

Aplicação dos Eurocódigos 0 e 1 – Análise Comparativa com as Congéneres SIA 260 e 261

Ricardo Henrique Vilela Branco

Relatório final de Projeto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Dezembro 2013



Aplicação dos Eurocódigos 0 e 1 – Análise Comparativa com as Congéneres SIA 260 e 261

Ricardo Henrique Vilela Branco

Relatório final de Projeto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Orientador:

Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira

Co-orientador:

Carlos Liberal Moreno Afonso

Dezembro 2013

Agradecimentos

Quero agradecer às inúmeras pessoas que estiveram direta ou indiretamente envolvidas na elaboração deste trabalho.

Começo pelo Presidente do Instituto Politécnico de Bragança, Doutor Sobrinho Teixeira e pelos funcionários desta instituição pelas excelentes condições oferecidas.

Expresso os meus sinceros agradecimentos aos Professores Débora Ferreira e Carlos Moreno, cuja orientação foi fundamental no decorrer desta investigação, pela disponibilidade, dedicação, motivação e amizade oferecidas. Gostaria também de manifestar, igualmente, a minha gratidão pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso de mestrado.

Ao Diretor do Mestrado em Engenharia da Construção, Professor Manuel Minhoto pelas oportunidades oferecidas aos alunos assim como pelo incentivo prestado.

Ao Professor Braz César pela revisão e acompanhamento da simulação estrutural do modelo tridimensional.

Um agradecimento especial à minha namorada, Florinda Monteiro, pela paciência, motivação e coragem demonstradas ao longo do trabalho, que embora esteja longe fisicamente foi fundamental para o desfecho deste estudo.

Aos meus pais, irmãs e familiares pelas hipóteses e esforços apresentados para que pudesse seguir os estudos e pelo carinho demonstrado.

Por fim, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos e colegas pela amizade, apoio e compreensão nesta fase da minha vida.

Resumo

Os Eurocódigos 0 e 1 (EN 1990, EN 1991), que substituíram o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP) na quantificação das principais ações a que uma estrutura está sujeita, como sejam a sobrecarga de utilização, o vento e a neve, trouxeram uma uniformização das metodologias de conceção e dimensionamento estrutural a nível da União Europeia. A Suíça é um dos poucos países da Europa que, não fazendo parte da União Europeia, continua a seguir normas de dimensionamento internas, as SIA – *Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes*.

A segurança estrutural é um dos fatores importantes da construção. Para garantir esta segurança há a necessidade de dotar a estrutura de capacidade resistente adequada. Uma das etapas iniciais do processo de dimensionamento consiste na quantificação e combinação das diferentes ações. São abordados ainda, no presente trabalho, os vários métodos de combinação da ação, bem como as principais ações a considerar no dimensionamento estrutural. Os três regulamentos são analisados e comparados para as diferentes ações.

Esta investigação envolveu o estudo das normas e o processo de obtenção das ações associadas à neve, ao vento e às sobrecargas de utilização atuantes na estrutura. Faz também parte deste trabalho a realização de folhas de cálculo automático através do *Software* Microsoft Excel para a determinação das diferentes ações aqui analisadas.

Por fim, é analisado um caso de estudo de um edifício real para validar as referidas folhas de cálculo e analisar as principais diferenças existentes entre as normas.

Palavras-chave

EN; RSAEEP; SIA; Sobrecarga; Ação da neve; Ação do vento; Pressão dinâmica; Combinação de ações.

Résumé

Les Eurocodes 0 et 1 (EN 1990, EN 1991), qui remplacent le code Portugais (*Règlement de Sécurité et Actions pour les Structures de Bâtiments et de Ponts – RSAEEP*) quant à la quantification des principales actions sur les structures porteuses comme les charges utiles, le vent et la neige, ont apporté une normalisation des méthodes de conception et calcul des structures au niveau de l'Union Européenne. La Suisse est l'un des rares pays européens qui, tout en ne faisant pas part de l'Union Européenne, continue de suivre les normes internes SIA – société suisse des ingénieurs et des architectes.

La sécurité structurale est un des facteurs plus importants dans la construction. Pour être en mesure d'assurer la sécurité et la sûreté satisfaisantes, il y a la nécessité de fournir la capacité porteuse nécessaire à la structure. L'une des premières étapes du processus de dimensionnement est la quantification et la combinaison des différentes actions.

