculo da pressão do vento:

- Coeficiente de orografia (EC) – C_o / topografia (ASCE) – K_{zt}
- Coeficiente de rugosidade (EC) – C_r / pressão da velocidade (ASCE) – K_z
- Coeficiente de direção (EC) – C_{dir} / direção (ASCE) – K_d

O novo documento SEAOC PV2-2017 já leva em conta algumas questões interessantes e específicas para o a quantificação do vento em painéis fotovoltaicos instalados em coberturas, como [32]:

- Consideração de uma zona grande em terraços;
- Capacidade de considerar a construção de cantos de forma independente de acordo com as condições do vórtice do vento;
- Refinamentos opcionais para fatores de borda dos painéis;
- Mais flexibilidade para proporcionar lacunas entre os painéis solares.

É importante mencionar sobre a importância das novas medidas em relação ao tamanho das lacunas entre módulos e o refinamento o fator de borda do painel, uma vez que podem ser condicionantes no dimensionamento. Outro ponto a se enfatizar é o fato de ter sido levado em conta a questão das cargas dinâmicas do vento.

Apesar do SEAOC ofertar meios de cálculo para a carga do vento em painéis fotovoltaicos, esses instruem o dimensionamento dos painéis instalados em coberturas, com a restrição de estarem a uma certa altura que as mesas dos parques solares não estão, além de terem pilares muito mais curtos que as mesas.

3

CASO DE ESTUDO

A necessidade da realização de um estudo paramétrico no âmbito das estruturas de suporte dos painéis fotovoltaicos surgiu com a demanda da empresa Voltalia em ter maior sensibilidade à influência dos parâmetros envolventes de um projeto. A partir das conclusões do presente estudo, pretende-se que algumas decisões sejam tomadas de maneira mais imediata a fim de minimizar a quantidade de aço utilizada e consequentemente o custo total da estrutura.

Neste sentido, o caso de estudo abordado no vigente documento consiste numa estrutura solar fixada ao solo com 28 painéis solares no total com as seguintes características:

- *Layout*: 2V14
- Espaçamento vertical entre painéis: 15 mm;
- Espaçamento horizontal entre painéis: 21 mm;
- Sobra nas extremidades da madre para calcador lateral: 50 mm;
- Largura da mesa: 3,935 m;
- Comprimento da mesa: 14,261 m;
- Área total da mesa: 56,12 m².

O modelo dos painéis em questão é o *Suntech STP345S-24/Vfw*, se trata de um módulo padrão de 72 células com potência pico de 345 Wp, dimensões 1960 mm × 992 mm × 40 mm e peso 22.1 kg/unidade.

3.1. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE SUPORTE

A estrutura de suporte da mesa é composta por pórticos iguais intersectados por madres que recebem as cargas aplicadas pelos painéis e são apoiadas nas vigas, que por sua vez distribuem os esforços pelas escoras ligadas ao pilar que é engastado ao solo, como já foi apresentado exemplos em capítulos anteriores.

Mais algumas características fixas importantes da mesa fotovoltaica em âmbito estrutural:

- Tipo de pórtico: monoposte
- Altura mínima (H_{min}): 500 mm;
- Tipo de fundação: estaca cravada;

Na Figura 3.1 é possível observar o desenho de uma estrutura de mesmo padrão das que serão abordadas neste estudo. Nota-se na imagem que uma parte do painel solar está livre 490 milímetros desde o ponto de fixação até o bordo livre, tanto essa medida quanto o espaçamento entre as madres são determinados de acordo com os sítios de fixação dos painéis, informação presente na ficha técnica do painel solar.

Além da vista lateral, também é apresentado o desenho da vista frontal da mesa fotovoltaica padrão na Figura 3.2, neste caso com o *tilt* de 25°.

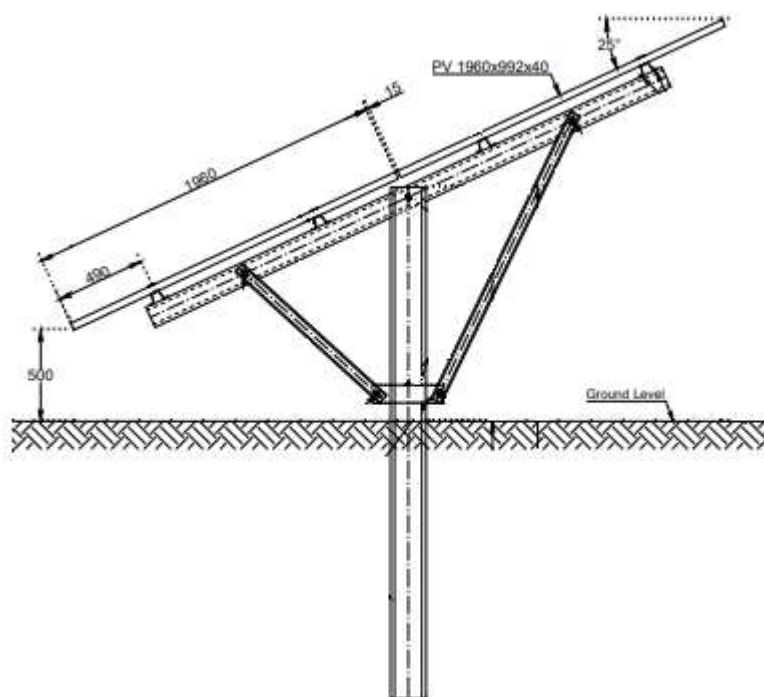


Figura 3.1 - Vista lateral de estrutura solar padrão monoposte com *tilt* de 25° (imagem concedida pela Voltalia alterada)

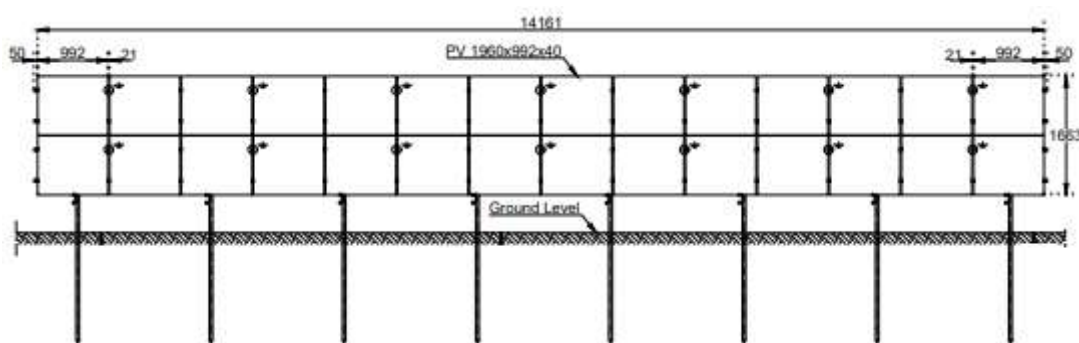


Figura 3.2 - Vista frontal de estrutura solar padrão monoposte com *tilt* de 25° (imagem concedida pela Voltalia alterada)

3.2. SECÇÕES DE AÇO ENFORMADO A FRIO

Como já mencionado no item 2.2, a utilização do aço enformado a frio é justificada pela boa relação entre a elevada resistência mecânica e o reduzido peso, além das variadas possibilidades de geometria. Para a estrutura em questão, foram selecionadas as secções ômega (Ω) a utilizar nas madres e nas escoras

e as secções C nos pilares e nas vigas. Algumas características destes perfis são apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2, além do catálogo completo da Perfil Norte está presente no Anexo 3.

O material utilizado para confecção dos perfis referidos é o aço S350 Magnelis® ZM310, suas características estão descritas na Tabela 3.3. Por serem em geral esbeltos, os perfis enformados a frio tendem a encurvarem localmente quando sujeitos à compressão antes que se atinja a tensão de cedência nos mesmos, e por isso frequentemente são classificados como Classe 4 de acordo com o EC3 (1-1). O cálculo dos parâmetros da secção efetiva, assim como da encurvadura por flexão e encurvadura local será detalhado no próximo capítulo no item 4.4.

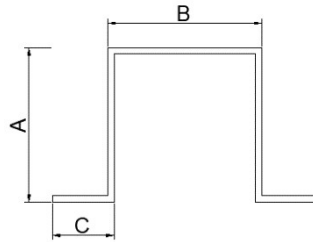


Tabela 3.1 – Características das secções do perfil Ω (madres e escoras)

REF	DIMENSÕES [mm]				Área [cm ²]	Peso [kg/m]
	Esp.	A	B	C		
Ω50	1,5	50	50	20	2,76	2,22
	2	50	50	20	3,64	2,95
	2,5	50	50	20	4,5	3,68
Ω100	1,5	100	60	20	4,41	3,46
	2	100	60	20	5,84	4,58
	2,5	100	60	20	7,25	5,69

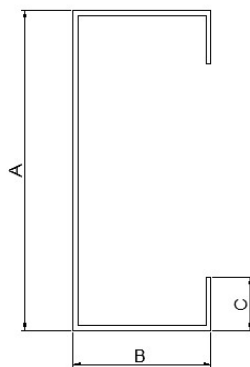


Tabela 3.2 – Características das secções do perfil C (pilares e vigas)

REF	DIMENSÕES [mm]				Área [cm²]	Peso [kg/m]
	Esp.	A	B	C		
C120	2	120	52	19	5,08	3,89
	2,5	120	52	19	6,30	4,82
	3	120	52	19	7,50	5,72
C140	2	140	43	18	5,08	3,89
	2,5	140	43	18	6,30	4,82
	3	140	43	18	7,50	5,72
C170	2	170	52	19	6,08	4,77
	2,5	170	52	19	7,55	5,93
	3	170	52	19	9	7,06
C200	2	200	52	19	6,68	5,24
	2,5	200	52	19	8,3	6,51
	3	200	52	19	9,9	7,82

Tabela 3.3 - Características do aço enformado a frio S350 Magnelis® ZM310

Tensão de Cedência f_y	Tensão Última f_u	Módulo de Elasticidade E	Módulo de Distorção G
[MPa]			
350	420	210000	80800

3.3. METODOLOGIA DO ESTUDO

Nesse tipo de estrutura, alguns parâmetros variam de acordo com a localização geográfica e com o terreno de implantação da mesa. Esses parâmetros terão a sua influência avaliada no presente estudo, nomeadamente: o *tilt* (inclinação do painel), as cargas de vento e neve, o tipo de solo e o *slope* (inclinação do terreno).

Enquanto o *tilt* é determinado de acordo com a inclinação ideal que recebe maior radiação solar, as cargas de vento e de neve dependem da região e país do projeto, a considerar a rugosidade do terreno e a altitude do mesmo. Por esse motivo, serão considerados países de referência para a determinação dessas cargas, assim como os tipos de terreno.

Um trabalho de parametrização consiste em manter um parâmetro variável enquanto os demais são fixados num valor de referência. Nesse sentido, com o objetivo de concluir sobre a influência dos principais parâmetros envolventes no dimensionamento, a pesquisa foi dividida em quatro etapas descritas a seguir:

- Estudo 1 – Tilt variável (10°; 15°; 20°; 25°);
- Estudo 2 – Carga do vento e neve variáveis (Albania, Portugal e França);
- Estudo 3 – Resistência a tração do solo variável (5 kN; 7,5 kN; 10 kN);
- Estudo 4 – Slope variável (0°; 5°; 10°).

No primeiro estudo, o *tilt* varia entre quatro valores, uma vez que esses são padrões em projetos do mercado europeu. A seguir a mesma lógica, a seleção dos valores relacionados ao solo, tanto no estudo três como no quatro, se baseou no fato desses valores serem frequentes em projetos desse tipo de estrutura. Já os fatores regionais utilizados no estudo dois se justifica pela disponibilidade de projetos nos países citados fornecidos pela Voltalia que serviram de apoio.

Como mencionado, em cada uma dessas etapas os demais parâmetros se manterão fixos com os valores de referência que estão descritos na Tabela 3.4 adiante. Vale realçar que a partir da modelação e da verificação de segurança globalmente e localmente será possível ter o valor total do peso de aço utilizado em cada um dos modelos e finalmente concluir sobre a influência de cada parâmetro estudado.

Tabela 3.4 - Valores de referência para os parâmetros fixos

<i>Tilt</i>	Fatores para carga de		Resistência à tração do solo	<i>Slope</i>
	Vento	Neve		
25°	$vb = 27$ m/s (Portugal) Categoria do terreno: 2	Altitude $H = 150$ m (Cadaval, Portugal)	7,5 kN	0°

4

DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

4.1. NORMAS DE APOIO AO DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento e a análise estrutural dos modelos desenvolvidos foram realizados de acordo com as seguintes normas [25] [27] [29] [33] [34] [35]:

- EN 1900: Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas
- EN 1991(1-3): Eurocódigo 1 (Parte 1-3) – Ações da neve
- EN 1991(1-4): Eurocódigo 1 (Parte 1-4) – Ações do vento
- EN 1993(1-1): Eurocódigo – Regras gerais e regras para edifícios
- EN 1993(1-3): Eurocódigo – *Supplementary Rules for Cold-Formed Members*
- EN 1993(1-5): Eurocódigo – Elementos estruturais constituídos por placas

4.2. CARGAS DE CÁLCULO

O procedimento geral de determinação e quantificação das cargas envolventes no dimensionamento da estrutura solar segundo o Eurocódigo é apresentado e detalhado nos itens 2.3.2 e 2.4.2 do Capítulo 2 do presente documento. A seguir as considerações feitas para o estudo de caso em questão, assim como os parâmetros utilizados no dimensionamento para obter a carga final a aplicar no modelo estrutural.

A Tabela 4.1 apresenta todas as cargas envolvidas no dimensionamento da estrutura solar em questão, dentre as ações variáveis são expostas tanto as cargas envolvidas no dimensionamento das madres (modelo 1) quanto no dimensionamento dos demais elementos da estrutura (modelo 2).

Tabela 4.1 – Ações consideradas no dimensionamento da estrutura de suporte de painéis fotovoltaicos

Classificação da ação	Caso de carga	Descrição
Permanente	DL1	Peso próprio da estrutura
	DL2	Peso próprio dos painéis fotovoltaicos
Variável	SN	Neve
	WP Cp,net	Pressão do vento nas madres – modelo 1
	WS Cp,net	Sucção do vento nas madres – modelo 1
	WP0	Pressão do vento na direção 0° (frontal) – modelo 2
	WP180	Pressão do vento na direção 180° (posterior) – modelo 2
	WS0	Sucção do vento na direção 0° (frontal) – modelo 2
	WS180	Sucção do vento na direção 180° (posterior) – modelo 2

4.2.1. AÇÕES PERMANENTES

Como descrito anteriormente, as cargas permanentes consideradas serão o peso próprio da estrutura e o peso próprio dos painéis fotovoltaicos. O peso específico considerado para os perfis de aço enformado a frio é de 77,00 kN/m³, valor mínimo dado pelo EC1 (1-1).

Já o peso próprio dos painéis é traduzido na estrutura como uma carga local distribuída (pY) aplicada em todas as madres, a determinação de tal carga foi feita por meio do peso unitário fornecido nas especificações do tipo do painel *Suntech STP345S-24/Vfw* de 0,22 kg/unidade.

A quantificação foi feita através da transformação do peso unitário em kg/un para o peso por área em kN/m² através da divisão pela área de um painel, que por sua vez multiplicada pela largura de influência de cada madre (metade da largura da mesa) resultou no valor da carga final em kN/m.

$$P.P.PV = 0,22 \frac{kg}{un} * \frac{9,81}{1000} = 0,217 \frac{kN}{un} * \frac{1}{0,992 * 1,96} = 0,112 \frac{kN}{m^2} * 0,984 = -0,110 kN/m$$

Enquanto o peso próprio da estrutura é calculado de forma automática pelo *Robot*, o peso próprio dos painéis é introduzido manualmente com caso de carga em todos os modelos feitos neste trabalho.

4.2.2. AÇÕES VARIÁVEIS

4.2.2.1. Ação do Vento

A caracterização da carga do vento na estrutura estudada foi feita de acordo com a metodologia descrita no item 2.4.2 deste documento, a seguir serão apresentados os parâmetros considerados em cada um dos estudos para chegar no valor final das cargas de vento.

De acordo com os valores de referência adoptados, na maioria dos estudos feitos neste trabalho o valor da velocidade base é referente à zona A de Portugal (Cadaval), ou seja $v_{b,0} = 27$ m/s. Em particular, no caso do estudo 2 em que a influência do vento no dimensionamento é analisada, o valor utilizado para a França é referente à zona 2 da área metropolitana de $v_{b,0} = 24$ m/s, como é indicado no anexo nacional francês, já o valor usado para a Albânia é de $v_{b,0} = 30$ m/s como indicado em projetos fornecidos pela *Voltalia*.

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 estão apresentados todos os parâmetros e coeficientes utilizados no cálculo da pressão de pico do vento em cada um dos estudos. Enquanto nos estudos 1, 3 e 4 foram utilizados os valores de coeficientes indicados pelo Anexo Nacional português, no estudo 2 foram utilizados aqueles indicados pelo Eurocódigo, a fim de ter maior uniformidade entre os países e variar apenas a velocidade base em cada caso.

Outro ponto importante a ser mencionado é sobre o cálculo do coeficiente de probabilidade em que é levado em conta o tempo de vida útil da estrutura, que para as estruturas solares de aço enformado a frio é considerado de 25 anos.

Além disso, para o cálculo do coeficiente de rugosidade é necessário determinar antes a categoria do terreno em que a estrutura está implantada. A fim de simplificar os cálculos, para todos os casos deste trabalho foi considerado o terreno de categoria II, nomeadamente uma zona de vegetação rasteira com obstáculos isolados com separação entre si de pelo menos 10 vezes a sua altura.

Como a altura máxima da extremidade mais alta dos painéis dispostos na mesa no caso do modelo mais utilizado nos estudos (tilt 25°) é de 2,163 metros, este valor será utilizado no cálculo do coeficiente de rugosidade para todos os estudos, exceto o estudo 2 que será utilizado o valor da altura mínima já que $Z < Z_{min}$.

Tabela 4.2 - Fatores utilizados no cálculo da pressão dinâmica de pico do vento dos Estudos 1,3 e 4

Parâmetros do cálculo da pressão do vento	Coefficientes
$V_{b,0} = 27 \text{ m/s}$	
$V_b = 27 \text{ m/s}$	$C_{dir} = 1; C_{season} = 1$
$C_{prob} = 0,96$	AN: $K = 0,11; n = 1; p = 1/T; T = 25 \text{ anos}$
$V_m = 19,87 \text{ m/s}$	$C_o(z) = 1$
Categoria de terreno: II	
$K_r = 0,190; C_r(z) = 0,778$	AN: $Z_o = 0,05\text{m}; Z_{min} = 3\text{m}; Z = 2,16\text{m}; Z < Z_{min}$
$I_v(z) = 0,244$	$K_1 = 1$
$q_p(z) = 0,668 \text{ kN/m}^2$	$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

Tabela 4.3 - Fatores utilizados no cálculo da pressão dinâmica de pico do vento no Estudo 2

Parâmetros do cálculo da pressão do vento	Coefficientes necessários para o cálculo
França: $V_{b,0} = 24 \text{ m/s}$; Portugal: $V_{b,0} = 27 \text{ m/s}$; Albânia: $V_{b,0} = 30 \text{ m/s}$	
$V_b: 24 \text{ m/s (FR)}; 27 \text{ m/s (PT)}; 30 \text{ m/s (AL)}$	$C_{dir} = 1; C_{season} = 1$
$C_{prob} = 0,96$	EC: $K = 0,2; n = 0,5; p = 1/T; T = 25 \text{ anos}$
$V_m: 16,5 \text{ m/s (FR)}; 18,6 \text{ m/s (PT)}; 20,6 \text{ m/s (AL)}$	$C_o(z) = 1$
Categoria de terreno: II	
$K_r = 0,190; C_r(z) = 0,716$	EC: $Z_o = 0,05\text{m}; Z_{min} = 2\text{m}; Z = 2,16\text{m}; Z > Z_{min}$
$I_v(z): 0,277$	$K_1 = 1$
França: $q_p(z) = 0,499 \text{ kN/m}^2$	$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$
Portugal: $q_p(z) = 0,631 \text{ kN/m}^2$	
Albânia: $q_p(z) = 0,779 \text{ kN/m}^2$	

Como detalhado no item 2.4.2, após o cálculo da pressão do vento, os coeficientes de força (C_f) e de pressão ($C_{p,net}$) são obtidos no Quadro 7.6 do EC1 (1-4) para que a pressão resultante do vento seja calculada de acordo com o *tilt* de cada modelo. Como o *tilt* varia apenas no estudo 1, então esses coeficientes também serão diferentes em cada modelo apenas neste estudo, nos demais estudos os coeficientes utilizados serão os referentes ao *tilt* de 25° (valor de referência para o *tilt* fixo). Os valores dos coeficientes assim como os da pressão resultante do vento em cada estudo são apresentados no capítulo 5. A disposição das cargas é feita como foi explicado no item 2.4.2 deste documento e os valores finais das mesmas inseridas no *Robot* estão presentes em anexo.

4.2.2.2. Ação da Neve

O cálculo da carga da ação da neve foi feita de acordo com o procedimento detalhado no item 2.3.2.3 do capítulo 2 deste documento.

A seguir a mesma lógica do que foi feito na carga do vento, todos os estudos seguem o que é exposto no Anexo Nacional português, apenas no estudo 2 é utilizado o recomendado pelo Eurocódigo no Anexo C, com uma pequena diferença na carga aplicada à estrutura.

Para todos os estudos, a localização de implantação da estrutura foi a de Cadaval, Portugal, no qual possui as características apresentadas na Tabela 4.4. Até mesmo no estudo 2 em que são utilizados diferentes países como referência, o valor da carga da neve será baseada na mesma localização de referência, uma vez que o intuito é variar apenas a velocidade base do vento.

Tabela 4.4 - Fatores utilizados no cálculo da carga da ação da neve

Anexo Nacional				Anexo C			
Zona	Cz	H [m]	Sd [kN/m ²]	Zona	Z	A [m]	Sd [kN/m ²]
3	0,1	150	0,087	1	0,1	150	0,082

4.3. COMBINAÇÃO DE AÇÕES

As combinações de carga foram feitas com base no EC0. Em análise da estrutura foram consideradas combinações em relação ao Estado Limite Último (ELU) e ao Estado Limite de Serviço (ELS) [25].

Para os casos de ELU, as combinações foram obtidas de acordo com o Quadro A1.2 (A), que é apresentado na Figura 4.1 a seguir.

Situações de projecto persistentes e transitórias	Acções permanentes		Acção variável de base da combinação *)	Acções variáveis acompanhantes	
	Desfavoráveis	Favoráveis		Principais (caso existam)	Outras
(Expressão 6.10)	$\gamma_{G,sup} G_{k,sup}$	$\gamma_{G,inf} G_{k,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

$\gamma_{G,sup} = 1,35$
 $\gamma_{G,inf} = 1,15$
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)
 $\gamma_{Q,i} = 1,50$ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)
 desde que a aplicação de $\gamma_{G,inf} = 1,00$, tanto às parcelas favoráveis como desfavoráveis das acções permanentes, não produza um efeito mais desfavorável.

Figura 4.1 – Valores de cálculo das ações (EQU) (Conjunto A) [25]

Já os casos de ELS, têm as combinações baseadas no Quadro A1.4 do código, que é apresentada a seguir na Figura 4.2.