Dans cet ouvrage, les différentes méthodes permettant de combiner les actions sont abordées, ainsi que les principales actions à prendre en compte en matière de conception structurale. Trois règlements sont analysés et comparés en face des différentes actions.

Cette recherche a porté sur l'étude des règles et le processus d'obtention des actions dues à la neige, au vent et à la charge utile à laquelle une structure est soumise. Il fait également partie de ce travail l'élaboration de feuilles de calcul automatique via le *Software Microsoft Excel* afin de déterminer les différentes actions ici analysées.

Une étude de cas sera encore menée autour d'un bâtiment réel afin de valider les feuilles de calcul et d'analyser les principales différences entre les normes.

Mots-Clés

EN; RSAEEP; SIA; Charge utile; Neige; Vent; Pression dynamique; Combinaison d'actions.

Índice geral

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 – Conceitos gerais	1
1.2 – Enquadramento.....	2
1.3 – Organização da tese.....	3
Capítulo 2 – Combinações de ações segundo as normas estudadas.....	5
2.1 – Considerações iniciais	5
2.2 – Estados limites últimos.....	5
2.3 – Estados limites de utilização	8
Capítulo 3 – A ação da sobrecarga de utilização em edifícios.....	13
3.1 – Quantificação da ação da sobrecarga de utilização segundo o RSAEEP.....	13
3.2 – Quantificação da ação da sobrecarga de utilização segundo a EN 1991	16
3.3 – Quantificação da ação da sobrecarga de utilização segundo a norma suíça SIA 261 .	19
3.4 – Folha de cálculo automático.....	21
3.5 – Implementação da ação da sobrecarga de utilização na folha de cálculo automático.	23
3.6 – Análise paramétrica das diferentes normas	27
Capítulo 4 – A ação da neve.....	29
4.1 – Quantificação da ação da neve segundo o RSAEEP	29
4.2 – Quantificação da ação da neve segundo a EN 1991.....	32
4.3 – Quantificação da ação da neve segundo a norma suíça SIA 261	39
4.4 – Implementação da ação da neve numa folha de cálculo automático.....	42
4.5 – Análise paramétrica das diferentes normas	46
Capítulo 5 – A ação do vento	49
5.1 – Quantificação da ação do vento segundo o RSAEEP	49
5.2 – Quantificação da ação do vento segundo a EN 1991	55
5.3 – Quantificação da ação do vento segundo a norma suíça SIA 261	64

5.4 – Implementação da ação do vento numa folha de cálculo automático	68
5.5 – Análise paramétrica das diferentes normas	77
Capítulo 6 – Caso de Estudo	81
6.1 – Considerações iniciais	81
6.2 – Comparação da ação da sobrecarga de utilização segundo a EN 1991 e a norma suíça SIA 261	82
6.3 – Comparação da ação da neve segundo a EN 1991 e a norma suíça SIA 261	83
6.4 – Comparação da ação do vento segundo a EN 1991 e a norma suíça SIA 261	85
6.5 – Aplicação das diferentes normas – análise estrutural comparativa.....	91
6.5.1 – Geometria	91
6.5.2 – Ações	92
6.5.3 – Combinações de ações	93
6.5.4 – Resultados	93
6.5.5 – Considerações finais.....	105
Capítulo 7 – Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	107
7.1 – Conclusões	107
7.2 – Desenvolvimentos futuros.....	109
Referências bibliográficas	111
ANEXO A.....	113
ANEXO B	121

Índice de figuras

Figura 1 – Modelo tipo aplicado no programa de cálculo automático.....	22
Figura 2 – Legenda de cores das células nas folhas de cálculo.....	23
Figura 3 – Comparação dos valores da sobrecarga no edifício tipo para os três regulamentos em estudo.....	27
Figura 4 – Distribuição do coeficiente dependente da zona para o continente e ilhas.....	34

Figura 5 – Altitude de referência para a carga da neve (SIA 261).....	39
Figura 6 – Disposição da carga da neve nas diferentes coberturas (SIA 261).....	40
Figura 7 – Análise de resultados da carga da neve na cobertura para os três regulamentos em estudo	46
Figura 8 – Convenção de sinais para a ação exercida pelo vento sobre as superfícies (SIA 261)	49
Figura 9 – Zonas em cobertura de duas vertentes	53
Figura 10 – Procedimento recomendado para determinação do coeficiente de pressão exterior c_{pe} em edifícios, para uma superfície carregada A compreendida entre 1 m^2 e 10 m^2 (EN 1991)	58
Figura 11 – Altura de referência z_e em função de h e b , e correspondente perfil de pressão dinâmica (EN 1991)	59
Figura 12 – Zonas em paredes verticais (EN 1991).....	60
Figura 13 – Zonamento em coberturas de duas vertentes	63
Figura 14 – Valor de referência da pressão dinâmica (SIA 261).....	66
Figura 15 – Zonas em coberturas de duas vertentes (adaptado da SIA 261)	68
Figura 16 – Zonamento em fachadas e coberturas (RSAEEP e SIA 261).....	77
Figura 17 – Representação tridimensional do edifício.....	81
Figura 18 – a) Pontos de análise dos deslocamentos em ELS, b) localização do pórtico em estudo	95
Figura 19 – Deformada em ELS para as normas EN 1991 (esquerda) e SIA 261 (direita)	96
Figura 20 – a) Pontos de análise das rotações, b) localização do pórtico em estudo.....	97
Figura 21 – Momentos fletores ELU segundo: a) EN 1991, b) SIA 261, e c) localização do pórtico em estudo	100
Figura 22 – Esforço transversal ELU segundo: a) EN 1991, b) SIA 261	101
Figura 23 – Momento fletor na laje no plano indicado para as normas a) EN 1991 para M_x , b) SIA 261 para M_x , c) EN 1991 para M_y , d) SIA 261 para M_y , e e) localização do pórtico em estudo	103
Figura 24 – Esforço transversal na laje no plano indicado para as normas a) EN 1991 para V_x , b) SIA 261 para V_x , c) EN 1991 para V_y , d) SIA 261 para V_y	104

Índice de tabelas

Tabela 1 – Coeficientes de combinação ψ_0 segundo as diferentes normas.....	8
Tabela 2 – Resumo das combinações de ações para o estado limite de utilização	12
Tabela 3 – Resumo das sobrecargas de utilização (adaptado de RSAEEP).....	15
Tabela 4 – Sobrecarga em pavimentos, varandas e escadas de edifícios (EN 1991).....	17
Tabela 5 – Valor característico da sobrecarga em pavimentos associados a armazenamento (EN 1991).....	18
Tabela 6 – Valor característico da sobrecarga em coberturas da categoria H (EN 1991).....	18
Tabela 7 – Valor característico da sobrecarga em estacionamentos e em zonas de circulação	19
Tabela 8 – Categoria de utilização e valores característicos das sobrecargas de utilização (SIA 261).....	21
Tabela 9 – Coeficientes μ para coberturas isoladas (RSAEEP).....	31
Tabela 10 – Coeficientes μ para coberturas múltiplas (RSAEEP).....	32
Tabela 11 – Situações de projeto e disposições de carga	33
Tabela 12 – Topografias de exposição ao vento (EN 1991)	35
Tabela 13 – Coeficientes de pressão exterior (RSAEEP)	52
Tabela 14 – Coeficiente de pressão exterior para cobertura de duas vertentes.....	54
Tabela 15 – Categoria de terreno e respetivo parâmetro (EN 1991).....	56
Tabela 16 – Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta regular (EN 1991)	61
Tabela 17 – Coeficiente de pressão exterior para coberturas de duas vertentes	62
Tabela 18 – Altura de gradiente z_g e exposição da rugosidade do solo, α_r	65
Tabela 19 – Coeficiente para $h:b:d = 1:1:1$, inclinação da cobertura de 10° (adaptado da SIA 261).....	68
Tabela 20 – Análise comparativa do processo de quantificação da sobrecarga de utilização .	82
Tabela 21 – Análise comparativa do processo de quantificação da ação da neve	83
Tabela 22 – Análise comparativa do processo de quantificação da ação do vento.....	85
Tabela 23 – Corte basal para o modelo tridimensional segundo ambas as normas	94
Tabela 24 – Deslocamentos (ELS) nos pontos em análise para as normas EN 1991 e SIA 261	96
Tabela 25 – Rotação dos pontos em análise para as normas EN 1991 e SIA 261	98