Combinação	Acções permanentes G_d		Acções variáveis Q_d	
	Desfavoráveis	Favoráveis	De base da combinação	Outras
Característica	$G_{k,sup}$	$G_{k,inf}$	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} Q_{k,i}$
Frequente	$G_{k,sup}$	$G_{k,inf}$	$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
Quase-permanente	$G_{k,sup}$	$G_{k,inf}$	$\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$

Figura 4.2 – Valores de cálculo das ações a utilizar na combinação de ações [25]

Como o risco à vida humana é baixo nesse tipo de estrutura, de acordo com o Anexo B do EC0, a fiabilidade de classe RC1 é considerada, permitindo que os coeficientes parciais sejam corrigidos multiplicando por $K_{FI} = 0,9$. Dessa forma, os coeficientes parciais resultantes das combinações de ELU são [25]:

- $\gamma_{Gk,sup} = 1,35 \times 0,9 = 1,215$
- $\gamma_{Q1} = \gamma_{Qi} = 1,5 \times 0,9 = 1,35$

Os coeficientes ϕ_0 são retirados do Quadro A1.1 do EC0 e possuem os seguintes valores para cada tipo de carga variável:

- Cargas do vento: $\phi_0 = 0,6$
- Carga da neve: $\phi_0 = 0,5$

A utilizar os coeficientes citados, as combinações introduzidas no *Robot* tanto para o modelo 1 quanto para o modelo 2 estão expostas no Anexo 4.

4.4. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL

Uma vez que as estruturas modeladas no presente trabalho são compostas por perfis de aço enformado a frio, o processo de verificação de segurança torna-se mais complexo. Apesar das inúmeras vantagens, tendo como principal a sua elevada resistência atrelada à sua leveza, esse tipo de perfil possui um comportamento estrutural que envolve fenômenos de instabilidade, que não apresentam relevância para os demais tipos de aço laminados a quente.

Devido a sua elevada esbelteza, ou seja, o alto valor de relação entre dimensão e espessura, os perfis de aço enformado a frio são em sua grande maioria secções de classe 4 segundo o EC3 (1-1) [33]. Como é descrito na norma, essa classe de secções transversais são aquelas em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal. E por esse motivo, é necessário adoptar larguras efetivas a fim de ter em consideração as reduções de resistência devido aos efeitos da encurvadura lateral. A redução da área da secção transversal faz com que todas as demais propriedades também sejam afetadas e por isso condiciona o dimensionamento da estrutura.

O procedimento de análise e verificação de segurança dos perfis de aço enformado a frio é disposto no EC3 (1-3) [34]. Mesmo que impedidas de deformar lateralmente, os perfis também estão suscetíveis ao fenômeno de encurvadura por flexão devido aos esforços de compressão, flexão ou a combinação dos dois.

Já que a estrutura não recebe forças horizontais, ou essas não são relevantes (como cargas de vento em outras direções que não sejam as ortogonais), não foi realizada a análise da encurvadura global, como imperfeições geométricas e efeito de segunda ordem.

Além da particularidade das verificações de encurvadura lateral, outra peculiaridade dos perfis utilizados nos modelos do presente estudo está no fato de serem perfis abertos e simétricos em apenas um eixo. Como o programa utilizado, *Robot*, não realiza automaticamente o cálculo dos parâmetros efetivos de secções de classe 4 e calcula o momento crítico da encurvadura lateral em secções duplamente simétricas apenas, não foi possível realizar toda a verificação de segurança no *software*. Em vista disso, houve a necessidade de elaborar uma folha de cálculo automático que além de classificar a secção de acordo

com as tensões que está submetida, também fizesse o cálculo das larguras efetivas de cada elemento, caso aplicável.

Portanto, a verificação de segurança foi dividida em duas partes: a parte preliminar feita pelo *Robot* de acordo com o EC3 com a secção bruta e o momento crítico sem o coeficiente referente à monossimetria, e segunda parte que a resistência é calculada com os parâmetros efetivos e a encurvadura lateral analisada com os coeficientes corretos.

Ainda no *Robot*, é verificado as flechas nas madres e vigas com o valor máximo admissível de $L/200$. O mesmo é feito para os pilares com o limite de $H/150$.

A classificação dos elementos das secções foi feita de acordo com o Quadro 5.1 e 5.2 do EC3 (1-1) [33]. Os componentes submetidos à compressão e flexão, como é o caso da alma da secção C no pilar e na viga e da secção ômega na madre, demandam a realização de combinações de esforços dos casos de esforços máximos a fim de encontrar a relação $\phi = \sigma_2/\sigma_1$ que mais agravasse o cálculo da secção efetiva. Já para os elementos em compressão apenas, o procedimento foi mais imediato dependendo apenas da tensão de cedência f_y .

O cálculo da largura efetiva foi feito através do EC3 (1-5) de acordo com as tabelas 4.1 e 4.2 [35]. A partir da largura efetiva é possível calcular a nova área, inércia em y e em z, além da excentricidade e_{Ny} e e_{Nz} gerada pela mudança do centro de massa.

Finalizada a etapa de cálculo dos parâmetros referentes às secções de classe 4, se inicia a verificação de segurança em si que pode ser dividida da seguinte maneira:

- Verificação de esforços isolados na secção: esforço axial e momento fletor [33]

$$N_{Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.14)$$

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{eff,y,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.15)$$

$$M_{z,Rd} = \frac{W_{eff,z,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.16)$$

$$N_{ed,max} \leq N_{Rd} \quad (4.17)$$

$$M_{y,ed,max} \leq M_{y,Rd} \quad (4.18)$$

$$M_{z,ed,max} \leq M_{z,Rd} \quad (4.19)$$

- Verificação de interação entre esforços na secção [31]

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (4.20)$$

Neste caso os valores dos esforços solicitantes foram retirados do caso mais condicionante para o elemento em questão.

Concluída a verificação à nível da secção, se inicia a verificação de segurança do elemento de barra, que por sua vez é feita com o objetivo de limitar os esforços atuantes na barra tendo em vista os fenômenos de instabilidade. Antes da comparação de resultados, é necessário calcular as resistências à encurvadura

por flexão $N_{b,Rd}$ e à encurvadura lateral $M_{b,Rd}$, tal cálculo teve como base os itens 6.3.1 e 6.3.2 do EC3 (1-1) [33].

- Encurvadura por flexão $N_{b,Rd}$ [33]

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4.21)$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \text{ mas } \chi \leq 1,0 \quad (4.22)$$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (4.23)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \text{ para as secções transversais da Classe 4} \quad (4.24)$$

em que:

L_{cr} comprimento de encurvadura no plano de encurvadura considerado;

i raio de giração em relação ao eixo apropriado, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta;

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9E$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.25)$$

Os valores de comprimento de encurvadura em cada plano foram definidos de acordo com os travamentos existentes em cada barra e estão dispostos na Tabela 4.5. Em cada plano da estrutura, y-y e z-z os comprimentos de encurvadura foram atribuídos de acordo com a análise dos apoios de cada elemento e as regras apresentadas na Figura 4.3. Já na Figura 4.4 pode ser obtido os fatores de imperfeição tanto dos perfis em C quanto em ômega.

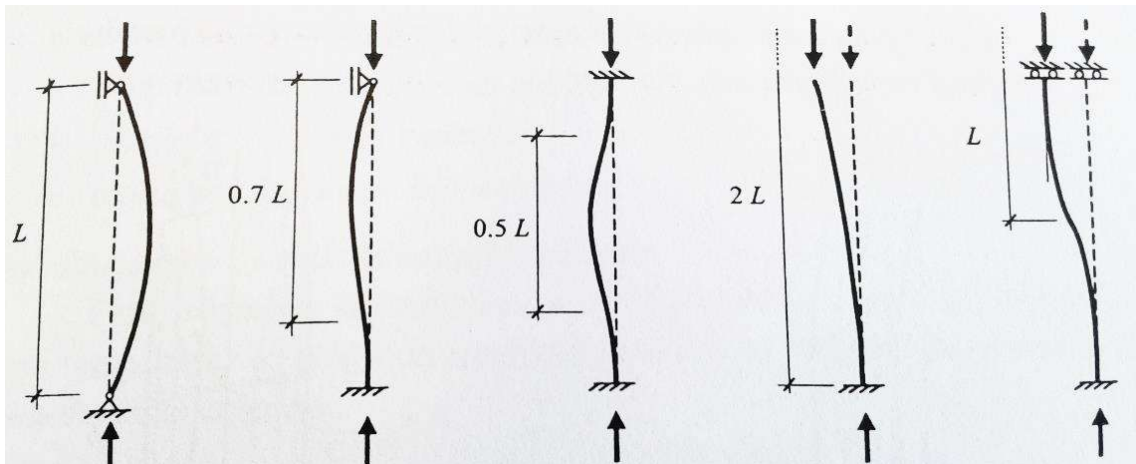


Figura 4.3 – Comprimentos de encurvadura de acordo com os apoios de cada elemento [36]

Tabela 4.5 – Valores do comprimento de encurvadura no plano y-y e z-z sendo L o comprimento da barra

	$L_{cr,y} = kL$	$L_{cr,z} = kL$	α
Pilar [C]	$k = 2$	$k = 0,7$	0,76
Viga [C]	$k = 1$	$k = 0,5$	0,76
Escora [Ω]	$k = 1$	$k = 1$	0,49
Madre [Ω]	$k = 1$	$k = 1$	0,49

Tipo do elemento	Eixo de encurvadura	Austenítico e duplex		Ferrítico	
		α	$\bar{\lambda}_0$	α	$\bar{\lambda}_0$
Cantoneiras e secções U enformadas a frio	Qualquer	0,76	0,2	0,76	0,2
Secções ómega enformadas a frio	Qualquer	0,49	0,2	0,49	0,2
Enformados a frio RHS	Qualquer	0,49	0,3	0,49	0,2
Enformados a frio CHS/ EHS	Qualquer	0,49	0,2	0,49	0,2
Laminados a quente RHS	Qualquer	0,49	0,2	0,34	0,2
Laminados a quente CHS/EHS	Qualquer	0,49	0,2	0,34	0,2
Secções abertas soldadas ou laminadas a quente	Maior Inércia	0,49	0,2	0,49	0,2
	Menor Inércia	0,76	0,2	0,76	0,2

Figura 4.4 – Valores de fatores de imperfeição α para perfis enformados a frio (C = secções em U) [37]

- Encurvadura lateral $M_{b,Rd}$ [33]

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4.26)$$

$W_y = W_{eff,y}$ para as secções transversais da Classe 4;

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ mas } \chi_{LT} \leq 1,0 \quad (4.27)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (4.28)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (4.29)$$

α_{LT} é o fator de imperfeição e foi adotado o valor 0,34, pois é o valor indicado para secções enformadas a frio e secções [37]

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \left\{ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_f)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_f) \right\} \quad [38] \quad (4.30)$$

$$z_g = z_a - z_s$$

z_s é a coordenada do centro de corte

z_a é a coordenada do ponto onde a carga é aplicada (positiva na zona comprimida)

$$z_j = y_j = y_s - \frac{1}{2 \cdot I_z} (\sum (y^2 + z^2) y A_i) \quad [34]$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.31)$$

Foram considerados como comprimentos de encurvadura o comprimento entre travamentos laterais à secção, estes valores assim como os dos coeficientes envolvidos nos cálculos estão dispostos na Tabela 4.6. No caso da escora, a encurvadura lateral não é aplicável uma vez que está submetida apenas por esforço axial e possui momento fletor nulo.

Nas Figuras 4.5 e 4.6 é possível observar as tabelas utilizadas para obter os coeficientes C1, C2 e C3, enquanto que para as madres foi utilizada a primeira tabela de acordo com o carregamento linear uniforme, para as vigas e pilares foi usado a segunda tabela de acordo com os diagramas de momento.

Tabela 4.6 – Valores do comprimento de encurvadura no plano y-y e z-z sendo L o comprimento da barra

	$L_{cr,y} = kL$	$L_{cr,z} = kL$	α_{LT}	C1	C2	C3
Pilar [C]	$k = 2$	$k = 0,7$	0,34	1,77	0	1
Viga [C]	$k = 1$	$k = 0,5$	0,34	1,00	0	1
Escora [Ω]	-	-	-	-	-	-
Madre [Ω]	$k = 1$	$k = 1$	0,34	1,12	0,45	0,525

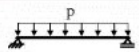
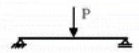
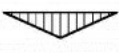
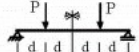
Carregamento e condições de apoio	Diagrama de momentos	k_z	C ₁	C ₂	C ₃
		1.0	1.12	0.45	0.525
		0.5	0.97	0.36	0.478
		1.0	1.35	0.59	0.411
		0.5	1.05	0.48	0.338
		1.0	1.04	0.42	0.562
		0.5	0.95	0.31	0.539

Figura 4.5 – Valores de coeficientes do cálculo do M_{cr} utilizados para as madres [38]

Carregamento e condições de apoio	Diagrama de momentos	k_z	C_1	C_3	
				$\psi_f \leq 0$	$\psi_f > 0$
	$\psi = +1$	1.0 0.5	1.00 1.05	1.000 1.019	
	$\psi = +3/4$	1.0 0.5	1.14 1.19	1.000 1.017	
	$\psi = +1/2$	1.0 0.5	1.31 1.37	1.000 1.000	
	$\psi = +1/4$	1.0 0.5	1.52 1.60	1.000 1.000	
	$\psi = 0$	1.0 0.5	1.77 1.86	1.000 1.000	
	$\psi = -1/4$	1.0 0.5	2.06 2.15	1.000 1.000	0.850 0.650
	$\psi = -1/2$	1.0 0.5	2.35 2.42	1.000 0.950	$1.3 - 1.2\psi_f$ $0.77 - \psi_f$
	$\psi = -3/4$	1.0 0.5	2.60 2.45	1.000 0.850	$0.55 - \psi_f$ $0.35 - \psi_f$
	$\psi = -1$	1.0 0.5	2.60 2.45	$-\psi_f$ $-0.125 - 0.7\psi_f$	$-\psi_f$ $-0.125 - 0.7\psi_f$

Figura 4.6 – Valores de coeficientes para o Mcr utilizados para pilares e vigas [38]

É válido comentar que o coeficiente C_1 considera o efeito do carregamento e por isso para a madre foi tomado em conta o carregamento uniformemente distribuído da Figura 4.5. Enquanto que para o pilar e viga foram considerados a distribuição de tensão na barra por meio da Figura 4.6. O diagrama de momento fletor dos pilares teve forma triangular e o das vigas resultou uma forma de trapézio, que de forma conservativa foi considerado para todos os casos a retangular, com o menor valor de C_1 .

Já o coeficiente C_2 traduz a influência da localização em que a carga é aplicada, como apenas a madre recebe cargas, apenas ela teve valor não nulo e determinado pela condição de apoio simplesmente apoiada nas vigas e o carregamento uniformemente distribuído.

O coeficiente C_3 é utilizado para secções que não são duplamente simétricas, como é o caso das secções utilizadas neste trabalho. Como as secções C e ômega (virada) não são simétricas em torno do eixo z e simétricas em torno do eixo y, a equação foi adaptada ao alterar o z_j pelo y_j , estes parâmetros descrevem o grau de simetria da secção.

- Verificação de elementos sujeitos à flexão composta com compressão [33]

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.32)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.33)$$

Os coeficientes k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} são fatores de interação e são encontrados no Anexo B* do EC3 (1-1) [33].

É importante mencionar que as verificações são realizadas apenas para o eixo forte da secção (eixo y), já que no eixo fraco os esforços são menores e possuem geometria favorável, como o caso das madres de secção ômega que são travadas no eixo z pelos painéis fotovoltaicos.

Além disso, vale ressaltar que com o dimensionamento das madres foi feito pelo modelo 1, com as cargas de vento calculadas com o coeficiente $C_{p,net}$, a verificação de segurança também deve ser feita no mesmo modelo. Enquanto os demais elementos são verificados pelo modelo 2.

Dessa forma fica concluída a verificação de segurança das secções e barras dos modelos de cada estudo. As folhas de cálculos resumidas estão presentes no Anexo 5.3, onde pode ser observado os valores obtidos na verificação de cada elemento, inclusive aquelas que não foram cumpridas. Já no Anexo 5.2, os esforços solicitantes locais máximos (N , M_y e M_z) de cada elemento dos modelos do estudo 1 podem ser conferidos.

5

ESTUDO PARAMÉTRICO

5.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Como explícito no capítulo três, o estudo foi dividido em quatro etapas e cada uma delas segue a mesma metodologia, com a alteração apenas dos parâmetros fixos e variáveis. Como descrito no item de caracterização da carga do vento no capítulo dois, o dimensionamento da estrutura deve ser feito utilizando o coeficiente de força global C_f , enquanto o coeficiente de pressão resultante $C_{p,net}$ é utilizado apenas para o dimensionamento das madres.

Nesse sentido, para cada valor de parâmetro de cada estudo, são elaborados dois modelos idênticos no programa de cálculo automático *Robot Structural Analysis*:

- Modelo 1: dimensionamento apenas das madres e carga do vento determinada com o coeficiente $C_{p,net}$;
- Modelo 2: dimensionamento das vigas, escoras e pilares com a secção das madres já determinada e carga do vento calculada com o coeficiente C_f .

Primeiramente, se faz a estimativa de número de pilares do pórtico da mesa de 28 módulos partir da equação a seguir:

$$n^{\circ} \text{ de pilares} = \frac{\text{área da mesa} \times \text{carga de tração total}}{\text{resistência à tração do solo}}$$

A área da mesa é fixa para todas as situações ao considerar a utilização dos módulos iguais em todas as situações de dimensões (992 x 1996) mm, espaçados 21 mm entre si horizontalmente e 15mm verticalmente, totalizando uma área de 56,12 metros quadrados.

A carga de tração total será calculada através da subtração da carga de sucção do vento (C_f) e o peso próprio. De maneira conservativa e do lado da segurança, o peso próprio da estrutura suporte de aço não foi considerada uma vez que nesta altura ainda é desconhecido, apenas o peso próprio dos painéis será levados em conta. Neste caso, o valor da carga de tração total irá variar quando a carga do vento variar, ou seja, no Estudo 1 (variação do *tilt*) e no Estudo 2 (variação do vento).

Já a resistência à tração do solo varia apenas no Estudo 3 enquanto nos demais se mantém no valor de referência. Para estes valores de referência, ou seja, os valores arbitrados aos parâmetros quando fixos em determinada etapa, foram atribuídos os fatores referentes a Portugal no caso do *tilt*, vento e neve. Nos fatores relacionados ao solo e ao terreno foram seguidos os critérios de solo de resistência mediana e terreno plano.

Vale ressaltar que nos itens de cada estudo serão detalhados os respectivos valores finais dos parâmetros fixos e variáveis já em unidade de carga linear para que seja possível a realização da modelação. Além disso, é importante afirmar que o cálculo do número de pilares é apenas uma estimativa preliminar, uma vez que após a finalização do modelo, é necessário conferir que as reações de tração nos apoios nas combinações em estado limite de serviço tenham valores abaixo da resistência do solo.

Após a verificação automática do modelo no *Robot* de acordo com o EC3, ainda há o último passo a ser realizado. Como já dito, os perfis enformados a frio em sua grande maioria são de classe 4 devido à grande relação entre comprimento e espessura. Tendo em vista que os parâmetros efetivos da secção não são determinados automaticamente pelo *software*, torna-se então necessária a realização desse cálculo a parte a fim de efetuar a verificação da nova resistência efetiva. Ademais, por serem secções mono-simétricas, deve ser introduzido um coeficiente C3 no cálculo do momento crítico na determinação da encurvadura lateral como é detalhado no capítulo 4 item 4.4.

Após a verificação de resistência a parte com os parâmetros efetivos e as verificações de encurvadura, alguns modelos tiveram que ter o número de pilares alterados, as secções acrescidas ou travamentos adicionados. Nos modelos em que os eventuais travamentos adicionados possuem a mesma secção que as escoras, eles são tratados como escoras nas folhas de cálculo de verificações. Tais folhas de cálculo dos casos preliminares e também da estrutura final estão presentes no Anexo 4.

Vale afirmar que nos itens adiante de cada estudo serão apresentados apenas os parâmetros utilizados na estrutura final verificada, além do modelo feito no *Robot*. Os valores finais das cargas aplicadas nas madres que foram introduzidas no *software* se encontram detalhados no Anexo 5.1.

O resultado de cada modelo elaborado é traduzido pelo peso total da estrutura, que por sua vez irá influenciar diretamente no custo da mesma. Em cada item a seguir são expostos as secções utilizadas no modelo final assim como a contribuição de cada elemento para o peso total da estrutura em questão. Além disso, a fim de ter sensibilidade em aspecto econômico, é apresentado o impacto da alteração de cada parâmetro no preço final da estrutura, a considerar o preço unitário de 1,5€/kg.

5.2. ESTUDO 1: INFLUÊNCIA DO *TILT*

O primeiro estudo consiste na variação da inclinação do painel em quatro valores de angulação: 25°, 20°, 15° e 10°. Antes do cálculo do nº de pilares, é necessário que a carga do vento seja determinada e neste momento percebe-se a grande influência do *tilt* no valor final em kN/m². Sendo assim, além de diferentes cargas de vento a serem aplicadas a cada modelo, para cada inclinação resultará em um número de pilares diferente.

De forma crescente, quanto maior a inclinação do painel, maior é a carga do vento tanto de pressão quanto de sucção e consequentemente maior o número de pilares necessários. Para os valores de *tilt* utilizados no presente estudo, a primeira estimativa de número de pilares varia de sete a quatro pilares.

Os parâmetros fixos e variáveis utilizados neste estudo são apresentados adiante nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 - Parâmetros fixos do Estudo 1 (*Tilt* variável)

P.P dos painéis	Resistência à tração do solo	Pressão dinâmica de pico q_p (vento)	Ação da neve (Anexo Nacional)	Slope
0,112 kN/m²	7,5 kN	0,668 kN/m²	0,087 kN/m²	0°

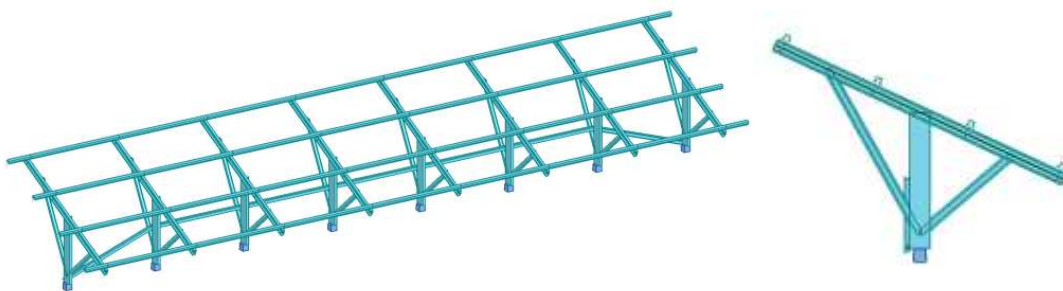
Tabela 5.2 - Parâmetros variáveis do Estudo 1 (*Tilt* variável) com F_w em kN/m^2

		Modelo 1						Modelo 2	
		Cp,A	Cp,B	Cp,C	Fw,A	Fw,B	Fw,C	Cf	Fw
25°	Pressão	+2	+3,1	+2,3	1,337	2,072	1,537	+1	0,668
	Sucção	-2,6	-3,2	-3,2	-1,738	-2,139	-2,139	-1,6	-1,069
20°	Pressão	+1,7	+2,9	+2,1	1,136	1,938	1,404	+0,8	0,535
	Sucção	-2,2	-2,8	-2,9	-1,471	-1,872	-1,938	-1,3	-0,869
15°	Pressão	+1,4	+2,7	+1,8	0,936	1,805	1,203	+0,7	0,468
	Sucção	-1,8	-2,4	-2,5	-1,203	-1,604	-1,671	-1,1	-0,735
10°	Pressão	+1,2	+2,4	+1,6	0,802	1,604	1,069	+0,5	0,334
	Sucção	-1,5	-2,0	-2,1	-1,003	-1,337	-1,404	-0,9	-0,602

A seguir serão expostas as alterações feitas em cada modelo em relação ao cálculo preliminar, assim como a imagem da estrutura final modelada no *Robot*:

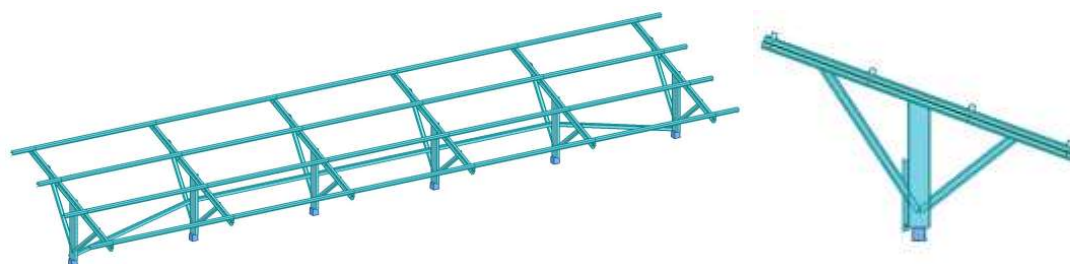
- *Tilt* 25°

O modelo inicial de *tilt* 25° com sete pilares apresentou após o cálculo da área efetiva do pilar $M_{y,ed}/M_{y,Rd,eff} > 1$ e por isso teve mais um pilar acrescentado. Além disso, no modelo de oito pilares não teve a resistência à encurvadura lateral verificada e por isso se fez necessário adicionar uma trava a meia altura dos pilares internos com a menor secção disponível.