Índice de gráficos

Gráfico 1 - Valor característico da carga da neve ao nível do solo em função da altitude	47
Gráfico 2 – Valores da carga da neve ao nível do solo para uma altitude de 600 m segundo as diferentes normas	48
Gráfico 3 – Valor característico da pressão dinâmica do vento (RSAEEP)	51
Gráfico 4 – Coeficiente de pressão interior no caso de aberturas uniformemente distribuídas (EN 1991).....	64
Gráfico 5 – Coeficiente de repartição do vento c_h em função da altura z e da categoria do terreno (SIA 261)	65
Gráfico 6 – Comparação dos valores de pressão do vento para a direção de 0 graus.....	78
Gráfico 7 – Comparação dos valores de pressão do vento para a direção de 90 graus.....	79

Simbologia

A presente simbologia segue a notação das normas europeias EN 1990 e EN 1991. Na ausência dos parâmetros das normas acima descritas, prevalece a simbologia referente à norma em análise.

Letras maiúsculas latinas

A	Altitude do local acima do nível do mar [m]
C_e	Coeficiente de exposição
C_{est}	Coeficiente para cargas da neve excepcionais
C_t	Coeficiente térmico
C_z	Coeficiente dependente da zona
I_v	Intensidade de turbulência
EN 1990	Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas
EN 1991	Eurocódigo 1 – Ações em estruturas
RSAEEP	Regulamento de segurança e ações para estruturas de edifícios e pontes
SIA 260	<i>Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes</i> – Bases para o projeto de estruturas
SIA 261	<i>Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes</i> – Ações em estruturas

Letras minúsculas latinas

b	Largura da construção [m]
c_{dir}	Coeficiente de direção
c_h	Coeficiente de repartição do vento
c_o	Coeficiente de orografia
c_p	Coeficiente de pressão
c_{pe}	Coeficiente de pressão exterior
c_{pi}	Coeficiente de pressão interior
c_r	Coeficiente de rugosidade
c_{season}	Coeficiente de sazão

d	Profundidade da construção [m]
e	Distância ao bordo
h	Altura da construção [m]
k_l	Coefficiente de turbulência
k_r	Coefficiente de terreno
l_s	Extensão dos deslocamentos da neve ou da área carregada com neve [m]
q_{ek}	Valor característico da pressão exercida pelo vento numa superfície exterior
q_{ik}	Valor característico da pressão exercida pelo vento numa superfície interior
q_k	Valor característico de uma carga uniformemente distribuída [kN/m ²]
q_p	Pressão dinâmica de pico
q_{p0}	Valor de referência da pressão dinâmica
s	Carga da neve na cobertura [kN/m ²]
s_{Ad}	Valor de cálculo da carga da neve excecional ao nível do solo [kN/m ²]
s_e	Carga da neve saliente, por metro de comprimento [kN/m]
s_k	Valor característico da carga da neve ao nível do solo no local considerado [kN/m ²]
v_b	Valor de referência da velocidade do vento
$v_{b,0}$	Valor básico da velocidade de referência do vento
v_m	Velocidade média do vento
w	Pressão exercida pelo vento
w_k	Valor característico da pressão dinâmica [kN/m ²]
z	Altura acima do solo
z_0	Comprimento de rugosidade
z_e	Altura de referência para a pressão exterior exercida pelo vento
z_g	Altura do gradiente
z_i	Altura de referência do edifício, para efeito da determinação da pressão interior exercida pelo vento
z_{max}	Altura máxima
z_{min}	Altura mínima

Letras minúsculas gregas

α	Inclinação da vertente da cobertura, medida em relação à horizontal [°]
α_r	Expoente de rugosidade do solo
β	Ângulo com a horizontal da tangente à diretriz de uma cobertura cilíndrica [°]
δ_p	Coefficiente de pressão
γ	Peso volúmico da neve [kN/m ³]
μ	Coefficiente de forma para a carga da neve
θ	Direção de incidência do vento
ρ	Massa volúmica do ar
σ_v	Desvio padrão da turbulência
ψ_0	Coefficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável
ψ_1	Coefficiente para a determinação do valor frequente de uma ação variável
ψ_2	Coefficiente para a determinação do valor quase permanente de uma ação variável

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Conceitos gerais

O sector da construção tem vindo a mudar para dar resposta às crescentes necessidades das populações. A segurança é um dos fatores fundamentais na construção e o aparecimento de regulamentos e normas de dimensionamento contribuem para garantir essa segurança. Com a formação da União Europeia, e com o desaparecimento das fronteiras, assistiu-se à crescente preocupação na homogeneização das normas de maneira a que um profissional de qualquer um dos estados-membros pudesse dimensionar estruturalmente obedecendo a normas uniformizadas. Dessa forma, o Comité Europeu de Normalização (CEN) procurou criar um conjunto de normas articuladas e comuns a todos os países para incentivar o mercado interno europeu. Essa família de normas é denominada por Eurocódigos e é constituída por 10 normas, em que cada uma é, geralmente, organizada em distintas partes. Para efeito deste estudo serão analisadas as normas EN 1990 [1] e EN 1991 [2], intituladas bases para o projeto de estruturas e ações em estruturas, respetivamente.

A primeira norma (EN 1990) diz respeito à combinação das ações, isto é, consiste num arranjo probabilístico de ocorrência de uma determinada ação com acontecimento de uma outra em simultâneo. Este procedimento simula a atuação das várias ações para um cenário extremo de forma a manter uma margem aceitável de segurança estrutural. Como é natural, um edifício está sujeito a ações exteriores provenientes do clima, tal como a ocorrência de queda de neve, o vento, as mudanças de temperatura, entre outros, pelo que existe a necessidade de dotar o edifício de capacidade resistente adequada face às ações previsíveis. Para tal é necessário combinar as ações entre si de forma a varrer o maior número de hipóteses de solicitação, e assegurar que o edifício estará preparado para suportar os efeitos dessas ações, a menos de uma diminuta probabilidade de ruína tida como aceite. Para que seja possível analisar todos os casos possíveis, evitando contudo o sobredimensionamento da estrutura com consequências ao nível da economia da construção, é considerada uma ação variável que atuará na totalidade (denominada por ação de base da combinação) enquanto as restantes ações variáveis são afetadas por um coeficiente reduzindo a sua participação. Este procedimento deve-se ao fato de ser inverosímil a ocorrência plena e simultânea das diferentes ações na sua totalidade. Assim, cada combinação de ações corresponde a um cenário ou hipótese real de carga.

A segunda norma (EN 1991) trata da quantificação das ações na estrutura, de forma a definir as solicitações elementares que a estrutura deverá suportar. O presente estudo apenas irá abordar três ações, sendo elas as ações devidas à sobrecarga de utilização em edifícios, ou seja, a ação que o edifício deverá suportar devido à sua utilização, a ação da neve nas diferentes zonas do edifício, e por fim a ação do vento na estrutura.

1.2 – Enquadramento

Num mundo globalizado, o sector da construção teve e continua a ter a necessidade de se expandir e ganhar mobilidade o que nos torna cada vez mais competitivos. A procura de mercados externos por parte das empresas portuguesas e dos técnicos ligados ao sector da construção civil surgiu como uma resposta à estagnação que se verifica em Portugal. Assim, o presente trabalho pretende dar um contributo no sentido de estabelecer a ponte entre duas realidades normativas bem distintas. Entender a regulamentação vigente num outro país contrapondo com a utilizada em Portugal e na Europa é, por certo, uma mais-valia.

A pesquisa bibliográfica feita sobre o tema revelou que este género de análise não foi ainda conduzido. Dada a escassez de informação, foi estabelecido contato com o responsável pela comissão de revisão das normas suíças SIA 260 e SIA 261, o Professor Pierino Lestuzzi, com o objetivo de obter mais informações acerca do tema. A referida comissão está presentemente a trabalhar nestas matérias, sendo portanto um tema ainda em desenvolvimento.