Figura 5.1 - Modelo de estrutura do Estudo 1 de *tilt* 25°

- *Tilt* 20°

O cálculo preliminar do modelo de *tilt* 20° resultou em um número de seis pilares e assim permaneceu em sua versão final, como o pilar teve a resistência à encurvadura lateral não verificada, foi necessário adicionar uma trava à meia altura.

Figura 5.2 - Modelo de estrutura do Estudo 1 de *tilt* 20°

- *Tilt 15°*

O modelo de *tilt 15°* possui cinco pilares como previsto no cálculo preliminar e teve a sua secção inicial aumentada para a secção máxima depois do cálculo da área efetiva, já que resultou em $M_{y,ed}/M_{y,Rd,eff} > 1$. Além disso, também foi necessário o acréscimo de travamento à meia altura devido à encurvadura lateral.

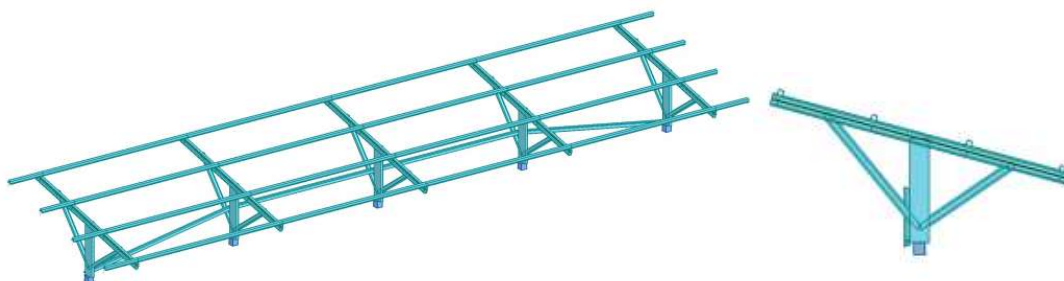


Figura 5.3 - Modelo de estrutura do Estudo 1 de *tilt 15°*

- *Tilt 10°*

Após a verificação do esforço axial de tração nos apoios do modelo de *tilt 10°*, observou-se valores acima dos 7,5 kN e por isso foi acrescentado mais um pilar ao valor estimado inicialmente, totalizando cinco pilares. Além disso, a secção dos pilares foi acrescida para a secção máxima devido à encurvadura lateral.

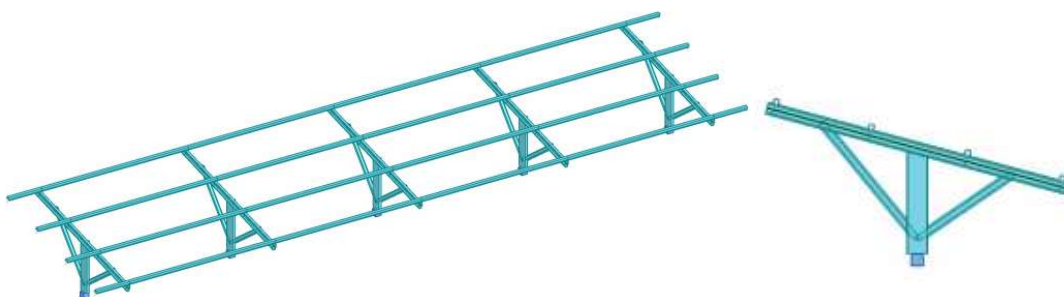


Figura 5.4 - Modelo de estrutura do Estudo 1 de *tilt 10°*

A Tabela 5.3 apresenta uma síntese das características de cada modelo elaborada no estudo 1, como o número final de pilares, a presença ou não de travamento à meia altura dos pilares e também o comprimento das madres internas e externas.

Tabela 5.3 – Características dos modelos do Estudo 1 (*Tilt* variável)

	Nº pilares	Travamento	Comprimento das madres [m]	
			externas	internas
25°	8	Sim	0,481	1,90
20°	6	Sim	0,506	2,65
15°	5	Sim	0,731	3,2
10°	5	Não	0,731	3,2

Finalmente, são apresentados na Tabela 5.4 os resultados referentes aos modelos do estudo 1, o qual tem como parâmetro variável apenas a inclinação dos painéis fotovoltaicos. Como esperado, observa-se que o aumento do peso total da estrutura acompanha o aumento do *tilt* devido ao acréscimo dos coeficientes da carga de vento. Além do peso total de cada estrutura, também é apresentado a contribuição de cada elemento tanto em peso quanto em comprimento (Comp.).

Tabela 5.4 - Secções finais e peso total da estrutura de cada modelo do Estudo 1 (*Tilt* variável)

<i>Tilt</i>		25°	20°	15°	10°
Pilar [C]	Secção	200x3	200x3	200x3	200x3
	Comp. [m]	10,72	7,32	5,3	5,3
	Peso [kg]	83,83	57,24	41,45	41,45
Viga [C]	Secção	120x2	120x2,5	120x2,5	120x2
	Comp. [m]	24,96	18,72	15,6	15,6
	Peso [kg]	99,59	92,29	76,91	62,24
Escora [Q]	Secção	50x1,5	50x1,5	50x1,5	50x1,5
	Comp. [m]	24,16	17,16	13,3	13,3
	Peso [kg]	53,64	38,10	29,53	29,53
Travamento [Q]	Secção	50x1,5	50x1,5	50x1,5	-
	Comp. [m]	13,54	13,39	12,9	0
	Peso [kg]	30,06	29,73	28,64	0
Madres [Q]	Secção	50x2,5	50x2	50x2	50x2
	Comp. [m]	57,04	57,04	57,04	57,04
	Peso [kg]	209,91	168,27	168,27	168,27
Peso TOTAL [kg]		477	386	345	301

Do maior ao menor valor de *tilt*, a quantidade de aço utilizada decresce em 37%, sinalizando a significativa influência da inclinação do painel no custo total da estrutura. Já entre cada valor determinado para o *tilt*, o peso total variou da seguinte maneira:

- 25° - 20°: -19%
- 20° - 15°: -11%
- 15° - 10°: -13%

No primeiro item observa-se a maior redução que pode ser justificado pela diferença de dois pilares entre o modelo de *tilt* de 25° que possui oito pilares e o de 20° que possui seis. O mesmo ocorre entre os modelos de *tilt* de 20° e o de 15°, porém com a diferença de apenas um pilar entre eles. Já no último caso, com os dois modelos compostos pela mesma quantidade de pilares, a redução do peso da estrutura ocorre devido à ausência de travamento nos pilares no modelo de *tilt* de 10°.

Dessa maneira, é possível afirmar que o *tilt* influencia na quantidade final de aço da estrutura de maneira significativa. No caso de estudo em questão, ou seja, uma mesa fixada num solo mediano e terreno plano com as cargas de referência de Portugal, a redução pode chegar a mais de um terço em relação ao maior valor de *tilt*. A maior diferença em termos econômicos entre estruturas de diferentes *tilts* dentre os determinados seria de 200€ (25° - 10°), enquanto a menor diferença seria de 60€ (20° - 15°).

5.3. ESTUDO 2: INFLUÊNCIA DA CARGA DO VENTO

O estudo 2 tem como objetivo avaliar a influência da alteração da carga do vento e para este efeito, será utilizado como referência os valores de três países: França, Portugal e Albânia. Vale ressaltar que todos os parâmetros envolvidos no cálculo da carga do vento permanecem o mesmo para cada país mudando apenas a velocidade base.

Como o intuito é de ganhar maior sensibilidade com a alteração apenas da velocidade base do vento, todos os demais parâmetros envolvidos no processo de cálculo de carga de vento como rugosidade do terreno e orografia serão considerados com o mesmo valor para todos os casos, como já mencionado no capítulo quatro. Além disso, tanto para o vento quanto para a neve foram utilizados os valores de coeficientes recomendados pelo EC1 (1-4), sem seguir o Anexo Nacional de cada país em questão a fim de ter maior fiabilidade da alteração apenas da velocidade base do vento e da carga característica da neve.

Nas tabelas a seguir são expostos os valores dos parâmetros fixos utilizados no estudo 2, assim como os parâmetros variáveis para cada país de referência. Vale ressaltar que o número de pilares apresentado na Tabela 5.7 é o valor inicial estimado e não o utilizado no modelo final da estrutura.

Tabela 5.5 - Parâmetros fixos do Estudo 2 (vento variável)

P.P dos painéis	Resistência à tração do solo	Tilt	Ação da neve (Anexo C)	Slope
0,112 kN/m ²	7,5 kN	25°	0,082 kN/m ²	0°

Tabela 5.6 - Parâmetros fixos para cálculo da pressão dinâmica de pico q_p no Estudo 2 (vento variável)

Categoria do terreno		2	Zo = 0,05 m; Zmin = 2 m
Coeficientes	Orografia	Cr = 1	
	Direcção	Cd = 1	
	Sazão	Cs = 1	
	Probabilidade	Cprob = 0,96	T = 25 anos; p = 0,04; K = 0,2; n = 0,5
	Rugosidade	Cr = 0,716	Z = 2,163 m; Kr = 0,190
	Força - pressão	Cf (+) = 1	Tilt = 25°
	Força - sucção	Cf (-) = -1,6	Tilt = 25°

Tabela 5.7 - Parâmetros variáveis do Estudo 2 (vento variável)

	França	Portugal	Albania
Velocidade Base Vb	24 m/s	27 m/s	30 m/s
Pressão dinâmica de pico q_p (z)	0,499 kN/m ²	0,631 kN/m ²	0,779 kN/m ²
Nº de pilares estimado	5	7	9

A seguir são apresentadas as alterações feitas em cada modelo em relação ao estimado inicialmente, assim como o modelo correspondente:

- França: $v_b = 24$ m/s

O modelo da França teria um total de cinco pilares, porém a reação de tração nos apoios ultrapassou o limite de 7,5 kN e por isso foram utilizados seis pilares na versão final. Apesar da resistência

efetiva ter verificado, a resistência à encurvadura lateral falhou e por isso foi necessário introduzir travamentos à meia altura dos pilares.

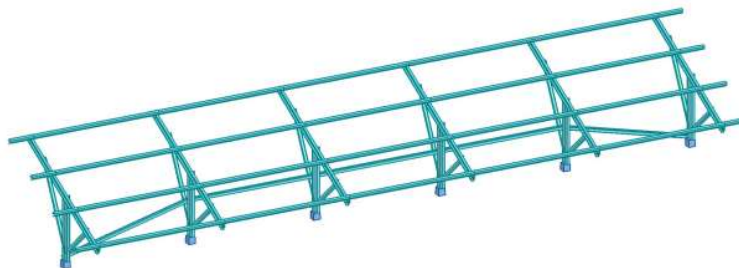


Figura 5.5 - Modelo de estrutura do Estudo 2 de *tilt* 25° com ação do vento referente à França

- Portugal: $v_b = 27$ m/s

No cálculo da ação do vento, apesar da pressão dinâmica de pico $q_p(z)$ calculada com os coeficientes sugeridos pelo EC1 (1-4) ser inferior à calculada com os coeficientes sugeridos pelo Anexo Nacional, o modelo final referente à Portugal acabou por ser semelhante ao modelo do estudo 1 (*tilt* 25°). A única diferença entre eles foi a secção das madres, no qual no modelo do estudo 1 foi necessário acrescentar uma acima em relação ao do estudo 2, afectando na quantidade final de aço. Por esse motivo, apenas a verificação das madres do modelo de Portugal do estudo 2 estará presente em anexo.

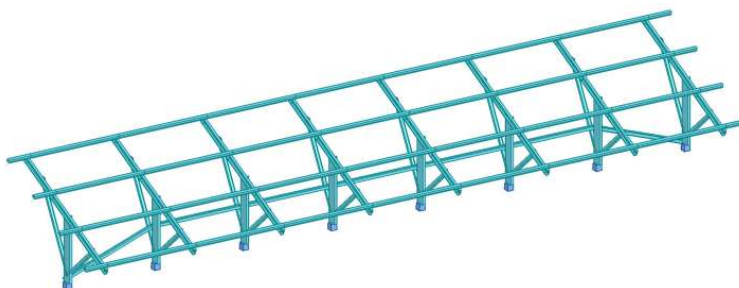


Figura 5.6 - Modelo de estrutura do Estudo 2 de *tilt* 25° com ação do vento referente à Portugal

- Albânia $v_b = 30$ m/s
- O modelo referente à Albânia teve nove pilares resultantes do cálculo preliminar persistiu a mesma quantidade na versão final, com todos os pilares com resistência efetiva suficiente. Porém, a encurvadura lateral não foi verificada e por isso foi necessário acrescentar o travamento à meia altura dos pilares internos.

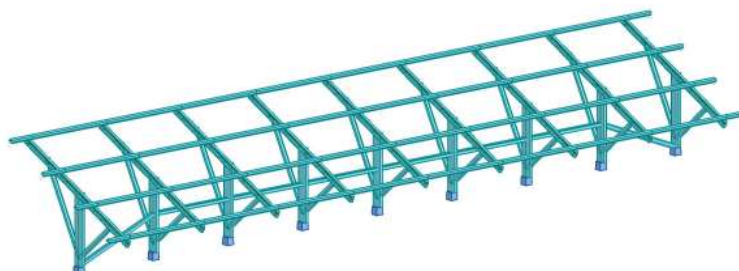


Figura 5.7 - Modelo de estrutura do Estudo 2 de *tilt* 25° com ação do vento referente à Albânia

A tabela a seguir faz a síntese das características dos modelos feitos no estudo 2, apresenta o número final de pilares, a presença de travamento à meia altura dos pilares e o comprimento das madres internas e externas.

Tabela 5.8 – Características dos modelos do Estudo 2 (vento variável)

	Nº pilares	Travamento	Comprimento das madres [m]	
			externas	internas
França	6	Sim	0,506	2,65
Portugal	8	Sim	0,481	1,90
Albania	9	Sim	0,481	1,66

Os resultados do estudo 2, onde apenas a velocidade base do vento varia entre os modelos, são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Secções finais e peso total da estrutura de cada modelo do Estudo 2 (vento variável)

	País (vb)	França (24 m/s)	Portugal (27 m/s)	Albânia (30 m/s)
Pilar [C]	Secção	200x3	200x3	200x3
	Comp. [m]	8,04	10,72	12,06
	Peso [kg]	62,87	83,83	94,31
Viga [C]	Secção	120x2	120x2	120x2
	Comp. [m]	18,72	24,96	28,08
	Peso [kg]	74,69	99,59	112,04
Escora [Ω]	Secção	50x1,5	50x1,5	50x1,5
	Comp. [m]	18,12	24,16	27,18
	Peso [kg]	29,81	53,64	60,34
Travamento [Ω]	Secção	50x1,5	50x1,5	50x1,5
	Comp. [m]	13,43	13,54	13,6
	Peso [kg]	40,23	30,06	30,19
Madres [Ω]	Secção	50x2	50x2,5	50x2,5
	Comp. [m]	57,04	57,04	57,04
	Peso [kg]	168,27	209,91	209,91
Peso TOTAL [kg]		376	477	507

Os acréscimos no peso total da estrutura entre os valores foram os seguintes:

- França (24 m/s) – Portugal (27 m/s): +27%
- Portugal (27 m/s) – Albânia (30 m/s): +6%

O aumento significativo entre o modelo da França e o de Portugal ocorre devido à diferença de dois pilares entre as estruturas, além do perfil das madres entre elas serem diferentes. Já o pequeno acréscimo entre o modelo de Portugal e da Albânia ocorre apenas por conta da diferença de um pilar entre eles.

Neste caso, a diferença em termos de custo pode ir até 180€ do país com menor velocidade base de vento para o de maior dentre os determinados. Já a diferença mínima entre o modelo da Albânia e o de Portugal é de 45€.

5.4. ESTUDO 3: INFLUÊNCIA DA CAPACIDADE RESISTENTE DO SOLO

No presente estudo, a influência da capacidade resistente à tração do solo em questão será avaliada. O solo em cada cenário irá variar entre mole, mediano e duro enquanto as cargas do vento e da neve se mantêm fixas assim como a inclinação dos painéis. Com a variação da resistência do solo de 5 kN, 7,5 kN e 10 kN, o número de pilares dos modelos também será alterado. Os valores dos parâmetros fixos utilizados no estudo 3 estão expostos na tabela a seguir.

Tabela 5.10 - Parâmetros fixos do Estudo 3 (Resistência do solo variável)

P.P dos painéis	Tilt	Pressão dinâmica de pico q_p (vento)	Ação da neve (Anexo Nacional)	Slope
0,112 kN/m ²	25°	0,668 kN/m ²	0,087 kN/m ²	0°

No primeiro estudo, a estrutura de *tilt* 25° resultou num número total de oito pilares devido à resistência efetiva ao momento em torno do eixo y da secção máxima ser inferior ao esforço solicitante, por isso, mesmo com maior resistência à tração do solo de 10 kN, não seria possível utilizar o número de pilares do cálculo preliminar (5 pilares). Dessa forma, o modelo de estrutura referente ao solo de resistência de 7,5 kN e de 10 kN é o mesmo do modelo do estudo 1 (*tilt* 25°).

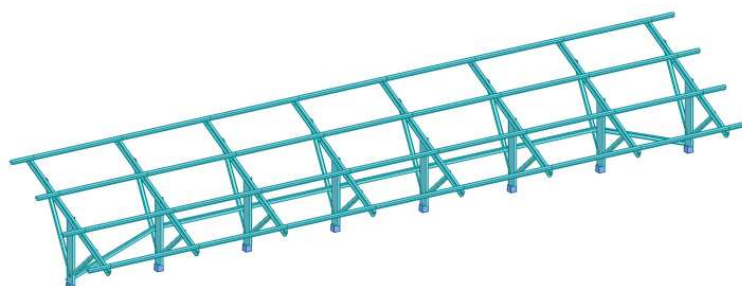


Figura 5.8 - Modelo de estrutura do Estudo 3 de *tilt* 25° no solo de resistência à tração de 7,5 kN e 10 kN

Já o cálculo preliminar do modelo com capacidade resistente de tração nos apoios de 5 kN resultou em um total de onze pilares e assim permaneceu na versão final. Com a quantidade abundante de pilares, a verificação de segurança da secção efetiva foi cumprida, inclusive em relação à encurvadura lateral sem a presença de travamento nos pilares.

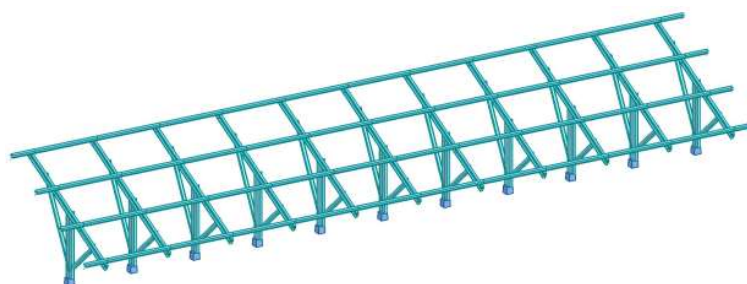


Figura 5.9 - Modelo de estrutura do Estudo 3 de *tilt* 25° no solo de resistência à tração de 5 kN

Com a variação da resistência à tração do solo, ou seja, da limitação da reação nos apoios, apenas o número de pilares irá variar. Como o comprimento total das madres de mesma zona se mantiveram iguais em todos os casos, as cargas do modelo 1 ($C_{p,net}$) também são idênticas, apenas as cargas nodais do vento aplicadas sofrem alteração no modelo de 5 kN em relação aos demais, por conta do número de pilares ser diferente. Essas características finais dos modelos estão sintetizadas na Tabela 5.11 adiante.

Tabela 5.11 – Características dos modelos do Estudo 3 (Resistência do solo variável)

	Nº pilares	Travamento	Comprimento das madres [m]	
			externas	internas
10 kN	8	Sim	0,481	1,90
7,5 kN	8	Sim	0,481	1,90
5 kN	11	Não	0,481	1,33

Os resultados do estudo 3 estão reunidos na Tabela 5.12, onde é possível avaliar a influência da resistência à tração do solo no peso total da estrutura. Como já mencionado, não foi possível reduzir o número de pilares no modelo de 10kN com as secções C disponíveis e por isso as estruturas referentes às resistências de 7,5kN e 10kN são idênticas.

Tabela 5.12 - Secções finais e peso total da estrutura de cada modelo do Estudo 3 (Resist. solo variável)

	Resist. Solo	5 kN	75 kN	10 kN
Pilar [C]	Secção	200x3	200x3	200x3
	Comp. [m]	14,74	10,72	10,72
	Peso [kg]	115,27	83,83	83,83
Viga [C]	Secção	120x2	120x2	120x2
	Comp. [m]	34,32	24,96	24,96
	Peso [kg]	136,94	99,59	99,59
Escora [Ω]	Secção	50x1,5	50x1,5	50x1,5
	Comp. [m]	33,22	24,16	24,16
	Peso [kg]	73,75	53,64	53,64
Travamento [Ω]	Secção	-	50x1,5	50x1,5
	Comp. [m]	0	13,54	13,54
	Peso [kg]	0	30,06	30,06
Madres [Ω]	Secção	50x2	50x2,5	50x2,5
	Comp. [m]	57,04	57,04	57,04
	Peso [kg]	168,27	209,91	209,91
Peso TOTAL [kg]		494	477	477

Tendo em vista que neste estudo todas as estruturas estão submetidas ao mesmo carregamento, com a única variante o limite da reação de tração nos apoios, é interessante observar que a necessidade de utilizar mais pilares num solo fraco gerou um acréscimo de apenas 4% na quantidade de aço em relação à estrutura fixada num solo mediano. Isso pode ser explicado pelo fato de que a maior quantidade de pilares fez com que a resistência à encurvadura lateral fosse verificada sem a necessidade de travamento

à meia altura desses elementos. Portanto, pode-se concluir que há casos em que pode ser mais econômico aumentar o número de pilares a fim de ter a verificação de encurvadura lateral cumprida, do que acrescentar o travamento à meia altura do pilar.

5.5. ESTUDO 4: INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DO SOLO

O vigente estudo tem como objetivo analisar o comportamento da estrutura em vista à alteração do *slope*, ou seja, da inclinação do terreno. A inclinação irá variar em três valores: 0° , 5° e 10° . A influência na estrutura com a variação deste parâmetro não é óbvia e por isso considera-se relevante a sua análise.

Neste estudo, a variação do *slope* não altera em nenhum outro parâmetro do modelo, por isso a seguir estão expostos apenas os valores utilizados para o cálculo dos parâmetros fixos.

Tabela 5.13 - Parâmetros fixos do Estudo 4 (*Slope* variável)

P.P dos painéis	Resistência à tração do solo	Tilt	Pressão dinâmica de pico qp (vento)	Ação da neve (Anexo Nacional)
0,112 kN/m ²	7,5 kN	25°	0,668 kN/m ²	0,087 kN/m ²

Ao utilizar os demais parâmetros fixos com os valores de referência, o número de pilares resultante é igual ao modelo com o *tilt* de 25° do estudo 1, no qual no estudo preliminar resultou em sete pilares e depois houve a necessidade de acrescentar mais um, totalizando em oito pilares. Por isso, todos os modelos deste estudo terão esta quantidade de pilares, variando apenas as secções e a necessidade de travamento nos pilares.

▪ *Slope* 0°

O modelo com o *slope* de 0° é idêntico ao modelo de *tilt* 25° do estudo 1, por isso tanto os valores de carga no *Robot* quando as verificações de segurança também são iguais.

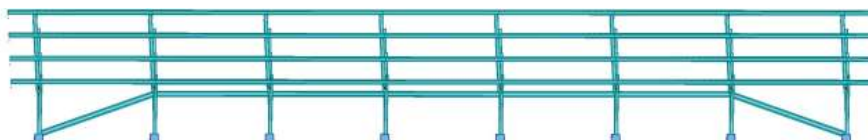


Figura 5.10 - Modelo de estrutura do Estudo 4 de *tilt* 25° no terreno com inclinação de 0° (vista frontal)

▪ *Slope* 5°

Na iteração da estrutura de *slope* 5° sem travamento nos pilares, houve falha na verificação de interação dos esforços com as resistências à encurvadura e por isso foi necessário acrescentar tais travamentos. A ficar então semelhante ao modelo de *slope* 0° , apenas com as reações nos apoios diferentes.



Figura 5.11 - Modelo de estrutura do Estudo 4 de *tilt* 25° no terreno com inclinação de 5° (vista frontal)

- *Slope* 10°

Devido às reações de tração superiores ao valor limite definido, foi acrescentado mais um elemento de contraventamento no modelo de *slope* 10° a fim de distribuir o esforço em mais um apoio, equilibrando o acúmulo em um único pilar devido à inclinação longitudinal da estrutura.

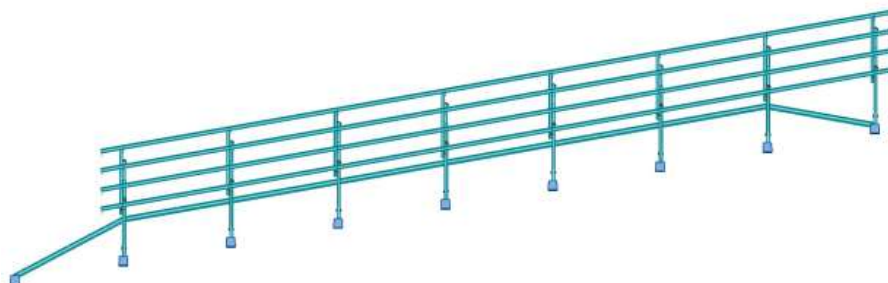


Figura 5.12 - Modelo de estrutura do Estudo 4 de *tilt* 25° no terreno com inclinação de 10° (vista frontal)

A seguir é apresentada a tabela síntese das características dos modelos elaborados no estudo 4.

Tabela 5.14 – Características dos modelos do Estudo 4 (*Slope* variável)

	N° pilares	Travamento	Comprimento das madres [m]	
			externas	internas
10°	8	Sim (+1)	0,378	1,93
5°	8	Sim	0,455	1,91
0°	8	Sim	0,481	1,90

Os modelos elaborados no estudo 4 em diferentes cenários de inclinação do terreno têm os seus resultados dispostos na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Secções finais e peso total da estrutura de cada modelo do Estudo 4 (*Slope* variável)

<i>Slope</i>		10°	5°	0°
Pilar [C]	Secção	200x3	200x3	200x3
	Comp. [m]	10,72	10,72	10,72
	Peso [kg]	83,83	83,83	83,83
Viga [C]	Secção	120x2,5	120x2	120x2
	Comp. [m]	24,96	24,96	24,96
	Peso [kg]	123,05	99,59	99,59
Escora [Ω]	Secção	50x1,5	50x1,5	50x1,5
	Comp. [m]	24,16	24,16	24,16
	Peso [kg]	53,64	53,64	53,64
Travamento [Ω]	Secção	50x2	50x1,5	50x1,5
	Comp. [m]	16,00	13,60	13,54
	Peso [kg]	45,78	30,19	30,06
Madres [Ω]	Secção	50x2,5	50x2,5	50x2,5
	Comp. [m]	57,04	57,04	57,04
	Peso [kg]	209,91	209,91	209,91
Peso TOTAL [kg]		516	477	477

O fato relevante deste estudo é a ausência de modificação da estrutura quando implantada em um terreno plano e quando implantada num terreno com inclinação de 5°.

Nota-se que no modelo de maior inclinação do terreno, houve necessidade de aumentar a secção das vigas e dos travamentos, além de acrescentar mais um apoio com contraventamento inclinado para que a reação de tração não ultrapassasse o limite estipulado. Tais alterações levaram a um acréscimo de 8% do peso total da estrutura, ou seja, um aumento de 60€ no custo final em relação aos demais modelos.

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho alcançou o seu principal objetivo de avaliar e quantificar a influência de cada parâmetro envolvente no projeto da estrutura suporte de painéis fotovoltaicos utilizada em parques solares. As conclusões deste documento auxiliam na pesquisa prévia do projetista em busca da solução ótima para as diversas situações de implantação da estrutura.

Por serem estruturas compostas por perfis de aço enformado a frio, possuem características peculiares em sua análise devido a sua esbelteza, a demandar verificações de segurança adicionais que são expostas neste documento. Vale ressaltar que tais verificações não são realizadas de maneira automática pelo *software* utilizado e portanto exigiu a elaboração de folhas de cálculo tendo em conta os coeficientes do EC3 (1-1) e EC3 (1-3). Nesse sentido, em estudos futuros seria interessante a elaboração de um programa que realize automaticamente o cálculo das propriedades efetivas de forma exata.

Apesar de ser uma tecnologia relativamente nova, a produção de energia solar está a ser aplicada em larga escala em âmbito mundial e por isso é de grande relevância mencionar sobre a ausência de uma metodologia de determinação da ação do vento específica para estruturas suporte de painéis fotovoltaicos no Eurocódigo. A carência deste recurso de uma forma padronizada faz com que a caracterização da carga do vento varie de acordo com o projetista e sua interpretação do código. Portanto, sendo a ação do vento condicionante no dimensionamento desse tipo de estrutura pela sua característica de leveza, o dimensionamento fica sujeito à diferentes versões conforme a compreensão do leitor da norma.

A norma americana é a mais atualizada na determinação da ação do vento em painéis fotovoltaicos e esta é tratada neste documento, além da apresentação de um estudo que utiliza testes em protótipos visando gerar coeficientes de acordo com a inclinação e localização do painel na mesa. Foi possível analisar que os coeficientes do Eurocódigo são inferiores em comparação com os obtidos em ensaios de túnel de vento, indicando um subdimensionamento segundo o código em termos de danos locais.

Inicialmente era pretendido realizar uma comparação entre o código americano e europeu a fim de chegar em resultados finais de carga de vento em estruturas solares e analisar qual dos dois é mais conservativo, como tal análise não foi feita no presente estudo seria interessante a realização da mesma em trabalhos de continuação.

Em âmbito do estudo paramétrico, através da obtenção do peso total de cada estrutura modelada no *Robot Structural Analysis*, foi possível concluir sobre a relevância da alteração dos principais parâmetros do tipo de estrutura em questão. A partir da proporcionalidade direta entre a inclinação dos painéis e o valor da carga do vento, o *tilt* foi o parâmetro mais influente na quantidade de aço da estrutura, assim como o valor da velocidade base do vento que varia de acordo com a localização do projeto.

Na análise da influência da resistência à tração do solo, a partir da necessidade de acrescentar pilares devido à limitação da reação nos apoios, foi possível concluir sobre a possibilidade de acrescentar pilares para que a verificação de encurvadura lateral seja cumprida sem aumentar de forma significativa o peso da estrutura. Em alternativa à implantação de travamentos à meia altura dos pilares, que pode representar certa dificuldade na montagem, a utilização de mais pilares e vãos menores viabiliza a redução de secções nos demais elementos, como na madre que possui a maior porcentagem de participação no peso total da estrutura.

Para além disso, o estudo esclareceu sobre a ausência de influência das baixas inclinações do terreno sobre a quantidade de aço final da estrutura. Como embasamento, a modelação foi feita em três níveis de *slope*, no qual o valor de 5° resultou num modelo idêntico ao do terreno plano, enquanto a maior inclinação de 10° apresentou um aumento de menos de um décimo no peso total. Dessa maneira, constatou-se que a inclinação do terreno não possui relevância significativa na estrutura final.

Em relação à trabalhos futuros, seria interessante realizar a mesma análise com uma gama maior de valores de inclinação a fim de estipular um limite em que o *slope* passa a ser relevante no dimensionamento. Além disso, se faz determinante abranger os demais parâmetros estudados, nomeadamente, o *tilt*, a carga do vento e a resistência do solo, em diversas combinações a fim de estabelecer uma ordem das situações a nível de casos mais a menos críticos.

Outra proposta interessante para trabalhos futuros, seria a realização do mesmo estudo paramétrico com mais possibilidades de configurações da estrutura solar: painéis na vertical ou na horizontal e pórticos monoposte ou biposte. É relevante verificar em que situações de projeto a utilização do sistema de dois pilares é mais vantajosa que de apenas um pilar com duas escoras. Além disso, também seria interessante o estudo sobre a relevância da altura mínima ao solo no peso final da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEA's Global Energy CO2 Status Report - www.iea.org (Acesso: Maio de 2021)
- [2] Lameira V., Quelhas O., *O setor elétrico português: uma visão crítica*. Revista Eletrônica Sistema&Gestão, 2011, p. 201-209, Universidade Federal Fluminense/ Instituto de Geociências, Niterói, RJ, Brasil.
- [3] IEA's World Energy Outlook - www.iea.org (Acesso: Maio de 2021)
- [4] Profiling the top five largest solar power plants in the world - www.nsenergybusiness.com (Acesso: Maio de 2021)
- [5] Painéis fotovoltaicos e suas diversas aplicações - www.portal-energia.com (Acesso: Maio de 2021)
- [6] Apresentação sobre painéis fotovoltaicos do autor Rodger Booker - slideplayer.com (Acesso: Abril 2021)
- [7] Website do Estádio Mineirão, Belo Horizonte, MG, Brasil - estadiomineirao.com.br (Acesso: Maio 2021)
- [8] Tyagi, V.V., et al., *Progress in solar PV technology: Research and achievement*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.
- [9] Célula solar fotovoltaica - <https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html> (Acesso: Abril 2021)
- [10] ALTENER, *Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação*, 2004.
- [11] Proença E., *A Energia Solar Fotovoltaica em Portugal*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2007.
- [12] Price Index by pvXchange - www.pv-magazine.com (Acesso: Maio de 2021)
- [13] Scharmer, K and J. Greif, Eds, "Atlas Europeu de Radiação Solar", 2000.
- [14] Vantagens e desvantagens das baterias nos sistemas solares fotovoltaicos - www.portal-energia.com (Acesso: Maio de 2021)
- [15] International Energy Agency , PVPS Annual Report 2020
- [16] Yamazaki Mazak and Cleantech Solar celebrate the commissioning of brand-new 1.6MWp rooftop solar PV system - www.eco-business.com (Acesso: Maio de 2021)
- [17] Toyota to live-trial solar-powered cars on Japan's roads www.smart-energy.com (Acesso: Maio de 2021)
- [18] Growing in the shade of solar power www.laborelec.com (Acesso: Maio de 2021)
- [19] Exemplos de aplicação de painéis fotovoltaicos - www.pradecon.pt
- [20] Brazilian hydropower dam to host 30 MW of floating solar www.pv-magazine.com
- [21] Baptista A., *Verificação de Segurança de Perfis de Aço Enformado a Frio com Secção em C*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia e Estruturas, Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [22] Yu, W.W., *Cold-Formed Steel Structures*, in *Structural Engineering Handbook*, C. Wai-Fah, Editor. 1999.

- [23] Interfaces Aço-Concreto, Instituto Brasileiro de Siderurgia, Centro Brasileiro da Construção em Aço, Rio de Janeiro (Brasil), 2006
- [24] www.alibaba.com/product-detail/Galvanized-steel-helical-pilings-pile-foundation
- [25] Norma Portuguesa - "Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas, Comité Europeu de Normalização, 2009.
- [26] Norma Portuguesa - "Eurocódigo 1 – Ações em estruturas - Parte 1-1: “Ações gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios”, Comité Europeu de Normalização, 2009.
- [27] Norma Portuguesa - "Eurocódigo 1 – Ações em estruturas - Parte 1-3: “Ações gerais – Ações da neve”, Comité Europeu de Normalização, 2009.
- [28] A. López, V. E. Parnás. *Wind tunnel experiment of wind loads on ground mounted photovoltaic solar panels*. Revista ingeniería de construcción, 05/03/2019, SciELO, Chile.
- [29] Norma Portuguesa - "Eurocódigo 1 – Ações em estruturas - Parte 1-4: “Ações gerais – Ações do vento”, Comité Europeu de Normalização, 2010.
- [30] Ground-mounted solar power plants: Why static loads aren't enough - www.cppwind.com (Acesso: Abril de 2020)
- [31] ASCE 7-10 Wind Load Calculation Example - www.skyciv.com (Acesso: Abril de 2021)
- [32] SEAOC Wind Design for Solar Arrays PV2-2017 is now www.seaoc.org
- [33] Norma Portuguesa - "Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios", Comité Europeu de Normalização, 2010.
- [34] European Committee for Standardization, CEN: "Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting", 2004, EN 1993-1-3.
- [35] European Committee for Standardization, CEN: "Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements", English Version: EN1993-1-5 (2006).
- [36] V. Azevedo, *Dimensionamento de Uma Cobertura em Elementos Estruturais de Aço Enformados a Frio*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2015.
- [37] CMM (Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista), *Manual de Dimensionamento de Estruturas em Aço Inoxidável - Versão Portuguesa da 4ª edição*. Editor Aldina Santiago, 2017.
- [38] HAUKSSON H., VILHJÁLMSSON J., *Lateral-Torsional Buckling of Steel Beams with Open Cross Section*, Dissertação de Mestrado, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2014.

ANEXOS

Anexo 3. Catálogo de secções de aço enformado a frio *Perfil Norte*

Anexo 4. Combinações introduzidas no Robot

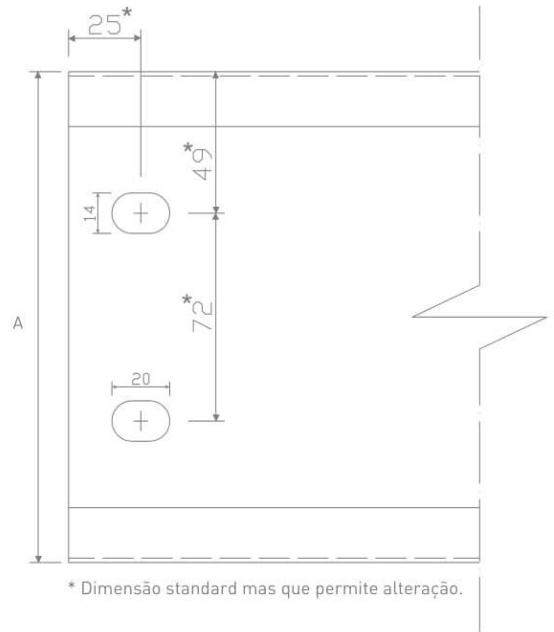
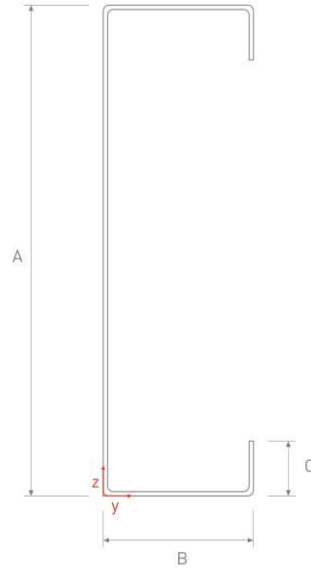
Anexo 5.1. Cargas introduzidas no Robot em cada modelo

Anexo 5.2. Esforços máximos em cada elemento das estruturas do Estudo 1

Anexo 5.3. Folhas de cálculo - Verificação de Segurança dos Modelos

Anexo 3. Catálogo de secções de aço enformado a frio *Perfil Norte*

PERFIL C



REF	DIMENSÕES (mm)				CG (cm)		AT (cm²)	PESO (kg/m)	IY (cm⁴)		IZ (cm⁴)	IT (cm⁴)	AP SU
	Esp.	A	B	C	Y ₆	Z ₆			I _{yy}	I _{zz}			
C100	1.5	100	42	19	1.50	5.00	3.15	2.48	48.26	8.47	0.02	0.424	
	2.0	100	42	19	1.50	5.00	4.16	3.26	62.79	10.85	0.06	0.420	
	2.5	100	42	19	1.50	5.00	5.14	4.03	76.57	13.03	0.11	0.416	
	3.0	100	42	19	1.50	5.00	6.09	4.78	89.61	15.00	0.18	0.412	
C120	1.5	120	52	19	1.77	6.00	3.75	2.95	84.83	14.90	0.03	0.504	
	2.0	120	52	19	1.77	6.00	4.96	3.89	110.83	19.22	0.07	0.500	
	2.5	120	52	19	1.77	6.00	6.14	4.82	135.72	23.22	0.13	0.496	
	3.0	120	52	19	1.77	6.00	7.29	5.72	159.52	26.93	0.22	0.492	
C140	1.5	140	43	18	1.29	7.00	3.75	2.95	107.89	9.78	0.03	0.504	
	2.0	140	43	18	1.29	7.00	4.96	3.89	140.97	12.54	0.07	0.500	
	2.5	140	43	18	1.29	7.00	6.14	4.82	172.66	15.06	0.13	0.496	
	3.0	140	43	18	1.29	7.00	7.29	5.72	202.96	17.36	0.22	0.492	
C170	1.5	170	52	19	1.49	8.50	4.50	3.54	192.22	16.70	0.03	0.604	
	2.0	170	52	19	1.49	8.50	5.96	4.68	252.03	21.55	0.08	0.600	
	2.5	170	52	19	1.49	8.50	7.39	5.80	309.75	26.05	0.15	0.596	
	3.0	170	52	19	1.49	8.50	8.79	6.90	365.40	30.21	0.26	0.592	
C200	1.5	200	52	19	1.36	10.00	4.95	3.89	283.09	17.52	0.04	0.664	
	2.0	200	52	19	1.36	10.00	6.56	5.15	371.70	22.60	0.09	0.660	
	2.5	200	52	19	1.36	10.00	8.14	6.39	457.48	27.32	0.17	0.656	
	3.0	200	52	19	1.36	10.00	9.69	7.61	540.47	31.69	0.29	0.652	
C220	1.5	220	64,5	19	1.70	11.00	5.63	4.42	400.68	30.19	0.04	0.754	
	2.0	220	64,5	19	1.70	11.00	7.46	5.85	527.11	39.15	0.10	0.750	
	2.5	220	64,5	19	1.70	11.00	9.26	7.27	650.02	47.58	0.19	0.746	
	3.0	220	64,5	19	1.70	11.00	11.04	8.67	769.44	55.49	0.33	0.742	
C240	1.5	240	54,5	19	1.30	12.00	5.63	4.42	449.94	20.61	0.04	0.754	
	2.0	240	54,5	19	1.30	12.00	7.46	5.85	591.78	26.61	0.10	0.750	
	2.5	240	54,5	19	1.30	12.00	9.26	7.27	729.62	32.21	0.19	0.746	
	3.0	240	54,5	19	1.30	12.00	11.04	8.67	863.48	37.40	0.33	0.742	
C270	1.5	270	61	29	1.40	13.50	6.27	5.16	633.97	27.89	0.05	0.880	
	2.0	270	61	29	1.40	13.50	8.32	6.84	834.98	36.11	0.11	0.876	
	2.5	270	61	29	1.40	13.50	10.34	8.51	1030.89	43.83	0.22	0.872	
	3.0	270	61	29	1.40	13.50	12.33	10.15	1221.76	51.05	0.37	0.868	
C300	1.5	300	77	19	1.80	15.00	7.20	5.66	925.43	50.56	0.05	0.964	
	2.0	300	77	19	1.80	15.00	9.56	7.50	1220.87	65.81	0.13	0.960	
	2.5	300	77	19	1.80	15.00	11.89	9.33	1509.86	80.29	0.25	0.956	
	3.0	300	77	19	1.80	15.00	14.19	11.14	1792.45	94.01	0.43	0.952	

As características mecânicas das peças correspondem à secção no ponto médio das mesmas.

Legenda

CG - Centro de gravidade

AT - Área da secção transversal

IY - Inércia da secção em torno do eixo local "y"

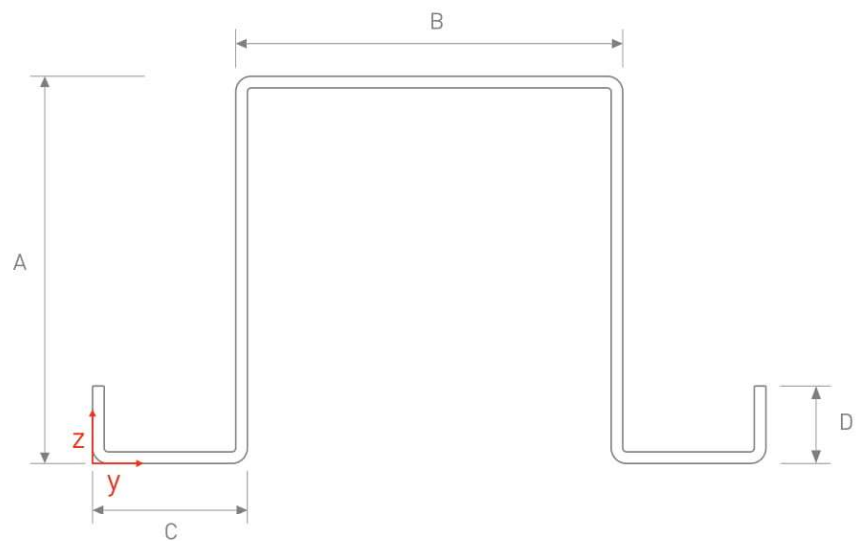
IZ - Inércia da secção em torno do eixo local "z"

IT - Inércia à torção

AP- Área de pintura

SU - Superfície unitária

PERFIL Ω



REF	DIMENSÕES					CG		AT	PESO	IY	IZ	IT	AP
	(mm)					(cm)		[cm²]	(kg/m)	lyy	lzz	It	SU
	Esp.	A	B	C	D	Y _G	Z _G			[cm⁴]	[cm⁴]	[cm⁴]	[m²/m]
Ω50	1.5	50	50	20	10	4.35	2.47	2.89	2.27	10.69	20.13	0.02	0.388
	2.0	50	50	20	10	4.30	2.48	3.78	2.96	13.64	25.46	0.05	0.382
	2.5	50	50	20	10	4.25	2.49	4.63	3.63	16.30	30.16	0.10	0.375
	3.0	50	50	20	10	4.20	2.50	5.44	4.27	18.67	34.27	0.16	0.369
Ω100	1.5	100	60	20	10	4.85	5.09	4.39	3.44	57.35	28.95	0.03	0.588
	2.0	100	60	20	10	4.80	5.11	5.78	4.53	74.32	36.98	0.08	0.582
	2.5	100	60	20	10	4.75	5.12	7.13	5.60	90.24	44.27	0.15	0.575
	3.0	100	60	20	10	4.70	5.14	8.44	6.63	105.15	50.84	0.25	0.569
Ω130	1.5	130	60	20	10	4.85	6.60	5.29	4.15	110.46	34.25	0.04	0.708
	2.0	130	60	20	10	4.80	6.61	6.98	5.48	143.77	43.90	0.09	0.702
	2.5	130	60	20	10	4.75	6.63	8.63	6.77	175.38	52.73	0.18	0.695
	3.0	130	60	20	10	4.70	6.65	10.24	8.04	205.29	60.78	0.31	0.689

Legenda

CG - Centro de gravidade

AT - Área da secção transversal

IY - Inércia da secção em torno do eixo local "y"

IZ - Inércia da secção em torno do eixo local "z"

IT - Inércia à torção

AP - Área de pintura

SU - Superfície unitária

As características mecânicas das peças correspondem à secção no ponto médio das mesmas.