Assim, o presente trabalho pretende dar um contributo no tema da comparação dos regulamentos estruturais. A abordagem inicial assentava num processo de análise paramétrica das normas, sendo o objetivo a inclusão das normas EN 1990 e EN 1991, bem assim como a utilização dos Anexos Nacionais suíços. Esta ideia foi barrada com a falta dos Anexos Nacionais referentes ao território helvético, tornando impossível estabelecer uma comparação direta na ausência dos parâmetros específicos desse país. Sucessivos contactos com os responsáveis pela comissão de implementação dos Anexos Nacionais suíços advertiram que, à data, a referida comissão trabalha nessas matérias pelo que não é ainda possível facultar as informações necessárias para a progressão da ideia inicial.

Dessa forma, deu-se início à comparação das diferentes normas baseada na consideração de locais semelhantes do ponto de vista climatérico, sendo a altitude e os parâmetros de carácter semelhante entre os dois locais escolhidos. Assim, os locais escolhidos

para efetuar a comparação foram Bragança para o território português, e Lausanne para o território suíço. Para a obtenção dos parâmetros necessários referentes à comparação entre os dois locais foram utilizados o antigo regulamento RSAEEP [3] e as normas europeias EN 1990 e EN 1991 para Bragança, e os regulamentos suíços SIA 260 [4] e 261 [5] para caracterizar Lausanne.

1.3 – Organização da tese

A presente tese de mestrado é composta por sete capítulos, referências bibliográficas e dois anexos.

O capítulo 1 contém uma breve introdução ao assunto a tratar no presente trabalho, assim como o enquadramento da tese.

O capítulo 2 é referente à explanação das combinações de ações especificadas nos diferentes documentos normativos em análise assim como à comparação entre elas.

O capítulo 3 é dedicado ao estudo das sobrecargas de utilização à luz das diferentes normas. Engloba ainda a apresentação das folhas de cálculo automático desenvolvidas com o intuito de uma comparação sistemática das diferentes normas aqui analisadas.

O capítulo 4 caracteriza as ações da neve segundo os diferentes regulamentos analisados, bem assim como a caracterização de cada parâmetro envolvido. Também, contém o cálculo efetuado pelas folhas de cálculo para as diferentes normas.

O capítulo 5 caracteriza as ações do vento para as diferentes normas aqui tratadas, assim como a caracterização dos vários parâmetros envolvidos. Contém também os cálculos, efetuados segundo as diferentes normas, com vista à obtenção das ações do vento, e consequente comparação assente nas folhas de cálculo desenvolvidas.

O capítulo 6 contém a aplicação dos conceitos anteriormente analisados a um caso de estudo. Foi modelado tridimensionalmente um edifício com recurso a um *software* de análise estrutural, comparando-se os resultados obtidos a partir das ações e das combinações de ações definidas pelas normas EN 1991 e SIA 261.

No capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões assim como as recomendações para trabalhos e desenvolvimentos futuros.

No Anexo A, encontram-se a planta tipo e o corte do edifício associado ao caso de estudo, que serviram de base para a modelação tridimensional do edifício.

No Anexo B encontram-se as dimensões dos vários elementos nos diferentes pórticos do edifício tridimensional.

Capítulo 2 – Combinações de ações segundo as normas estudadas

2.1 – Considerações iniciais

De uma forma geral, em todos os regulamentos aqui estudados, as ações são classificadas pelo intervalo de tempo em que a estrutura é submetida à ação. O regulamento denomina-as da seguinte forma:

- Ações permanentes, são as ações que durante a vida útil da estrutura variam muito pouco como o peso próprio da estrutura, por exemplo;
- Ações variáveis, como sejam a ação do vento, da neve e da sobrecarga de utilização que são as ações objeto de estudo do presente trabalho;
- Ações de acidente, que possuem fraca probabilidade de acontecer mas que devem ser tomadas em conta no dimensionamento estrutural.

É importante referir que para a combinação das ações, em todos os regulamentos, apenas serão consideradas as ações variáveis quando estas provocarem efeitos desfavoráveis para a estrutura.

Para uma mais fácil comparação, manipularam-se as expressões relativas às diferentes combinações de ações segundo as normas RSAEEP e SIA, uniformizando-se a notação de algumas variáveis em relação à utilizada pela norma EN 1990.

Estabelece-se, seguidamente, uma análise comparativa relativa aos estados limites últimos (ELU) e aos estados limites de utilização (ELS).