Anexo 4. Combinações introduzidas no Robot

COMBINAÇÕES DO MODELO 1 (Dimensionamento das madres)		
Combinações	Nome	Tipo de Análise
6	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * SN	Combinação Linear
7	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WPCp,net]	Combinação Linear
8	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WSCp,net]	Combinação Linear
9	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * WPCp,net	Combinação Linear
10	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WPCp,net]	Combinação Linear
11	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * WSCp,net	Combinação Linear
12	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WSCp,net]	Combinação Linear
13	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * SN	Combinação Linear
14	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WPCp,net]	Combinação Linear
15	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WSCp,net]	Combinação Linear
16	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * WPCp,net	Combinação Linear
17	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * WSCp,net	Combinação Linear
18	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WSCp,net]	Combinação Linear
19	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * SN	Combinação Linear
20	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [SN + 0.60 * WPCp,net]	Combinação Linear
21	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [SN + 0.60 * WSCp,net]	Combinação Linear
22	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * WPCp,net	Combinação Linear
23	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [0.50 * SN + WPCp,net]	Combinação Linear
24	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * WSCp,net	Combinação Linear
25	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [0.50 * SN + WSCp,net]	Combinação Linear

COMBINAÇÕES DO MODELO 2 (Dimensionamento das vigas, escoras e pilares)		
Combinações	Nome	Tipo de Análise
8	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * SN	Combinação Linear
9	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WP0]	Combinação Linear
10	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WP180]	Combinação Linear
11	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WS0]	Combinação Linear
12	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WS180]	Combinação Linear
13	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * WP0	Combinação Linear
14	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WP0]	Combinação Linear
15	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * WP180	Combinação Linear
16	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WP180]	Combinação Linear
17	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * WS0	Combinação Linear
18	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WS0]	Combinação Linear
19	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * WS180	Combinação Linear
20	ULS: 1.22 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WS180]	Combinação Linear
21	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * SN	Combinação Linear
22	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WP0]	Combinação Linear
23	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WP180]	Combinação Linear
24	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * SN	Combinação Linear
25	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WP0]	Combinação Linear
26	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WP180]	Combinação Linear
27	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WS0]	Combinação Linear
28	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [SN + 0.60 * WS180]	Combinação Linear
29	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * WP0	Combinação Linear
30	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WP0]	Combinação Linear
31	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * WP180	Combinação Linear
32	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WP180]	Combinação Linear
33	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * WS0	Combinação Linear
34	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WS0]	Combinação Linear
35	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * WS180	Combinação Linear
36	ULS: 1.00 * DL + 1.35 * [0.50 * SN + WS180]	Combinação Linear
37	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * SN	Combinação Linear
38	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [SN + 0.60 * WP0]	Combinação Linear
39	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [SN + 0.60 * WP180]	Combinação Linear
40	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [SN + 0.60 * WS0]	Combinação Linear
41	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [SN + 0.60 * WS180]	Combinação Linear
42	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * WP0	Combinação Linear
43	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [0.50 * SN + WP0]	Combinação Linear
44	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * WP180	Combinação Linear
45	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [0.50 * SN + WP180]	Combinação Linear
46	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * WS0	Combinação Linear
47	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [0.50 * SN + WS0]	Combinação Linear
48	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * WS180	Combinação Linear
49	SLS: 1.00 * DL + 1.00 * [0.50 * SN + WS180]	Combinação Linear

Anexo 5.1. Cargas introduzidas no Robot em cada modelo

CARGAS UTILIZADAS NOS MODELOS DE ESTRUTURAS DO ESTUDO 1

Cargas fixas em todos modelos (pZ global)

PP Painéis	-0,110	kN/m
Neve	-0,086	kN/m
*aplicadas em todas as madres		

Cargas variáveis do modelo 1 (Cp,net) em kN/m (pY local)

Tilt		25°	20°	15°	10°
Pressão	A	-1,156	-0,987	-0,841	-0,721
	B	-6,050	-5,380	-3,466	-3,081
	C	-0,259	-0,238	-0,211	-0,188
Sucção	A	1,503	1,277	1,081	0,901
	B	6,245	5,194	3,081	2,567
	C	0,361	0,328	0,293	0,246
A: aplicada em todas madres internas B: aplicada em todas madres externas C: aplicada nas madres internas 1 e 4					

Cargas variáveis do modelo 2 (Cf)

Tilt			25°		20°		15°		10°	
Carga Distribuída pY local [kN/m]	Pressão	Madre 1 e 4	-0,687		-0,549		-0,481		-0,344	
		Madre 2 e 3	-0,628		-0,503		-0,440		-0,314	
	Sucção	Madre 1 e 4	1,100		-0,893		-0,756		-0,618	
		Madre 2 e 3	1,005		-0,816		-0,691		-0,565	
Carga Nodal FY e FZ [kN]			± FZ	± FY	± FZ	± FY	± FZ	± FY	± FZ	± FY
	Pressão	Vigas externas	0,628	0,293	0,730	0,266	0,821	0,220	0,597	0,105
		Vigas internas	1,257	0,586	1,460	0,531	1,641	0,440	1,195	0,211
	Sucção	Vigas externas	1,006	0,469	1,186	0,432	1,290	0,346	1,076	0,190
		Vigas internas	2,011	0,938	2,372	0,863	2,579	0,691	2,151	0,379

CARGAS UTILIZADAS NOS MODELOS DE ESTRUTURAS DO ESTUDO 2

Cargas fixas em todos modelos (pZ global)

PP Painéis	-0,110	kN/m
Neve	0,081	kN/m
*aplicadas em todas as madres		

Cargas variáveis do modelo 1 (Cp,net) em kN/m (pY local)

País de referência		FRANÇA	PORTUGAL	ALBÂNIA
Pressão	A	-0,866	-1,092	-1,348
	B	-4,291	-5,713	-7,054
	C	-0,194	-0,245	-0,303
Sucção	A	1,126	1,420	1,753
	B	4,429	5,898	7,281
	C	0,270	0,341	0,421
A: aplicada em todas madres internas B: aplicada em todas madres externas C: aplicada nas madres internas 1 e 4				

Cargas variáveis do modelo 2 (Cf)

País de referência			FRANÇA		PORTUGAL		ALBÂNIA	
Carga Distribuída pY local [kN/m]	Pressão	Madre 1 e 4	-0,687		-0,549		-0,481	
		Madre 2 e 3	-0,628		-0,503		-0,440	
	Sucção	Madre 1 e 4	1,100		-0,893		-0,756	
		Madre 2 e 3	1,005		-0,816		-0,691	
Carga Nodal FY e FZ [kN]			± FZ	± FY	± FZ	± FY	± FZ	± FY
	Pressão	Vigas externas	0,657	0,306	0,594	0,277	0,641	0,299
		Vigas internas	1,313	0,612	1,187	0,554	1,282	0,598
	Sucção	Vigas externas	1,051	0,490	0,950	0,443	1,026	0,478
		Vigas internas	2,101	0,980	1,899	0,886	2,052	0,957

CARGAS UTILIZADAS NOS MODELOS DE ESTRUTURAS DO ESTUDO 3

Cargas fixas em todos modelos (pZ global)

PP Painéis	0,110 kN/m
Neve	0,086 kN/m
*aplicadas em todas as madres	

Cargas variáveis do modelo 1 (Cp,net) em kN/m (pY local)

Resistência do solo (t)		10 kN	7,5 kN	5 kN
Pressão	A	-1,156	-1,156	-1,156
	B	-6,050	-6,050	-6,050
	C	-0,259	-0,259	-0,259
Sucção	A	1,503	1,503	1,503
	B	6,245	6,245	6,245
	C	0,361	0,361	0,361
A: aplicada em todas madres internas B: aplicada em todas madres externas C: aplicada nas madres internas 1 e 4			*Cargas iguais devido ao mesmo padrão de comprimento de madres seguido em todos modelos	

Cargas variáveis do modelo 2 (Cf)

Resistência do solo (t)			10 kN		7,5 kN		5 kN	
Carga Distribuída pY local [kN/m]	Pressão	Madre 1 e 4	-0,687		-0,687		-0,687	
		Madre 2 e 3	-0,628		-0,628		-0,628	
	Sucção	Madre 1 e 4	1,100		1,100		1,100	
		Madre 2 e 3	1,005		1,005		1,005	
Carga Nodal FY e FZ [kN]			± FZ	± FY	± FZ	± FY	± FZ	± FY
	Pressão	Vigas externas	0,628	0,293	0,628	0,293	0,440	0,205
		Vigas internas	1,257	0,586	1,257	0,586	0,880	0,410
	Sucção	Vigas externas	1,006	0,469	1,006	0,469	0,704	0,328
		Vigas internas	2,011	0,938	2,011	0,938	1,408	0,656

CARGAS UTILIZADAS NOS MODELOS DE ESTRUTURAS DO ESTUDO 4

Cargas fixas em todos modelos (pZ global)

PP Painéis	0,110	kN/m
Neve	0,086	kN/m
*aplicadas em todas as madres		

Cargas variáveis do modelo 1 (Cp,net) em kN/m (pY local)

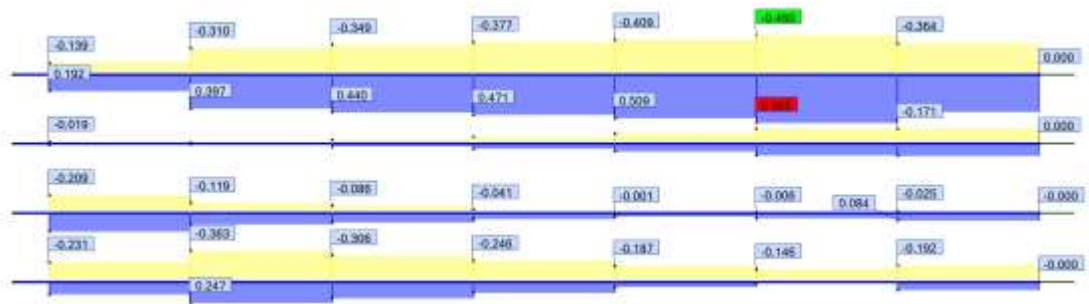
Slope		0°	5°	10°
Pressão	A	-1,156	-1,152	-1,139
	B	-6,050	-6,388	-7,692
	C	-0,259	-0,258	-0,256
Sucção	A	1,503	1,498	1,480
	B	6,245	6,594	7,941
	C	0,361	0,360	0,356
A: aplicada em todas madres internas B: aplicada em todas madres externas C: aplicada nas madres internas 1 e 4		*Cargas ligeiramente diferentes devido à pequenas diferenças nos comprimento de madre dos modelos		

Cargas variáveis do modelo 2 (Cf)

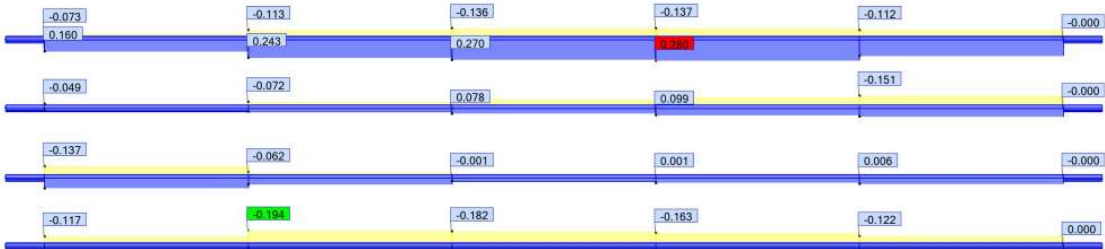
Slope			0°		5°		10°	
Carga Distribuída pY local [kN/m]	Pressão	Madre 1 e 4	-0,687		-0,687		-0,687	
		Madre 2 e 3	-0,628		-0,628		-0,628	
	Sucção	Madre 1 e 4	1,100		1,100		1,100	
		Madre 2 e 3	1,005		1,005		1,005	
Carga Nodal FY e FZ [kN]			± FZ	± FY	± FZ	± FY	± FZ	± FY
	Pressão	Vigas externas	0,628	0,293	0,628	0,293	0,628	0,293
		Vigas internas	1,257	0,586	1,257	0,586	1,257	0,586
	Sucção	Vigas externas	1,006	0,469	1,006	0,469	1,006	0,469
		Vigas internas	2,011	0,938	2,011	0,938	2,011	0,938

Anexo 5.2. Esforços máximos em cada elemento das estruturas do Estudo 1

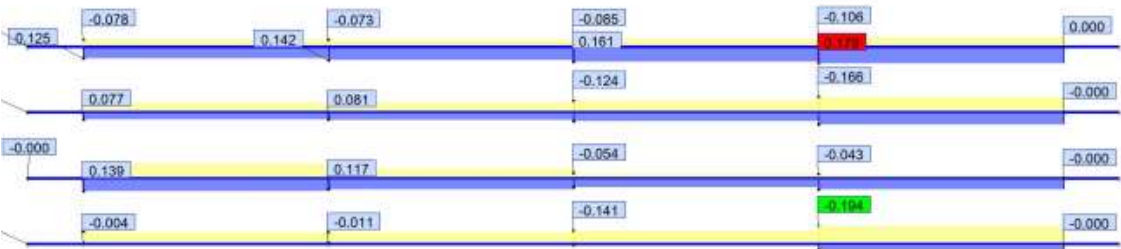
MADRES – ESFORÇO AXIAL



Tilt 25° - Esforço Axial máximo local nas madres

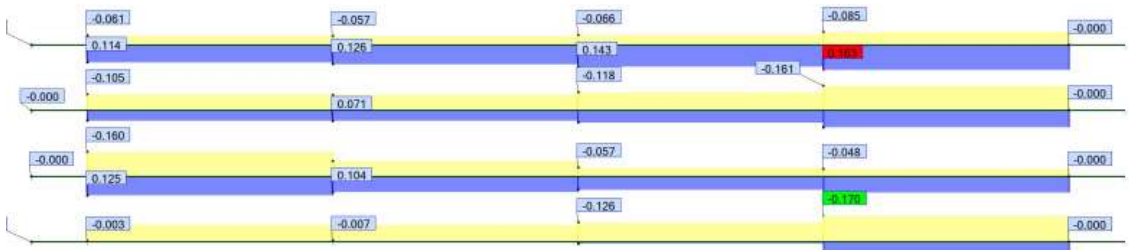


Tilt 20° - Esforço Axial máximo local nas madres



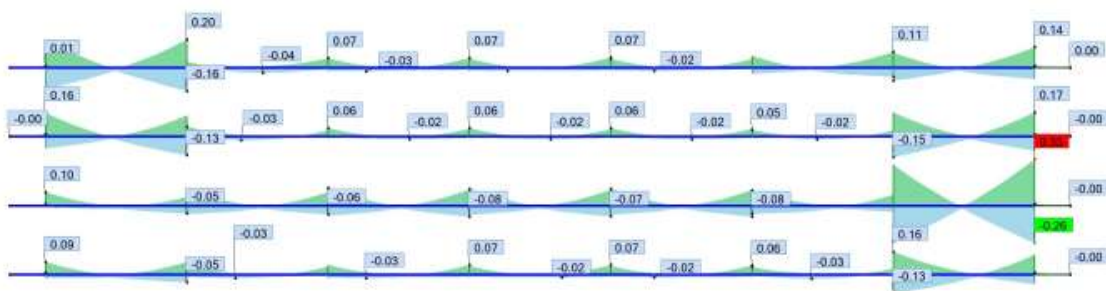
Tilt 15°

- Esforço Axial máximo local nas madres

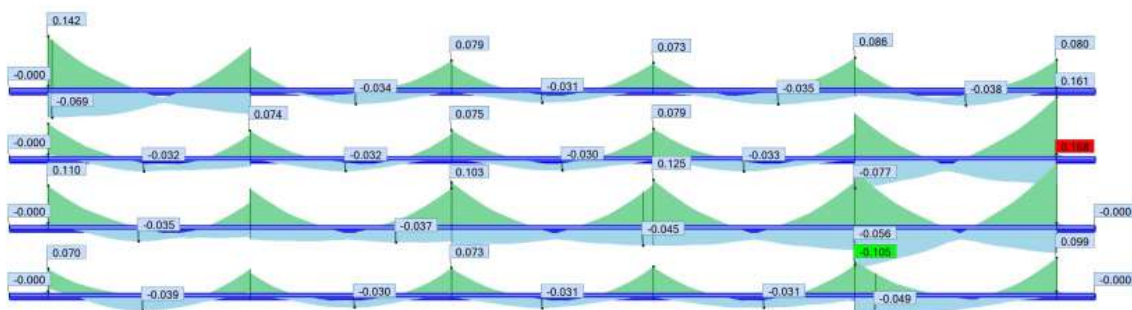


Tilt 10° - Esforço Axial máximo local nas madres

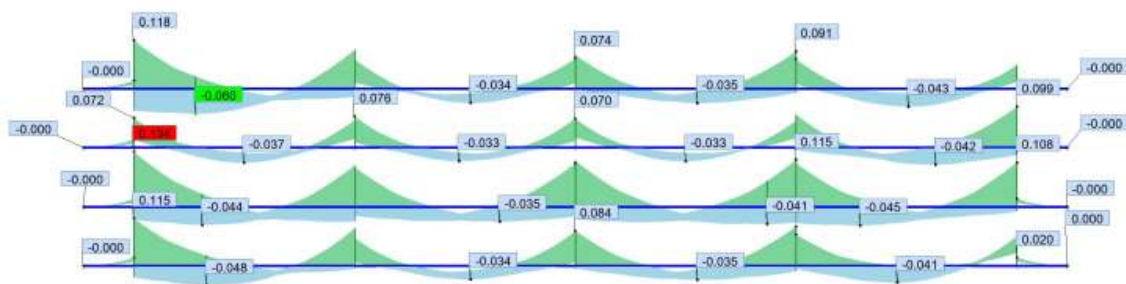
MADRES – MOMENTO EM Y



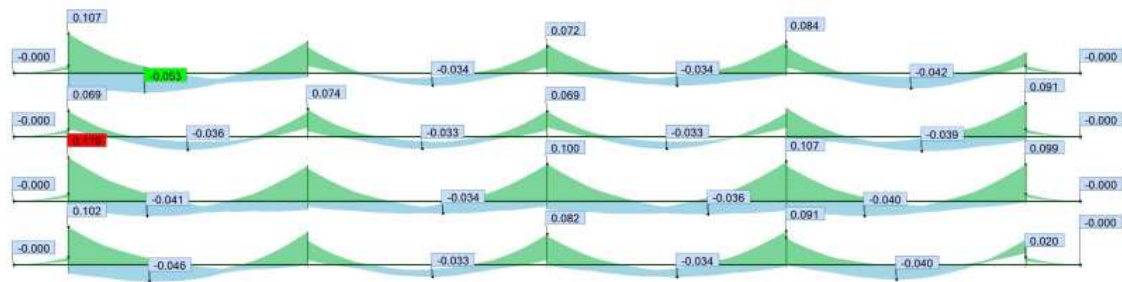
Tilt 25° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nas madres



Tilt 20° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nas madres

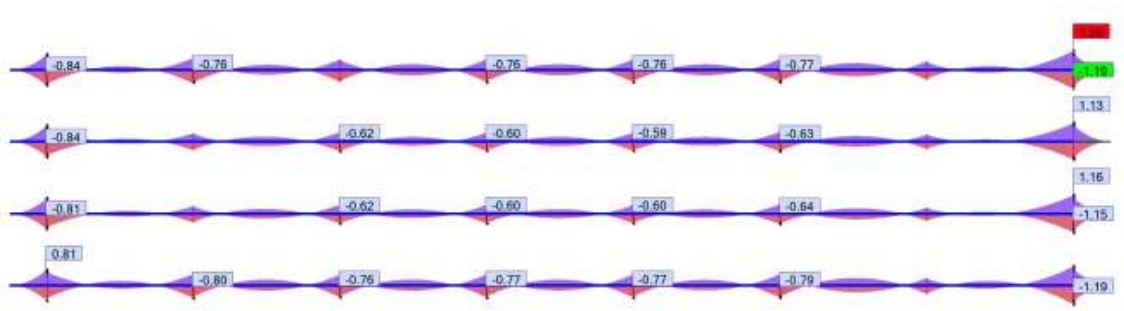


Tilt 15° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nas madres

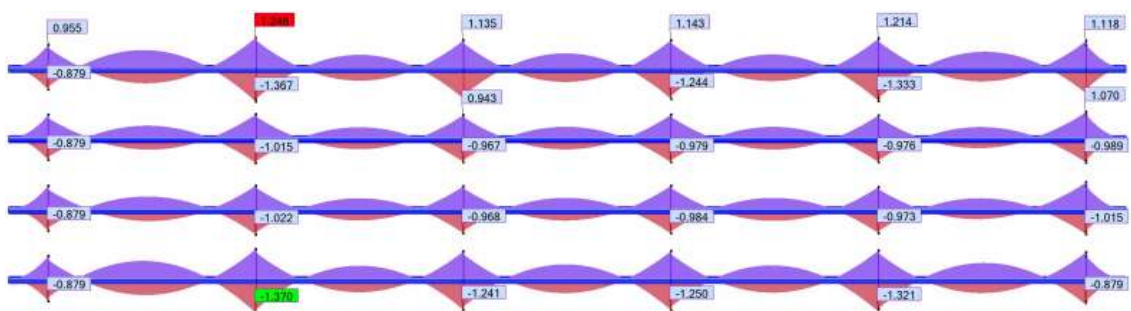


Tilt 10° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nas madres

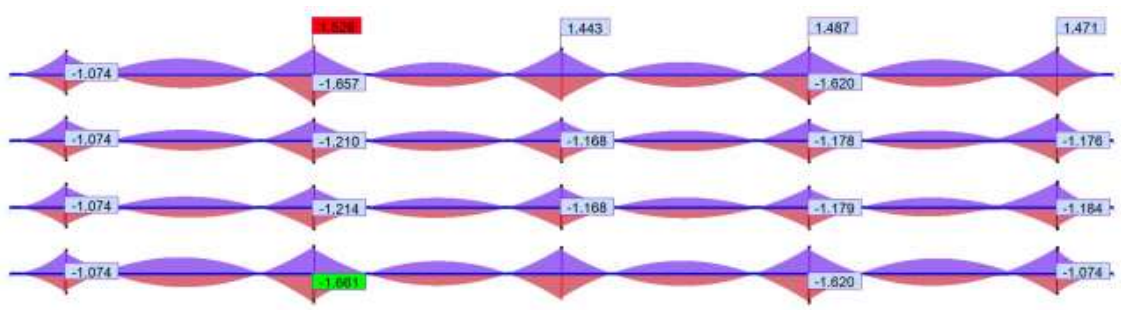
MADRES – MOMENTO EM Z



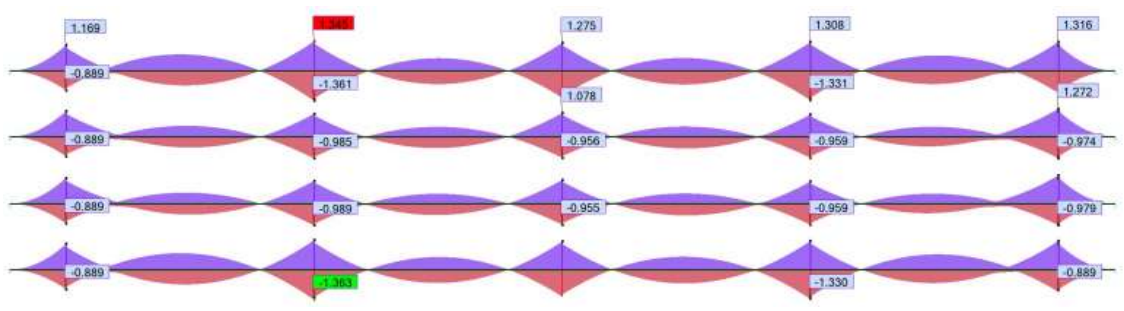
Tilt 25° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nas madres



Tilt 20° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nas madres

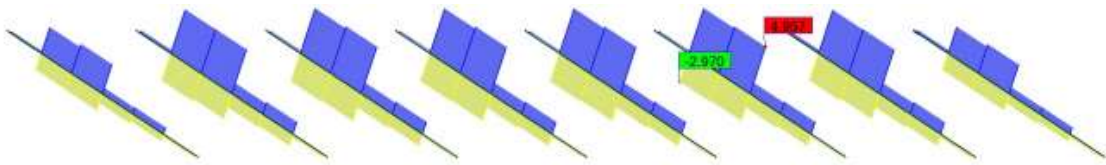


Tilt 15° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nas madres

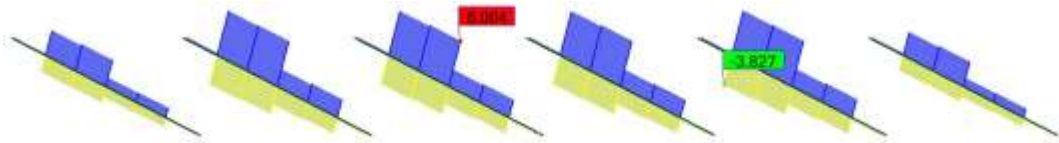


Tilt 10° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nas madres

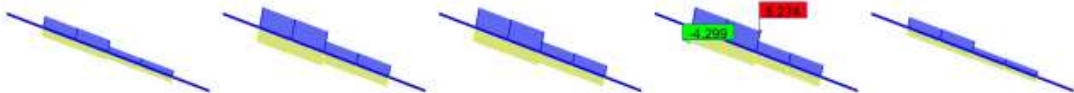
VIGAS – ESFORÇO AXIAL



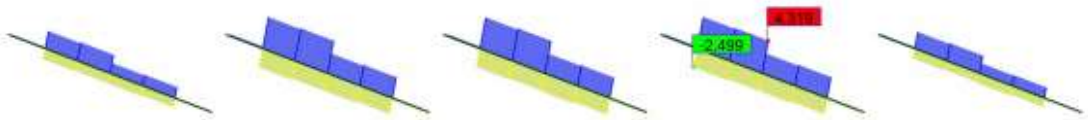
Tilt 25° - Esforço Axial máximo local nas vigas



Tilt 20° - Esforço Axial máximo local nas vigas

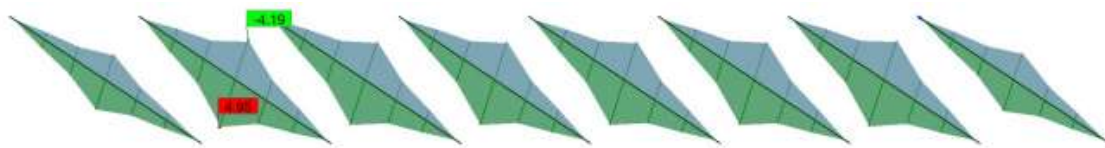


Tilt 15° - Esforço Axial máximo local nas vigas



Tilt 10° - Esforço Axial máximo local nas vigas

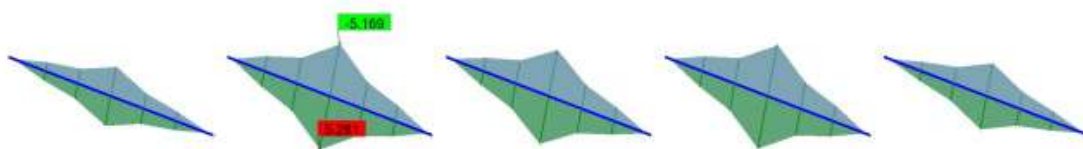
VIGAS – MOMENTO EM Y



Tilt 25° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nas vigas



Tilt 20° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nas vigas

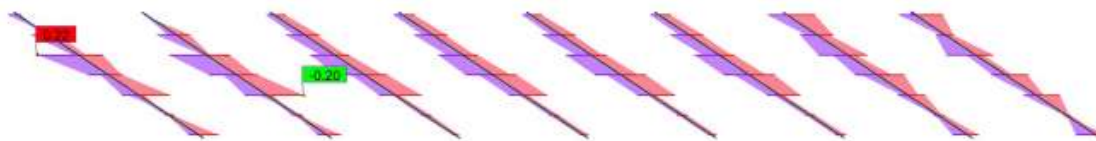


Tilt 15° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nas vigas



Tilt 10° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nas vigas

VIGAS – MOMENTO EM Z



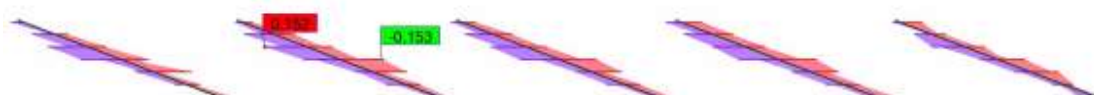
Tilt 25° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nas vigas



Tilt 20° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nas vigas

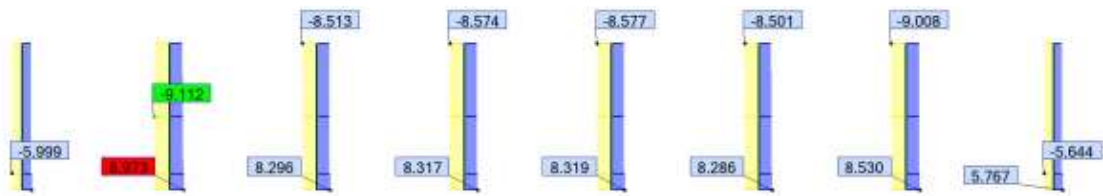


Tilt 15° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nas vigas

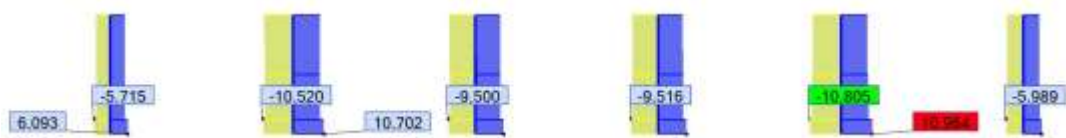


Tilt 10° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nas vigas

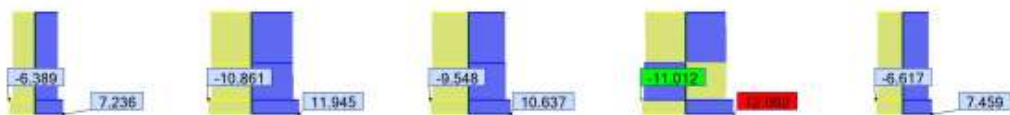
PILARES – ESFORÇO AXIAL



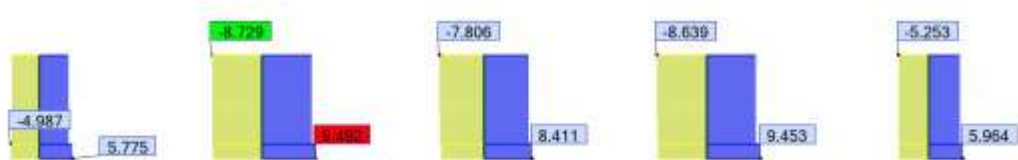
Tilt 25° - Esforço Axial máximo local nos pilares



Tilt 20° - Esforço Axial máximo local nos pilares

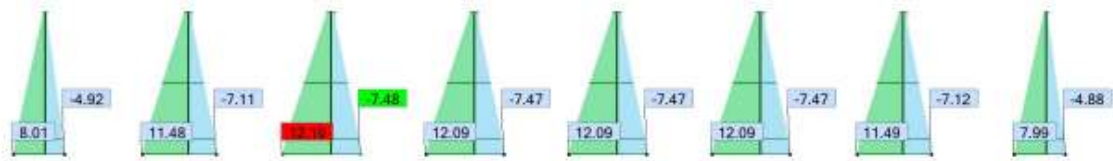


Tilt 15° - Esforço Axial máximo local nos pilares



Tilt 10° - Esforço Axial máximo local nos pilares

PILARES – MOMENTO EM Y



Tilt 25° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nos pilares



Tilt 20° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nos pilares

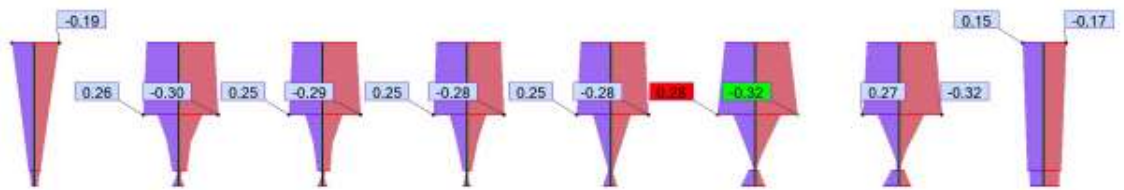


Tilt 15° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nos pilares

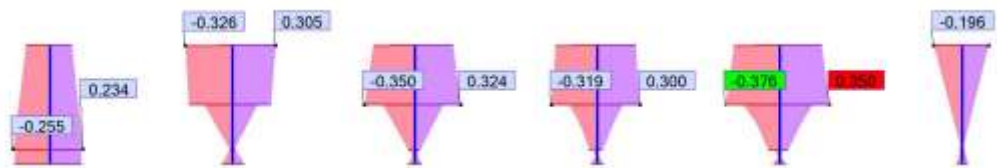


Tilt 10° - Momento fletor em torno do eixo y máximo local nos pilares

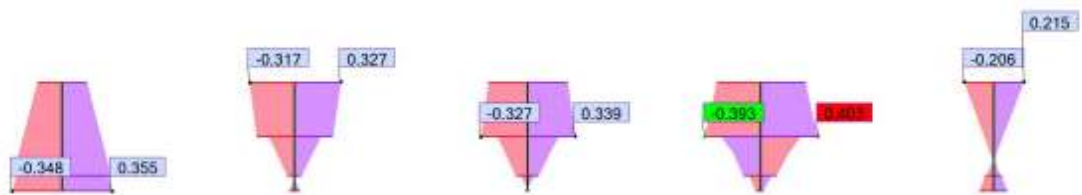
PILARES – MOMENTO EM Z



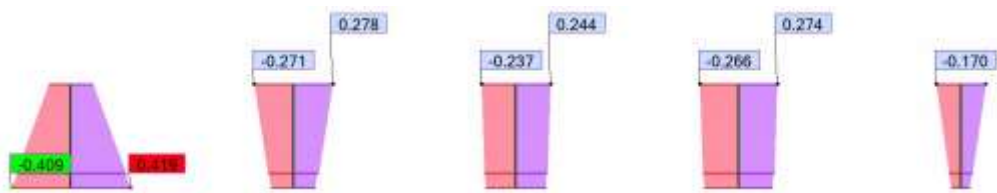
Tilt 25° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nos pilares



Tilt 20° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nos pilares



Tilt 15° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nos pilares



Tilt 10° - Momento fletor em torno do eixo z máximo local nos pilares

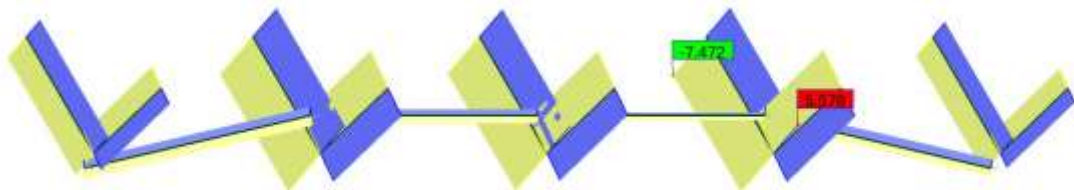
ESCORAS – ESFORÇO AXIAL



Tilt 25° - Esforço Axial máximo local nas escoras



Tilt 20° - Esforço Axial máximo local nas escoras



Tilt 15° - Esforço Axial máximo local nas escoras



Tilt 10° - Esforço Axial máximo local nas escoras

Anexo 5.3. Folhas de cálculo - Verificação de Segurança dos Modelos

ESTUDO 1 - MODELO TILT 25° (7 PILARES) - PILAR

Secção C 200x3	
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,27E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,62E-05
Wz,eff [m3]	8,53E-06
eNy [m]	2,46E-03
eNz [m]	2,71E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	11,428	Nc,Rd	290
My,ed	14,08	My,Rd	13
Mz,ed	0,34	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	1,09	-0,08	0,98

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,420
λz	0,603
λmax	0,603
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,83
χ (<1)	0,71
Nb,Rd [kN]	204,95
Ned/Nb,Rd	0,06

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	24,90
λLTz	0,346
λLTy	0,713
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,84
χ LT (<1)	0,78
Mb,Rd [kNm]	9,84
Med/Mb,Rd	1,43

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,104

Interação de Esforços na Secção			
Coef.	N	M	Soma
0,8	0,10	1,33	1,43

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,45		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,06	0,66	0,07	0,78
CmLT	26,87		0,06	1,43	0,07	1,56
kyy	0,46					
kyz	0,61					
kzy	1,00					
kzz	0,61					

ESTUDO 1 - MODELO TILT 25° (8 PILARES) - PILAR SEM TRAVAMENTO

Secção C 200x3	
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,52E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,91E-05
Wz,eff [m3]	8,58E-06
eNy [m]	2,02E-03
eNz [m]	2,30E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	9,146	Nc,Rd	298
My,ed	12,11	My,Rd	14
Mz,ed	0,12	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,87	-0,04	0,81

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,420
λz	0,603
λmax	0,603
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,83
χ (<1)	0,71
Nb,Rd [kN]	211,15
Ned/Nb,Rd	0,04

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	24,93
λLTz	0,347
λLTy	0,741
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,87
χ LT (<1)	0,76
Mb,Rd [kNm]	10,40
Med/Mb,Rd	1,16

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,104

Interação de Esforços na Secção				
	Coef.	N	M	Soma
	0,8	0,08	1,13	1,21

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,54	N	My	Mz	Soma	
Cmz	0,60	0,04	0,63	0,02	0,70	
CmLT	26,87	0,04	1,16	0,02	1,23	
kyy	0,54					
kzy	0,61					
kzy	1,00					
kzz	0,61					

ESTUDO 1 - MODELO TILT 25° (8 PILARES) - PILAR COM TRAVAMENTO

Secção C	200x3
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,21E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,55E-05
Wz,eff [m3]	8,52E-06
eNy [m]	2,57E-03
eNz [m]	2,82E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	9,052	Nc,Rd	287
My,ed	12,08	My,Rd	12
Mz,ed	0,27	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,96	-0,04	0,89

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,420
λz	0,603
λmax	0,603
λmax>0,2	
Dispensa Encurvadura	

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	95,29
λLTz	0,177
λLTy	0,361
λLTy>0,4	
Dispensa Encurvadura	

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,104

ESTUDO 1 - MODELO TILT 25° (8 PILARES) - VIGA

Secção C 120x2	
Classe 3	
A [m²]	5,08E-04
Aeff [m²]	5,08E-04
Iy [m4]	3,41E+01
Iz [m4]	4,76E-02
It [m4]	1,99E-02
Iw [m6]	6,57E-10
iy [m]	1,92E-05
iz [m]	5,90E-06
Wy,eff [m3]	1,92E-05
Wz,eff [m3]	5,90E-06
eNy [m]	0,00E+00
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	6,348	Nc,Rd	178
My,ed	4,13	My,Rd	7
Mz,ed	0,25	Mz,Rd	2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,01	0,61	-0,01	0,60

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
λ1	76,953
λy	0,272
λz	0,325
λmax	0,325
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,60
χ (<1)	0,91
Nb,Rd [kN]	160,92
Ned/Nb,Rd	0,04

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
Mcr [kNm]	40,54
λLTz	0,226
λLTy	0,407
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,62
χ LT (<1)	0,92
Mb,Rd [kNm]	6,20
Med/Mb,Rd	0,67

Coeficientes Mcr	
C1	1,00
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,041
yj [m]	-0,056

Interação de Esforços na Secção			
Coef.	N	M	Soma
0,8	0,08	0,72	0,80

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,71		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,04	0,48	0,07	0,59
CmLT	24,20		0,04	0,67	0,07	0,78
kyy	0,72					
kyz	0,60					
kzy	1,00					
kzz	0,60					

ESTUDO 1 - MODELO TILT 25° (8 PILARES) - ESCORA

Secção Ω	50x1,5
Classe 4	
A [m ²]	2,76E-04
Aeff [m ²]	1,48E-06
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,47E-02
It [m ⁴]	1,95E-02
Iw [m ⁶]	2,06E-10
Iy [m]	3,86E-06
iz [m]	3,98E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	1,65E-10
eNz [m]	0,00E+00

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,832
Lcr,y [m]	1,832
Lcr,z [m]	1,832
λ_1	76,953
λ_y	0,957
λ_z	1,212
λ_{max}	1,212
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,48
$\chi (<1)$	0,43
Nb,Rd [kN]	40,70
Ned/Nb,Rd	0,18

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	7,48	Nc,Rd	95,0
My,ed	0	My,Rd	1,4
Mz,ed	0	Mz,Rd	1,3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,06	0,01	0,00	0,06

Encurvadura lateral - Mb,Rd
NÃO APLICÁVEL

ESTUDO 1 - MODELO TILT 25° (8 PILARES) - MADRE

Secção Ω	50x2,5
Classe	3
A [m²]	4,50E-04
Aeff [m²]	0,00E+00
Iy [m4]	2,37E+01
Iz [m4]	2,41E-02
It [m4]	1,91E-02
Iw [m6]	9,27E-10
iy [m]	6,17E-06
iz [m]	6,23E-06
Wy,eff [m3]	0,00E+00
Wz,eff [m3]	0,00E+00
eNy [m]	2,62E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	0,565	Nc,Rd	157,5
My,ed	0,33	My,Rd	2,2
Mz,ed	1,2	Mz,Rd	2,2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,00	-0,12	0,53	0,41

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,900
Lcr,y [m]	1,900
Lcr,z [m]	1,900
λ_1	76,953
λ_y	1,023
λ_z	1,294
λ_{max}	1,294
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,61
$\chi (<1)$	0,39
Nb,Rd [kN]	61,64
Ned/Nb,Rd	0,01

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,900
Lcr,y [m]	1,900
Lcr,z [m]	1,900
Mcr [kNm]	10,17
λ_{LTz}	0,463
λ_{LTy}	0,461
$\lambda_{LTy} > 0,4$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ_{LT}	0,65
$\chi_{LT} (<1)$	0,90
Mb,Rd [kNm]	1,94
Med/Mb,Rd	0,17

Coeficientes Mcr	
C1	1,12
C2	0,45
C3	0,53
zg [m]	0,02
ys [m]	0,09
yj [m]	0,10

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,02	0,24	0,27

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,40
Cmz	0,60
CmLT	8,20
kyy	0,40
kyz	0,60
kzy	1,00
kzz	0,60

N	My	Mz	Soma
0,01	0,07	0,33	0,41
0,01	0,17	0,33	0,51

ESTUDO 1 - MODELO TILT 20° (6 PILARES) - PILAR SEM TRAVAMENTO

Secção C 200x3	
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,52E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,90E-05
Wz,eff [m3]	8,58E-06
eNy [m]	2,02E-03
eNz [m]	2,30E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	10,84	Nc,Rd	298
My,ed	11,902	My,Rd	14
Mz,ed	0,134	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,87	-0,04	0,81

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,420
λz	0,603
λmax	0,603
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,83
χ (<1)	0,71
Nb,Rd [kN]	211,09
Ned/Nb,Rd	0,05

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	28,37
λLTz	0,325
λLTy	0,694
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,82
χ LT (<1)	0,79
Mb,Rd [kNm]	10,76
Med/Mb,Rd	1,11

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,087

Interação de Esforços na Secção				
Coef.	N	M	Soma	
0,8	0,09	1,08	1,18	

Interação de Esforços no elemento					
Cmy	0,54	N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60	0,05	0,60	0,03	0,68
CmLT	26,87	0,05	1,11	0,03	1,19
kyy	0,54				
kyz	0,61				
kzy	1,00				
kzz	0,61				

ESTUDO 1 - MODELO TILT 20° (6 PILARES) - PILAR COM TRAVAMENTO

Secção C 200x3	
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,20E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,54E-05
Wz,eff [m3]	8,52E-06
eNy [m]	2,58E-03
eNz [m]	2,83E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	10,998	Nc,Rd	287
My,ed	11,866	My,Rd	12
Mz,ed	0,067	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,96	-0,04	0,89

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,420
λz	0,603
λmax	0,603
λmax>0,2	
Dispensa Encurvadura	

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	134,24
λLTz	0,149
λLTy	0,304
λLTy>0,4	
Dispensa Encurvadura	

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,062

ESTUDO 1 - MODELO TILT 20° (6 PILARES) - VIGA

Secção C	120x2,5
Classe 4	
A [m²]	6,30E-04
Aeff [m²]	5,82E-04
Iy [m4]	3,41E+01
Iz [m4]	4,74E-02
It [m4]	1,97E-02
Iw [m6]	1,26E-09
iy [m]	2,36E-05
iz [m]	7,17E-06
Wy,eff [m3]	1,87E-05
Wz,eff [m3]	7,03E-06
eNy [m]	1,38E-03
eNz [m]	9,60E-03

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	6,722	Nc,Rd	204
My,ed	4,763	My,Rd	7
Mz,ed	0,197	Mz,Rd	2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,03	0,70	0,09	0,83

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
λ1	76,953
λy	0,262
λz	0,316
λmax	0,316
λmax>0,2	
Dispensa Encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,59
χ (<1)	0,91
Nb,Rd [kN]	185,75
Ned/Nb,Rd	0,04

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
Mcr [kNm]	47,56
λLTz	0,227
λLTy	0,371
λLTy>0,4	
Dispensa Encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,60
χ LT (<1)	0,94
Mb,Rd [kNm]	6,13
Med/Mb,Rd	0,78

Coeficientes Mcr	
C1	1,00
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,041
yj [m]	-0,057

Interação de Esforços na Secção				
Coef.	N	M	Soma	
0,8	0,07	0,82	0,89	

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,88	N	My	Mz	Soma	
Cmz	0,60	0,04	0,69	0,05	0,77	
CmLT	19,40	0,04	0,78	0,05	0,86	
kyy	0,89					
kyz	0,60					
kzy	1,00					
kzz	0,60					