2.2 – Estados limites últimos

Como seria de esperar, por razões de segurança estrutural, os diferentes regulamentos recorrem à combinação e majoração das ações assim como à minoração das capacidades resistentes dos materiais estruturais envolvidos, de maneira a verificar-se que os diferentes elementos estruturais respeitam a condição básica para a estabilidade estrutural, expressa sob a forma:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

sendo:

E_d valor de cálculo do esforço atuante;

R_d valor de cálculo do esforço resistente.

Os valores de cálculo dos esforços atuantes a considerar para a verificação da segurança são obtidos a partir das regras e critérios de combinação das ações. Existem dois tipos de combinação: a *combinação fundamental*, envolvendo as ações de projeto previstas e às quais a estrutura estará submetida num cenário de ruína (resistência, formação de mecanismos ou perda de estabilidade), como sejam as ações permanentes e as ações variáveis como foi visto anteriormente. O segundo tipo é denominado de *combinações acidentais* em que, como o nome indica, apenas em caso de acidente se prevê que as ações atuem na estrutura.

Refere-se que, no presente trabalho, apenas é tratado o lado esquerdo da inequação (1), isto é, a ação. Quanto à capacidade resistente de cálculo, a resistência dos materiais é também ela afetada por coeficientes parciais de segurança, de modo a manter uma margem global de segurança independente do material estrutural utilizado.

Conduz-se, seguidamente, uma análise comparativa sobre a verificação da segurança em relação aos ELU.

Como se mostrará, existem pequenas diferenças no que diz respeito à combinação de ações em ELU nos regulamentos aqui analisados: o RSAEEP – *Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes*, a EN 1990 – *Eurocódigo 0*, e a SIA 260 – *Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes*. Essas diferenças assentam na forma como o coeficiente de combinação e o coeficiente parcial de segurança atua nas ações secundárias (ou concomitantes), isto é, nas ações variáveis que não a ação de base da combinação.

Recorrendo ao RSAEEP, os valores de cálculo dos esforços atuantes para a verificação da segurança são obtidos pela combinação fundamental de ações através da expressão seguinte:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_Q [Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i}] \quad (2)$$

Para a EN 1991, a determinação do valor de cálculo dos esforços atuantes para a verificação da segurança é feita com a combinação seguinte [6]:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

Efetuada desde já uma análise comparativa entre as duas expressões anteriores, conclui-se que elas são idênticas, possuindo ambas a ação permanente afetada pelo respectivo coeficiente parcial de segurança e as ações variáveis submetidas ao coeficiente parcial de segurança. As ações variáveis concomitantes são ainda sujeitas a um coeficiente de combinação. Contudo, a EN 1991 abre explicitamente a possibilidade de o coeficiente parcial de segurança para a ação variável de base poder ser diferente do coeficiente parcial de segurança utilizado para as restantes ações variáveis (ações concomitantes).

Para efeito deste estudo serão analisadas as normas SIA 260 e SIA 261, intituladas bases para o projeto de estruturas e ações em estruturas, respetivamente.

A norma suíça SIA 260 indica a expressão seguinte para a verificação da segurança em ELU [7]:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4)$$

Comparando a norma SIA 260 com as acima descritas, verifica-se que, nas ações variáveis, apenas a ação de base é majorada, sendo a ou as ações acompanhantes minoradas pelo respectivo coeficiente de combinação, ψ_0 , o que indicia existir uma aparente e significativa diferença de tratamento da ação variável de base relativamente às restantes ações variáveis.

Analisando individualmente os valores dos coeficientes de combinação (Tabela 1) verifica-se que, na norma SIA 260, tais coeficientes apontam tendencialmente para valores superiores para a ação da neve, em função da altitude de projeto, sendo o coeficiente menor ou maior consoante o grau de exigência e da possibilidade de ocorrência de nevões.

Conclui-se portanto que, embora a SIA 260 não opte por majorar as ações concomitantes, o acréscimo da segurança da ação acompanhante está assegurada por um valor ψ_0 superior ao utilizado pela EN 1990.

Tabela 1 – Coeficientes de combinação ψ_0 segundo as diferentes normas

Ação	RSAEEP	EN 1990	SIA 260
Sobrecarga de utilização	0,7	0,7	0,7
Neve	0,6	0,5	$(1-60/h^a)^b$
Vento	0,6	0,6	0,6

Evidentemente, os valores dos coeficientes refletem, do ponto de vista estatístico, as realidades climáticas da região do país em referência.