ESTUDO 1 - MODELO TILT 20° (6 PILARES) - ESCORA

Secção Ω	50x1,5
Classe 4	
A [m ²]	2,76E-04
Aeff [m ²]	1,48E-06
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,47E-02
It [m ⁴]	1,95E-02
Iw [m ⁶]	2,06E-10
iy [m]	3,86E-06
iz [m]	3,98E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	1,65E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	8,178	Nc,Rd	95,0
My,ed	0	My,Rd	1,4
Mz,ed	0	Mz,Rd	1,3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,06	0,01	0,00	0,07

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,680
Lcr,y [m]	1,680
Lcr,z [m]	1,680
λ_1	76,953
λ_y	0,878
λ_z	1,111
λ_{max}	1,111
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,34
$\chi (<1)$	0,48
Nb,Rd [kN]	45,46
Ned/Nb,Rd	0,18

Encurvadura lateral - Mb,Rd
NÃO APLICÁVEL

ESTUDO 1 - MODELO TILT 20° (6 PILARES) - MADRE

Secção Ω	50x2
Classe	3
A [m²]	3,64E-04
Aeff [m²]	0,00E+00
Iy [m4]	2,37E+01
Iz [m4]	2,44E-02
It [m4]	1,93E-02
Iw [m6]	4,81E-10
iy [m]	5,04E-06
iz [m]	5,14E-06
Wy,eff [m3]	0,00E+00
Wz,eff [m3]	0,00E+00
eNy [m]	2,17E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	0,28	Nc,Rd	127,4
My,ed	0,168	My,Rd	1,8
Mz,ed	1,37	Mz,Rd	1,8

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,00	-0,06	0,61	0,55

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	2,650
Lcr,y [m]	2,650
Lcr,z [m]	2,650
λ_1	76,953
λ_y	1,411
λ_z	1,786
λ_{max}	1,786
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	2,48
$\chi (<1)$	0,24
Nb,Rd [kN]	30,27
Ned/Nb,Rd	0,01

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	2,650
Lcr,y [m]	2,650
Lcr,z [m]	2,650
Mcr [kNm]	4,46
λ_{LTz}	0,636
λ_{LTy}	0,629
$\lambda_{LTy} > 0,4$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ_{LT}	0,77
$\chi_{LT} (<1)$	0,82
Mb,Rd [kNm]	1,45
Med/Mb,Rd	0,12

Coeficientes Mcr	
C1	1,12
C2	0,45
C3	0,53
zg [m]	0,02
ys [m]	0,09
yj [m]	0,10

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,02	0,18	0,20

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,40
Cmz	0,60
CmLT	10,20
kyy	0,40
kyz	0,61
kzy	1,00
kzz	0,61

N	My	Mz	Soma
0,01	0,05	0,46	0,52
0,01	0,12	0,46	0,59

ESTUDO 1 - MODELO TILT 15° (5 PILARES) - PILAR SEM TRAVAMENTO

Secção C 200X2,5	
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,42E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	1,67E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,79E-05
Wz,eff [m3]	8,56E-06
eNy [m]	2,20E-03
eNz [m]	2,47E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	12,039	Nc,Rd	295
My,ed	10,603	My,Rd	13
Mz,ed	0,437	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,90	-0,04	0,83

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,053
Lcr,y [m]	2,106
Lcr,z [m]	0,737
λ1	76,953
λy	0,332
λz	0,477
λmax	0,477
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,72
χ (<1)	0,80
Nb,Rd [kN]	234,41
Ned/Nb,Rd	0,05

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,053
Lcr,y [m]	2,106
Lcr,z [m]	0,737
Mcr [kNm]	46,25
λLTz	0,255
λLTy	0,535
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,70
χ LT (<1)	0,87
Mb,Rd [kNm]	11,51
Med/Mb,Rd	0,92

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,062

Interação de Esforços na Secção			
Coef.	N	M	Soma
0,8	0,09	0,94	1,03

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,51		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,05	0,47	0,09	0,61
CmLT	26,87		0,05	0,92	0,09	1,06
kyy	0,51					
kyz	0,61					
kzy	1,00					
kzz	0,61					

ESTUDO 1 - MODELO TILT 15° (5 PILARES) - PILAR COM TRAVAMENTO

Secção C 200X2,5	
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,39E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	1,67E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,76E-05
Wz,eff [m3]	8,55E-06
eNy [m]	2,24E-03
eNz [m]	2,51E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	12,189	Nc,Rd	294
My,ed	10,586	My,Rd	13
Mz,ed	0,393	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,91	-0,04	0,84

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,053
Lcr,y [m]	2,106
Lcr,z [m]	0,737
λ1	76,953
λy	0,332
λz	0,477
λmax	0,477
λmax>0,2	
Dispensa Encurvadura	

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,053
Lcr,y [m]	2,106
Lcr,z [m]	0,737
Mcr [kNm]	181,53
λLTz	0,128
λLTy	0,269
λLTy>0,4	
Dispensa Encurvadura	

Coefficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,062

ESTUDO 1 - MODELO TILT 15° (5 PILARES) - VIGA

Secção C 120x2,5	
Classe 3	
A [m²]	6,30E-04
Aeff [m²]	6,30E-04
Iy [m4]	3,41E+01
Iz [m4]	4,74E-02
It [m4]	1,97E-02
Iw [m6]	1,26E-09
iy [m]	2,36E-05
iz [m]	7,17E-06
Wy,eff [m3]	2,36E-05
Wz,eff [m3]	7,17E-06
eNy [m]	0,00E+00
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	6,247	Nc,Rd	221
My,ed	5,229	My,Rd	8
Mz,ed	0,197	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,03	0,63	0,08	0,73

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
λ1	76,953
λy	0,273
λz	0,328
λmax	0,328
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,60
χ (<1)	0,90
Nb,Rd [kN]	198,99
Ned/Nb,Rd	0,03

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
Mcr [kNm]	46,92
λLTz	0,231
λLTy	0,419
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,63
χ LT (<1)	0,92
Mb,Rd [kNm]	7,58
Med/Mb,Rd	0,69

Coeficientes Mcr	
C1	1,00
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,041
yj [m]	-0,057

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,06	0,74	0,81

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,62
Cmz	0,60
CmLT	19,40
kyy	0,62
kzy	0,60
kzy	1,00
kzz	0,60

N	My	Mz	Soma
0,03	0,43	0,05	0,51
0,03	0,69	0,05	0,77

ESTUDO 1 - MODELO TILT 15° (5 PILARES) - ESCORA

Secção Ω	50x1,5
Classe	4
A [m ²]	2,76E-04
Aeff [m ²]	1,48E-06
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,47E-02
It [m ⁴]	1,95E-02
Iw [m ⁶]	2,06E-10
iy [m]	3,86E-06
iz [m]	3,98E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	1,65E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	5,415	Nc,Rd	95,0
My,ed	0	My,Rd	1,4
Mz,ed	0	Mz,Rd	1,3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,06	0,01	0,00	0,07

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,680
Lcr,y [m]	1,680
Lcr,z [m]	1,680
λ_1	76,953
λ_y	0,878
λ_z	1,111
λ_{max}	1,111
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,34
$\chi (<1)$	0,48
Nb,Rd [kN]	45,46
Ned/Nb,Rd	0,12

Encurvadura lateral - Mb,Rd
NÃO APLICÁVEL

ESTUDO 1 - MODELO TILT 15° (5 PILARES) - MADRE

Secção Ω	50x2
Classe	3
A [m²]	3,64E-04
Aeff [m²]	0,00E+00
Iy [m4]	2,37E+01
Iz [m4]	2,44E-02
It [m4]	1,93E-02
Iw [m6]	4,81E-10
iy [m]	5,04E-06
iz [m]	5,14E-06
Wy,eff [m3]	0,00E+00
Wz,eff [m3]	0,00E+00
eNy [m]	2,17E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	0,182	Nc,Rd	127,4
My,ed	0,139	My,Rd	1,8
Mz,ed	1,652	Mz,Rd	1,8

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,00	-0,06	0,61	0,55

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	2,650
Lcr,y [m]	2,650
Lcr,z [m]	2,650
λ_1	76,953
λ_y	1,411
λ_z	1,786
λ_{max}	1,786
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	2,48
$\chi (<1)$	0,24
Nb,Rd [kN]	30,27
Ned/Nb,Rd	0,01

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	2,650
Lcr,y [m]	2,650
Lcr,z [m]	2,650
Mcr [kNm]	4,46
λ_{LTz}	0,636
λ_{LTy}	0,629
$\lambda_{LTy} > 0,4$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ_{LT}	0,77
$\chi_{LT} (<1)$	0,82
Mb,Rd [kNm]	1,45
Med/Mb,Rd	0,10

Coeficientes Mcr	
C1	1,12
C2	0,45
C3	0,53
zg [m]	0,02
ys [m]	0,09
yj [m]	0,10

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,02	0,15	0,17

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,40
Cmz	0,60
CmLT	10,20
kyy	0,40
kyz	0,60
kzy	1,00
kzz	0,60

N	My	Mz	Soma
0,01	0,04	0,55	0,60
0,01	0,10	0,55	0,66

ESTUDO 1 - MODELO TILT 10° (5 PILARES) - PILAR

Secção C 200X2	
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,43E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	1,67E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,80E-05
Wz,eff [m3]	8,56E-06
eNy [m]	2,18E-03
eNz [m]	2,45E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	9,509	Nc,Rd	295
My,ed	8,664	My,Rd	13
Mz,ed	0,345	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,90	-0,04	0,83

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,053
Lcr,y [m]	2,106
Lcr,z [m]	0,737
λ1	76,953
λy	0,332
λz	0,477
λmax	0,477
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,72
χ (<1)	0,80
Nb,Rd [kN]	234,72
Ned/Nb,Rd	0,04

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,053
Lcr,y [m]	2,106
Lcr,z [m]	0,737
Mcr [kNm]	46,25
λLTz	0,255
λLTy	0,536
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,70
χ LT (<1)	0,87
Mb,Rd [kNm]	11,54
Med/Mb,Rd	0,75

Coefficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,062

Interação de Esforços na Secção				
	Coef.	N	M	Soma
	0,8	0,08	0,80	0,87

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,51		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,04	0,39	0,07	0,50
CmLT	26,87		0,04	0,75	0,07	0,86
kyy	0,52					
kyz	0,61					
kzy	1,00					
kzz	0,61					

ESTUDO 1 - MODELO TILT 10° (5 PILARES) - VIGA

Secção C 120x2	
Classe 3	
A [m²]	5,08E-04
Aeff [m²]	5,08E-04
Iy [m4]	3,41E+01
Iz [m4]	4,76E-02
It [m4]	1,99E-02
Iw [m6]	6,57E-10
iy [m]	1,92E-05
iz [m]	5,90E-06
Wy,eff [m3]	1,92E-05
Wz,eff [m3]	5,90E-06
eNy [m]	0,00E+00
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	4,833	Nc,Rd	178
My,ed	4,169	My,Rd	7
Mz,ed	0,126	Mz,Rd	2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,02	0,67	0,07	0,77

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
λ1	76,953
λy	0,272
λz	0,325
λmax	0,325
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,60
χ (<1)	0,91
Nb,Rd [kN]	160,92
Ned/Nb,Rd	0,03

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
Mcr [kNm]	38,84
λLTz	0,231
λLTy	0,416
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,62
χ LT (<1)	0,92
Mb,Rd [kNm]	6,18
Med/Mb,Rd	0,67

Coeficientes Mcr	
C1	1,00
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,041
yj [m]	-0,060

Interação de Esforços na Secção			
Coef.	N	M	Soma
0,8	0,06	0,73	0,79

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,49		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,03	0,34	0,04	0,40
CmLT	24,20		0,03	0,67	0,04	0,74
kyy	0,50					
kyz	0,60					
kzy	1,00					
kzz	0,60					

ESTUDO 1 - MODELO TILT 10° (5 PILARES) - ESCORA

Secção Ω	50x1,5
Classe 4	
A [m ²]	2,76E-04
Aeff [m ²]	1,48E-06
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,47E-02
It [m ⁴]	1,95E-02
Iw [m ⁶]	2,06E-10
iy [m]	3,86E-06
iz [m]	3,98E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	1,65E-10
eNz [m]	0,00E+00

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,680
Lcr,y [m]	1,680
Lcr,z [m]	1,680
λ_1	76,953
λ_y	0,878
λ_z	1,111
λ_{max}	1,111
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,34
$\chi (<1)$	0,48
Nb,Rd [kN]	45,46
Ned/Nb,Rd	0,12

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	5,345	Nc,Rd	95,0
My,ed	0	My,Rd	1,4
Mz,ed	0	Mz,Rd	1,3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,06	0,01	0,00	0,07

Encurvadura lateral - Mb,Rd
NÃO APLICÁVEL

ESTUDO 1 - MODELO TILT 10° (5 PILARES) - MADRE

Secção Ω	50x2
Classe	3
A [m²]	4,50E-04
Aeff [m²]	0,00E+00
Iy [m4]	2,37E+01
Iz [m4]	2,41E-02
It [m4]	1,91E-02
Iw [m6]	4,81E-10
iy [m]	6,17E-06
iz [m]	6,23E-06
Wy,eff [m3]	0,00E+00
Wz,eff [m3]	0,00E+00
eNy [m]	2,62E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	0,17	Nc,Rd	157,5
My,ed	0,119	My,Rd	2,2
Mz,ed	1,363	Mz,Rd	2,2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,00	-0,05	0,50	0,45

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	2,650
Lcr,y [m]	2,650
Lcr,z [m]	2,650
λ_1	76,953
λ_y	1,427
λ_z	1,805
λ_{max}	1,805
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	2,52
$\chi (<1)$	0,23
Nb,Rd [kN]	36,77
Ned/Nb,Rd	0,00

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	2,650
Lcr,y [m]	2,650
Lcr,z [m]	2,650
Mcr [kNm]	5,20
λ_{LTz}	0,647
λ_{LTy}	0,644
$\lambda_{LTy} > 0,4$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ_{LT}	0,78
$\chi_{LT} (<1)$	0,81
Mb,Rd [kNm]	1,76
Med/Mb,Rd	0,07

Coeficientes Mcr	
C1	1,12
C2	0,45
C3	0,53
zg [m]	0,02
ys [m]	0,09
yj [m]	0,10

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,01	0,12	0,13

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,40
Cmz	0,60
CmLT	8,20
kyy	0,40
kyz	0,60
kzy	1,00
kzz	0,60

N	My	Mz	Soma
0,00	0,03	0,38	0,41
0,00	0,07	0,38	0,45

ESTUDO 2 - MODELO FRANÇA (6 PILARES) - PILAR SEM TRAVAMENTO

Secção C 200x3	
Classe 4	
A [m²]	9,96E-04
Aeff [m²]	8,53E-04
Iy [m4]	3,78E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,85E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,65E-05
iz [m]	9,04E-06
Wy,eff [m3]	3,88E-05
Wz,eff [m3]	8,83E-06
eNy [m]	2,12E-03
eNz [m]	2,38E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	808000	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	10,01	Nc,Rd	299
My,ed	12,634	My,Rd	14
Mz,ed	0,201	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,92	-0,05	0,84

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,425
λz	0,605
λmax	0,605
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,84
χ (<1)	0,71
Nb,Rd [kN]	210,96
Ned/Nb,Rd	0,05

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	39,17
λLTz	0,281
λLTy	0,588
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,74
χ LT (<1)	0,84
Mb,Rd [kNm]	11,43
Med/Mb,Rd	1,11

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,098

Interação de Esforços na Secção				
	Coef.	N	M	Soma
	0,8	0,09	1,08	1,17

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,52		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,05	0,59	0,04	0,67
CmLT	26,87		0,05	1,11	0,04	1,19
kyy	0,53					
kyz	0,61					
kzy	1,00					
kzz	0,61					

ESTUDO 2 - MODELO FRANÇA (6 PILARES) - PILAR COM TRAVAMENTO

Secção C	200x3
Classe 4	
A [m²]	9,96E-04
Aeff [m²]	8,52E-04
Iy [m4]	3,78E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,85E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,65E-05
iz [m]	9,04E-06
Wy,eff [m3]	3,87E-05
Wz,eff [m3]	8,82E-06
eNy [m]	2,14E-03
eNz [m]	2,39E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	808000	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	10,023	Nc,Rd	298
My,ed	12,6	My,Rd	14
Mz,ed	0,201	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,92	-0,09	0,80

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,425
λz	0,605
λmax	0,605
λmax>0,2	
Dispensa Encurvadura	

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	114,12
λLTz	0,165
λLTy	0,344
λLTy>0,4	
Dispensa Encurvadura	

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,098

ESTUDO 2 - MODELO FRANÇA (6 PILARES) - VIGA

Secção C 120x2	
Classe 3	
A [m²]	5,08E-04
Aeff [m²]	5,08E-04
Iy [m4]	3,41E+01
Iz [m4]	4,76E-02
It [m4]	1,99E-02
Iw [m6]	6,57E-10
iy [m]	1,92E-05
iz [m]	5,90E-06
Wy,eff [m3]	1,92E-05
Wz,eff [m3]	5,90E-06
eNy [m]	0,00E+00
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	5,216	Nc,Rd	178
My,ed	5,332	My,Rd	7
Mz,ed	0,25	Mz,Rd	2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,01	0,61	-0,01	0,60

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
λ1	76,953
λy	0,272
λz	0,325
λmax	0,325
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,60
χ (<1)	0,91
Nb,Rd [kN]	160,92
Ned/Nb,Rd	0,03

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
Mcr [kNm]	40,54
λLTz	0,226
λLTy	0,407
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,62
χ LT (<1)	0,92
Mb,Rd [kNm]	6,20
Med/Mb,Rd	0,86

Coeficientes Mcr	
C1	1,00
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,041
yj [m]	-0,056

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,06	0,89	0,95

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,46
Cmz	0,60
CmLT	24,20
kyy	0,46
kyz	0,60
kzy	1,00
kzz	0,60

N	My	Mz	Soma
0,03	0,39	0,07	0,50
0,03	0,86	0,07	0,96

ESTUDO 2 - MODELO FRANÇA (6 PILARES) - ESCORA

Secção Ω	50x1,5
Classe	4
A [m ²]	2,76E-04
Aeff [m ²]	1,48E-06
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,47E-02
It [m ⁴]	1,95E-02
Iw [m ⁶]	2,06E-10
iy [m]	3,86E-06
iz [m]	3,98E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	1,65E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	6,074	Nc,Rd	95,0
My,ed	0	My,Rd	1,4
Mz,ed	0	Mz,Rd	1,3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,04	0,00	0,00	0,05

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,832
Lcr,y [m]	1,832
Lcr,z [m]	1,832
λ_1	76,953
λ_y	0,957
λ_z	1,212
λ_{max}	1,212
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,48
$\chi (<1)$	0,43
Nb,Rd [kN]	40,70
Ned/Nb,Rd	0,15

Encurvadura lateral - Mb,Rd
NÃO APLICÁVEL

ESTUDO 2 - MODELO FRANÇA (6 PILARES) - MADRE

Secção Ω	50x2
Classe	3
A [m ²]	3,64E-04
Aeff [m ²]	0,00E+00
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,44E-02
It [m ⁴]	1,93E-02
Iw [m ⁶]	4,81E-10
iy [m]	5,04E-06
iz [m]	5,14E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	2,17E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	1,649	Nc,Rd	127,4
My,ed	0,275	My,Rd	1,8
Mz,ed	1,196	Mz,Rd	1,8

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,01	-0,12	-0,43	-0,53

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,900
Lcr,y [m]	1,900
Lcr,z [m]	1,900
λ_1	76,953
λ_y	1,012
λ_z	1,280
λ_{max}	1,280
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,58
χ (<1)	0,40
Nb,Rd [kN]	50,60
Ned/Nb,Rd	0,03

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,900
Lcr,y [m]	1,900
Lcr,z [m]	1,900
Mcr [kNm]	8,16
λ_{LTz}	0,470
λ_{LTy}	0,465
$\lambda_{LTy} > 0,4$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,65
χ LT (<1)	0,90
Mb,Rd [kNm]	1,59
Med/Mb,Rd	0,17

Coeficientes Mcr	
C1	1,12
C2	0,45
C3	0,53
zg [m]	0,02
ys [m]	0,09
yj [m]	0,10

Interação de Esforços na Secção			
Coef.	N	M	Soma
0,8	0,06	0,25	0,31

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,40		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,03	0,07	0,41	0,51
CmLT	10,20		0,03	0,17	0,41	0,61
kyy	0,41					
kyz	0,62					
kzy	1,00					
kzz	0,62					

ESTUDO 2 - MODELO PORTUGAL (8 PILARES) - MADRE

Secção Ω	50x2
Classe	3
A [m ²]	3,64E-04
Aeff [m ²]	0,00E+00
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,44E-02
It [m ⁴]	1,93E-02
Iw [m ⁶]	4,81E-10
iy [m]	5,04E-06
iz [m]	5,14E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	2,17E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	0,411	Nc,Rd	127,4
My,ed	0,22	My,Rd	1,8
Mz,ed	1,06	Mz,Rd	1,8

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,00	-0,10	0,58	0,48

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	2,650
Lcr,y [m]	2,650
Lcr,z [m]	2,650
λ_1	76,953
λ_y	1,411
λ_z	1,786
λ_{max}	1,786
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	2,48
$\chi (<1)$	0,24
Nb,Rd [kN]	30,27
Ned/Nb,Rd	0,01

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	2,650
Lcr,y [m]	2,650
Lcr,z [m]	2,650
Mcr [kNm]	4,39
λ_{LTz}	0,640
λ_{LTy}	0,634
$\lambda_{LTy} > 0,4$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ_{LT}	0,77
$\chi_{LT} (<1)$	0,82
Mb,Rd [kNm]	1,45
Med/Mb,Rd	0,15

Coeficientes Mcr	
C1	1,12
C2	0,45
C3	0,53
zg [m]	0,02
ys [m]	0,09
yj [m]	0,10

Interação de Esforços na Secção			
Coef.	N	M	Soma
0,8	0,03	0,22	0,25

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,40		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,01	0,06	0,36	0,43
CmLT	10,20		0,01	0,15	0,36	0,52
kyy	0,40					
kyz	0,61					
kzy	1,00					
kzz	0,61					

ESTUDO 2 - MODELO ALBANIA (9 PILARES) - PILAR SEM TRAVAMENTO

Secção C	200x3
Classe 4	
A [m²]	9,96E-04
Aeff [m²]	8,33E-04
Iy [m4]	3,78E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,85E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,65E-05
iz [m]	9,04E-06
Wy,eff [m3]	3,64E-05
Wz,eff [m3]	8,79E-06
eNy [m]	2,48E-03
eNz [m]	2,72E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	808000	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	9,364	Nc,Rd	292
My,ed	12,34	My,Rd	13
Mz,ed	0,25	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,02	0,66	-0,10	0,55

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,425
λz	0,605
λmax	0,605
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,84
χ (<1)	0,71
Nb,Rd [kN]	205,96
Ned/Nb,Rd	0,05

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	39,17
λLTz	0,280
λLTy	0,571
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,73
χ LT (<1)	0,85
Mb,Rd [kNm]	10,86
Med/Mb,Rd	1,14

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,098

Interação de Esforços na Secção				
Coef.	N	M	Soma	
0,8	0,08	1,11	1,19	

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,45		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,05	0,52	0,05	0,62
CmLT	26,87		0,05	1,14	0,05	1,23
kyy	0,46					
kyz	0,61					
kzy	1,00					

ESTUDO 2 - MODELO ALBANIA (9 PILARES) - PILAR COM TRAVAMENTO

Secção C	200x3
Classe 4	
A [m²]	9,96E-04
Aeff [m²]	8,91E-04
Iy [m4]	3,78E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,85E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,65E-05
iz [m]	9,04E-06
Wy,eff [m3]	4,32E-05
Wz,eff [m3]	8,89E-06
eNy [m]	1,50E-03
eNz [m]	1,76E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	808000	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	9,99	Nc,Rd	312
My,ed	12,37	My,Rd	15
Mz,ed	0,2	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,81	0,03	0,81

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,425
λz	0,605
λmax	0,605
λmax>0,2	
Dispensa Encurvadura	

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	114,12
λLTz	0,165
λLTy	0,364
λLTy>0,4	
Dispensa Encurvadura	

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,098

ESTUDO 2 - MODELO ALBANIA (9 PILARES) - VIGA

Secção C 120x2	
Classe 4	
A [m²]	6,30E-04
Aeff [m²]	6,23E-04
Iy [m4]	3,41E+01
Iz [m4]	4,74E-02
It [m4]	1,97E-02
Iw [m6]	1,26E-09
iy [m]	2,36E-05
iz [m]	7,17E-06
Wy,eff [m3]	2,28E-05
Wz,eff [m3]	7,15E-06
eNy [m]	1,98E-04
eNz [m]	1,48E-03

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	5,01	Nc,Rd	218
My,ed	5,03	My,Rd	8
Mz,ed	0,7	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,03	0,57	0,09	0,69

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
λ1	76,953
λy	0,271
λz	0,326
λmax	0,326
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,60
χ (<1)	0,90
Nb,Rd [kN]	196,97
Ned/Nb,Rd	0,03

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
Mcr [kNm]	47,56
λLTz	0,229
λLTy	0,410
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,62
χ LT (<1)	0,92
Mb,Rd [kNm]	7,36
Med/Mb,Rd	0,68

Coeficientes Mcr	
C1	1,00
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,041
yj [m]	-0,057

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,05	0,74	0,79

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,65
Cmz	0,60
CmLT	19,40
kyy	0,65
kyz	0,60
kzy	1,00
kzz	0,60

N	My	Mz	Soma
0,03	0,45	0,17	0,64
0,03	0,68	0,17	0,88

ESTUDO 2 - MODELO ALBANIA (9 PILARES) - ESCORA

Secção Ω	50x1,5
Classe	4
A [m ²]	2,76E-04
Aeff [m ²]	1,48E-06
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,47E-02
It [m ⁴]	1,95E-02
Iw [m ⁶]	2,06E-10
Iy [m]	3,86E-06
iz [m]	3,98E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	1,65E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	5,805	Nc,Rd	95,0
My,ed	0	My,Rd	1,4
Mz,ed	0	Mz,Rd	1,3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,06	0,01	0,00	0,07

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,680
Lcr,y [m]	1,680
Lcr,z [m]	1,680
λ_1	76,953
λ_y	0,878
λ_z	1,111
λ_{max}	1,111
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,34
$\chi (<1)$	0,48
Nb,Rd [kN]	45,46
Ned/Nb,Rd	0,13

Encurvadura lateral - Mb,Rd
NÃO APLICÁVEL

ESTUDO 2 - MODELO ALBANIA (9 PILARES) - MADRE

Secção Ω	50x2,5
Classe	3
A [m ²]	4,50E-04
Aeff [m ²]	0,00E+00
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,41E-02
It [m ⁴]	1,91E-02
Iw [m ⁶]	9,27E-10
iy [m]	6,17E-06
iz [m]	6,23E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	2,62E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	0,567	Nc,Rd	157,5
My,ed	0,34	My,Rd	2,2
Mz,ed	1,35	Mz,Rd	2,2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,00	-0,12	0,61	0,49

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	2,650
Lcr,y [m]	2,650
Lcr,z [m]	2,650
λ_1	76,953
λ_y	1,427
λ_z	1,805
λ_{max}	1,805
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	2,52
$\chi (<1)$	0,23
Nb,Rd [kN]	36,77
Ned/Nb,Rd	0,02

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	2,650
Lcr,y [m]	2,650
Lcr,z [m]	2,650
Mcr [kNm]	5,52
λ_{LTz}	0,628
λ_{LTy}	0,625
$\lambda_{LTy} > 0,4$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ_{LT}	0,77
$\chi_{LT} (<1)$	0,82
Mb,Rd [kNm]	1,78
Med/Mb,Rd	0,19

Coeficientes Mcr	
C1	1,12
C2	0,45
C3	0,53
zg [m]	0,02
ys [m]	0,09
yj [m]	0,10

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,04	0,27	0,30

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,40
Cmz	0,60
CmLT	8,20
kyy	0,41
kyz	0,61
kzy	1,00
kzz	0,61

N	My	Mz	Soma
0,02	0,08	0,38	0,47
0,02	0,19	0,38	0,58

ESTUDO 3 - MODELO 5kN (11 PILARES) - PILAR

Secção C 200x3	
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,05E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,37E-05
Wz,eff [m3]	8,49E-06
eNy [m]	2,87E-03
eNz [m]	3,09E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	6,093	Nc,Rd	282
My,ed	8,47	My,Rd	12
Mz,ed	0,19	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,02	0,70	-0,05	0,63

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,415
λz	0,595
λmax	0,595
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,83
χ (<1)	0,71
Nb,Rd [kN]	201,00
Ned/Nb,Rd	0,03

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	24,90
λLTz	0,345
λLTy	0,688
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,82
χ LT (<1)	0,79
Mb,Rd [kNm]	9,33
Med/Mb,Rd	0,91

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,104

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,06	0,93	0,99

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,43
Cmz	0,60
CmLT	26,87
kyy	0,44
kyz	0,61
kzy	1,00
kzz	0,61

N	My	Mz	Soma
0,03	0,40	0,04	0,47
0,03	0,91	0,04	0,98

ESTUDO 3 - MODELO 5 kN (11 PILARES) - VIGA

Secção C 120x2	
Classe 4	
A [m²]	5,08E-04
Aeff [m²]	4,88E-04
Iy [m4]	3,41E+01
Iz [m4]	4,76E-02
It [m4]	1,99E-02
Iw [m6]	6,57E-10
iy [m]	1,92E-05
iz [m]	5,90E-06
Wy,eff [m3]	1,71E-05
Wz,eff [m3]	5,85E-06
eNy [m]	6,96E-04
eNz [m]	5,01E-03

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	3,459	Nc,Rd	171
My,ed	3,34	My,Rd	6
Mz,ed	0,25	Mz,Rd	2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,02	0,54	0,05	0,61

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
λ1	76,953
λy	0,266
λz	0,318
λmax	0,318
λmax>0,2	
Dispensa Encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,60
χ (<1)	0,91
Nb,Rd [kN]	155,38
Ned/Nb,Rd	0,02

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
Mcr [kNm]	40,54
λLTz	0,225
λLTy	0,384
λLTy>0,4	
Dispensa Encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,61
χ LT (<1)	0,93
Mb,Rd [kNm]	5,58
Med/Mb,Rd	0,60

Coeficientes Mcr	
C1	1,00
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,041
yj [m]	-0,056

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,05	0,66	0,71

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,59	N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60	0,02	0,35	0,07	0,45
CmLT	24,20	0,02	0,60	0,07	0,69
kyy	0,59				
kzy	0,60				
kzy	1,00				
kzz	0,60				

ESTUDO 3 - MODELO 5 kN (11 PILARES) - ESCORA

Secção Ω	50x1,5
Classe	4
A [m ²]	2,76E-04
Aeff [m ²]	1,48E-06
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,47E-02
It [m ⁴]	1,95E-02
Iw [m ⁶]	2,06E-10
iy [m]	3,86E-06
iz [m]	3,98E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	1,65E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	3,982	Nc,Rd	95,0
My,ed	0	My,Rd	1,4
Mz,ed	0	Mz,Rd	1,3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,03	0,01	0,00	0,04

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,832
Lcr,y [m]	1,832
Lcr,z [m]	1,832
λ_1	76,953
λ_y	0,957
λ_z	1,212
λ_{max}	1,212
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,48
$\chi (<1)$	0,43
Nb,Rd [kN]	40,70
Ned/Nb,Rd	0,10

Encurvadura lateral - Mb,Rd
NÃO APLICÁVEL

ESTUDO 3 - MODELO 5kN (11 PILARES) - MADRE

Secção Ω	50x2
Classe	3
A [m ²]	3,64E-04
Aeff [m ²]	0,00E+00
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,44E-02
It [m ⁴]	1,93E-02
Iw [m ⁶]	4,81E-10
iy [m]	5,04E-06
iz [m]	5,14E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	2,17E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	0,886	Nc,Rd	127,4
My,ed	0,41	My,Rd	1,8
Mz,ed	0,97	Mz,Rd	1,8

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,00	-0,14	0,53	0,40

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,900
Lcr,y [m]	1,900
Lcr,z [m]	1,900
λ_1	76,953
λ_y	1,012
λ_z	1,280
λ_{max}	1,280
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,58
$\chi (<1)$	0,40
Nb,Rd [kN]	50,60
Ned/Nb,Rd	0,02

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,900
Lcr,y [m]	1,900
Lcr,z [m]	1,900
Mcr [kNm]	8,16
λ_{LTz}	0,470
λ_{LTy}	0,465
$\lambda_{LTy} > 0,4$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ_{LT}	0,65
$\chi_{LT} (<1)$	0,90
Mb,Rd [kNm]	1,59
Med/Mb,Rd	0,26

Coeficientes Mcr	
C1	1,12
C2	0,45
C3	0,53
zg [m]	0,02
ys [m]	0,09
yj [m]	0,10

Interação de Esforços na Secção

Coef.	N	M	Soma
0,8	0,04	0,34	0,38

Interação de Esforços no elemento

Cmy	0,40
Cmz	0,60
CmLT	10,20
kyy	0,40
kyz	0,61
kzy	1,00
kzz	0,61

N	My	Mz	Soma
0,02	0,10	0,33	0,45
0,02	0,26	0,33	0,60

ESTUDO 4 - MODELO SLOPE 10° (8 PILARES) - PILAR COM TRAVAMENTO

Secção C	200x3
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,29E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,64E-05
Wz,eff [m3]	8,54E-06
eNy [m]	2,42E-03
eNz [m]	2,68E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	9,736	Nc,Rd	290
My,ed	8,779	My,Rd	13
Mz,ed	1,171	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,65	0,24	0,86

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,421
λz	0,604
λmax	0,604
λmax>0,2	
Dispensa Encurvadura	

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	95,17
λLTz	0,177
λLTy	0,366
λLTy>0,4	
Dispensa Encurvadura	

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,104

ESTUDO 4 - MODELO SLOPE 10° (8 PILARES) - VIGA

Secção C 120x2,5	
Classe 3	
A [m²]	6,30E-04
Aeff [m²]	6,30E-04
Iy [m4]	3,41E+01
Iz [m4]	4,74E-02
It [m4]	1,97E-02
Iw [m6]	1,26E-09
iy [m]	2,36E-05
iz [m]	7,17E-06
Wy,eff [m3]	2,36E-05
Wz,eff [m3]	7,17E-06
eNy [m]	0,00E+00
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	3,751	Nc,Rd	221
My,ed	4,651	My,Rd	8
Mz,ed	0,548	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,01	0,56	-0,17	0,40

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
λ1	76,953
λy	0,273
λz	0,328
λmax	0,328
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,60
χ (<1)	0,90
Nb,Rd [kN]	198,99
Ned/Nb,Rd	0,02

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
Mcr [kNm]	47,56
λLTz	0,230
λLTy	0,417
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,62
χ LT (<1)	0,92
Mb,Rd [kNm]	7,59
Med/Mb,Rd	0,61

Coeficientes Mcr	
C1	1,00
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,041
yj [m]	-0,057

Interação de Esforços na Secção				
Coef.	N	M	Soma	
0,8	0,04	0,68	0,72	

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,40	N	My	Mz	Soma	
Cmz	0,60	0,02	0,25	0,13	0,40	
CmLT	19,40	0,02	0,61	0,13	0,76	
kyy	0,40					
kyz	0,60					
kzy	1,00					
kzz	0,60					

ESTUDO 4 - MODELO SLOPE 10° (8 PILARES) - ESCORA

Secção Ω	50x1,5
Classe	4
A [m²]	2,76E-04
Aeff [m²]	1,48E-06
Iy [m4]	2,37E+01
Iz [m4]	2,47E-02
It [m4]	1,95E-02
Iw [m6]	2,06E-10
iy [m]	3,86E-06
iz [m]	3,98E-06
Wy,eff [m3]	0,00E+00
Wz,eff [m3]	0,00E+00
eNy [m]	1,65E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	4,81	Nc,Rd	95,0
My,ed	0	My,Rd	1,4
Mz,ed	0	Mz,Rd	1,3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,05	0,01	0,00	0,06

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,832
Lcr,y [m]	1,832
Lcr,z [m]	1,832
λ_1	76,953
λ_y	0,957
λ_z	1,212
λ_{max}	1,212
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,48
$\chi (<1)$	0,43
Nb,Rd [kN]	40,70
Ned/Nb,Rd	0,12

Encurvadura lateral - Mb,Rd
NÃO APLICÁVEL

ESTUDO 4 - MODELO SLOPE 10° (8 PILARES) - CONTRAVENTAMENTO

Secção Ω	50x2
Classe	4
A [m ²]	2,76E-04
Aeff [m ²]	1,48E-06
Iy [m4]	2,37E+01
Iz [m4]	2,47E-02
It [m4]	1,95E-02
Iw [m6]	2,06E-10
iy [m]	3,86E-06
iz [m]	3,98E-06
Wy,eff [m3]	0,00E+00
Wz,eff [m3]	0,00E+00
eNy [m]	1,65E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	11,429	Nc,Rd	95,0
My,ed	0,492	My,Rd	1,4
Mz,ed	0,189	Mz,Rd	1,3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,08	-0,29	0,15	-0,05

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,832
Lcr,y [m]	1,832
Lcr,z [m]	1,832
λ_1	76,953
λ_y	0,957
λ_z	1,212
λ_{max}	1,212
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,48
$\chi (<1)$	0,43
Nb,Rd [kN]	40,70
Ned/Nb,Rd	0,28

Encurvadura lateral - Mb,Rd
NÃO APLICÁVEL

ESTUDO 4 - MODELO SLOPE 10° (8 PILARES) - MADRE

Secção Ω	50x2,5
Classe	3
A [m²]	4,50E-04
Aeff [m²]	0,00E+00
Iy [m4]	2,37E+01
Iz [m4]	2,41E-02
It [m4]	1,91E-02
Iw [m6]	9,27E-10
iy [m]	6,17E-06
iz [m]	6,23E-06
Wy,eff [m3]	0,00E+00
Wz,eff [m3]	0,00E+00
eNy [m]	2,62E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	2,058	Nc,Rd	157,5
My,ed	0,397	My,Rd	2,2
Mz,ed	0,894	Mz,Rd	2,2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,00	-0,13	0,32	0,20

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,828
Lcr,y [m]	1,828
Lcr,z [m]	1,828
λ_1	76,953
λ_y	0,984
λ_z	1,245
λ_{max}	1,245
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,53
$\chi (<1)$	0,41
Nb,Rd [kN]	65,03
Ned/Nb,Rd	0,03

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,828
Lcr,y [m]	1,828
Lcr,z [m]	1,828
Mcr [kNm]	10,93
λ_{LTz}	0,446
λ_{LTy}	0,444
$\lambda_{LTy} > 0,4$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ_{LT}	0,64
$\chi_{LT} (<1)$	0,91
Mb,Rd [kNm]	1,96
Med/Mb,Rd	0,20

Coeficientes Mcr	
C1	1,12
C2	0,45
C3	0,53
zg [m]	0,02
ys [m]	0,09
yj [m]	0,10

Interação de Esforços na Secção				
Coef.	N	M	Soma	
0,8	0,06	0,28	0,34	

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,40		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,03	0,08	0,25	0,37
CmLT	8,20		0,03	0,20	0,25	0,49
kyy	0,41					
kyz	0,61					
kzy	1,00					
kzz	0,61					

ESTUDO 4 - MODELO SLOPE 5° (8 PILARES) - PILAR SEM TRAVAMENTO

Secção C	200x3
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,46E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	2,89E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,84E-05
Wz,eff [m3]	8,57E-06
eNy [m]	2,12E-03
eNz [m]	2,39E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	8,521	Nc,Rd	296
My,ed	8,426	My,Rd	13
Mz,ed	0,891	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,61	0,29	0,88

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,421
λz	0,604
λmax	0,604
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,84
χ (<1)	0,71
Nb,Rd [kN]	209,56
Ned/Nb,Rd	0,04

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	24,93
λLTz	0,347
λLTy	0,734
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,86
χ LT (<1)	0,76
Mb,Rd [kNm]	10,27
Med/Mb,Rd	0,82

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,104

Interação de Esforços na Secção				
Coef.	N	M	Soma	
0,8	0,08	0,85	0,93	

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,52		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,04	0,43	0,18	0,65
CmLT	26,87		0,04	0,82	0,18	1,04
kyy	0,53					
kyz	0,61					
kzy	1,00					
kzz	0,61					

ESTUDO 4 - MODELO SLOPE 5° (8 PILARES) - PILAR COM TRAVAMENTO

Secção C 200x3	
Classe 4	
A [m²]	9,90E-04
Aeff [m²]	8,38E-04
Iy [m4]	3,80E+01
Iz [m4]	7,53E-02
It [m4]	1,84E-02
Iw [m6]	1,67E-09
iy [m]	5,61E-05
iz [m]	8,78E-06
Wy,eff [m3]	3,74E-05
Wz,eff [m3]	8,55E-06
eNy [m]	2,27E-03
eNz [m]	2,54E-02

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	10,742	Nc,Rd	293
My,ed	8,716	My,Rd	13
Mz,ed	0,111	Mz,Rd	3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
-0,03	0,65	0,04	0,65

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
λ1	76,953
λy	0,421
λz	0,604
λmax	0,604
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,84
χ (<1)	0,71
Nb,Rd [kN]	207,45
Ned/Nb,Rd	0,05

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,332
Lcr,y [m]	2,664
Lcr,z [m]	0,932
Mcr [kNm]	79,28
λLTz	0,194
λLTy	0,406
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,62
χ LT (<1)	0,92
Mb,Rd [kNm]	12,10
Med/Mb,Rd	0,72

Coeficientes Mcr	
C1	1,77
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,034
yj [m]	-0,104

Interação de Esforços na Secção			
Coef.	N	M	Soma
0,8	0,09	0,77	0,86

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,40		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,05	0,29	0,02	0,37
CmLT	26,87		0,05	0,72	0,02	0,80
kyy	0,41					
kyz	0,61					
kzy	1,00					
kzz	0,61					

ESTUDO 4 - MODELO SLOPE 5° (8 PILARES) - VIGA

Secção C 120x2	
Classe 3	
A [m²]	5,08E-04
Aeff [m²]	5,08E-04
Iy [m4]	3,41E+01
Iz [m4]	4,76E-02
It [m4]	1,99E-02
Iw [m6]	6,57E-10
iy [m]	1,92E-05
iz [m]	5,90E-06
Wy,eff [m3]	1,92E-05
Wz,eff [m3]	5,90E-06
eNy [m]	0,00E+00
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ε
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	3,195	Nc,Rd	178
My,ed	4,969	My,Rd	7
Mz,ed	0,25	Mz,Rd	2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,01	0,37	-0,09	0,29

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
λ1	76,953
λy	0,272
λz	0,325
λmax	0,325
λmax>0,2	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,76
Φ	0,60
χ (<1)	0,91
Nb,Rd [kN]	160,92
Ned/Nb,Rd	0,02

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	0,995
Lcr,y [m]	0,995
Lcr,z [m]	0,498
Mcr [kNm]	40,54
λLTz	0,226
λLTy	0,407
λLTy>0,4	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ LT	0,62
χ LT (<1)	0,92
Mb,Rd [kNm]	6,20
Med/Mb,Rd	0,80

Coeficientes Mcr	
C1	1,00
C2	0
C3	1
zg [m]	0,000
ys [m]	-0,041
yj [m]	-0,056

Interação de Esforços na Secção			
Coef.	N	M	Soma
0,8	0,04	0,84	0,88

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,40		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,02	0,32	0,07	0,41
CmLT	24,20		0,02	0,80	0,07	0,89
kyy	0,40					
kyz	0,60					
kzy	1,00					
kzz	0,60					

ESTUDO 4 - MODELO SLOPE 5° (8 PILARES) - ESCORA

Secção Ω	50x1,5
Classe	4
A [m ²]	2,76E-04
Aeff [m ²]	1,48E-06
Iy [m ⁴]	2,37E+01
Iz [m ⁴]	2,47E-02
It [m ⁴]	1,95E-02
Iw [m ⁶]	2,06E-10
iy [m]	3,86E-06
iz [m]	3,98E-06
Wy,eff [m ³]	0,00E+00
Wz,eff [m ³]	0,00E+00
eNy [m]	1,65E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	5,247	Nc,Rd	95,0
My,ed	0,141	My,Rd	1,4
Mz,ed	0,103	Mz,Rd	1,3

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,02	-0,10	0,08	0,00

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,832
Lcr,y [m]	1,832
Lcr,z [m]	1,832
λ_1	76,953
λ_y	0,957
λ_z	1,212
λ_{max}	1,212
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,48
$\chi (<1)$	0,43
Nb,Rd [kN]	40,70
Ned/Nb,Rd	0,13

Encurvadura lateral - Mb,Rd
NÃO APLICÁVEL

ESTUDO 4 - MODELO SLOPE 5° (8 PILARES) - MADRE

Secção Ω 50x2,5	
Classe	3
A [m²]	4,50E-04
Aeff [m²]	0,00E+00
Iy [m4]	2,37E+01
Iz [m4]	2,41E-02
It [m4]	1,91E-02
Iw [m6]	9,27E-10
iy [m]	6,17E-06
iz [m]	6,23E-06
Wy,eff [m3]	0,00E+00
Wz,eff [m3]	0,00E+00
eNy [m]	2,62E-10
eNz [m]	0,00E+00

Material [Mpa]			
fy	E	G	ϵ
350	210000	80800	0,819

Esforços Máximos [kN] [kNm]			
N,ed	0,417	Nc,Rd	157,5
My,ed	0,33	My,Rd	2,2
Mz,ed	1,055	Mz,Rd	2,2

Interação Esforços do caso condicionante			
N	My	Mz	Soma
0,00	-0,09	0,70	0,62

Encurvadura - Nb,Rd	
L [m]	1,828
Lcr,y [m]	1,828
Lcr,z [m]	1,828
λ_1	76,953
λ_y	0,984
λ_z	1,245
λ_{max}	1,245
$\lambda_{max} > 0,2$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,49
Φ	1,53
$\chi (<1)$	0,41
Nb,Rd [kN]	65,03
Ned/Nb,Rd	0,01

Encurvadura lateral - Mb,Rd	
L [m]	1,828
Lcr,y [m]	1,828
Lcr,z [m]	1,828
Mcr [kNm]	10,93
λ_{LTz}	0,446
λ_{LTy}	0,444
$\lambda_{LTy} > 0,4$	
Não dispensa encurvadura	
alfa	0,34
Φ_{LT}	0,64
$\chi_{LT} (<1)$	0,91
Mb,Rd [kNm]	1,96
Med/Mb,Rd	0,17

Coeficientes Mcr	
C1	1,12
C2	0,45
C3	0,53
zg [m]	0,02
ys [m]	0,09
yj [m]	0,10

Interação de Esforços na Secção			
Coef.	N	M	Soma
0,8	0,02	0,24	0,26

Interação de Esforços no elemento						
Cmy	0,40		N	My	Mz	Soma
Cmz	0,60		0,01	0,07	0,29	0,37
CmLT	8,20		0,01	0,17	0,29	0,47
kyy	0,40					
kyz	0,60					
kzy	1,00					
kzz	0,60					