Relativamente aos ELU, não existem diferenças quanto às ações permanentes entre as normas analisadas.

2.3 – Estados limites de utilização

Em relação à verificação da segurança em conformidade com os ELS, há a necessidade de estabelecer a duração de aplicação da ação em função do grau de exigência e de conformidade com o critério de utilização, de forma a determinar as condições de segurança a serem utilizadas.

Neste estado limite, deve verificar-se a seguinte inequação:

$$E_d \leq C_d \quad (5)$$

sendo:

C_d valor de cálculo correspondente ao valor limite do critério de utilização;

E_d valor de cálculo dos efeitos das ações especificadas no critério de utilização, determinado com base na combinação em causa.

Como se mostrará, existem, também aqui, pequenas diferenças no que diz respeito à combinação de ações em ELS nos regulamentos aqui analisados: o RSAEEP, a EN 1990, e a SIA 260. Essas diferenças assentam na forma como o coeficiente de combinação atua nas ações secundárias (ou concomitantes), isto é, nas ações variáveis que não a ação de base da combinação.

^a Altitude h expressa em m.

^b Valor não negativo.

Em todas as normas estudadas no presente trabalho existem três tipos de combinações associadas ao estado limite de utilização:

- Combinação característica (ou rara), associada a um estado limite de muito curta duração, ou seja, são ações que no período útil da estrutura, geralmente de 50 anos, solicitarão a estrutura somente por algumas horas;
- Combinação frequente, associada a um estado limite de curta duração, ou seja, a solicitação aplicada à estrutura por um período total equivalente a cerca de 5% da sua vida útil;
- Combinação quase-permanente, associada a um cenário de longa duração, ou seja, as ações que solicitarão a estrutura durante pelo menos metade da vida útil da estrutura.

A análise aos regulamentos acima indicados inclui uma comparação das diferentes combinações que se segue.

Quanto ao RSAEEP, as expressões que permitem definir as combinações de ações para o estado limite de utilização, em função do tempo de atuação da ação, são as seguintes:

a) Combinação característica:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{m,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{1,i} Q_{k,i} \quad (6)$$

b) Combinação frequente:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{m,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (7)$$

c) Combinação quase-permanente:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{m,j} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (8)$$

Em relação à norma EN 1990, as expressões que permitem definir as combinações de ações para o estado limite de utilização são as seguintes:

a) Combinação característica:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (9)$$

b) Combinação frequente:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (10)$$

c) Combinação quase-permanente:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (11)$$

Analisando a norma suíça SIA 260, as expressões homólogas são as seguintes:

a) Combinação característica:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (12)$$

b) Combinação frequente:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (13)$$

c) Combinação quase-permanente:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (14)$$

Na Tabela 2 é apresentado um quadro resumo com as expressões das diferentes combinações para os estados limites de utilização (característica, frequente e quase-permanente) nas três normas aqui estudadas.

Analisando as diferentes formulações, conclui-se que existem duas diferenças entre o regulamento português RSAEEP e as outras duas normas. O primeiro aspeto está relacionado com a maneira como a ação permanente entra na combinação de ações, optando o RSAEEP por fazê-lo, para os três tipos de combinações, em termos dos valores médios enquanto as

restantes normas optam por utilizar os valores característicos. No entanto, a diferença entre os valores médio e característico da ação permanente é, como se sabe, reduzida. O segundo aspecto visa a utilização do coeficiente para a determinação do valor frequente de uma ação variável, ψ_1 , que afeta as ações acompanhantes na combinação característica.

Dado que o RSAEEP utiliza o coeficiente ψ_1 na combinação característica, ao contrário dos outros regulamentos (EN 1991 e SIA 261) que utilizam o valor ψ_0 , e sendo o coeficiente ψ_1 tipicamente menor que o coeficiente ψ_0 , isto faz com que se considere um aumento do tempo de atuação da ação acompanhante ao longo da vida útil da estrutura. Na Tabela 1 é apresentado um quadro ilustrativo onde são exibidos os valores de ψ_0 utilizados em ambos os regulamentos discutidos neste parágrafo.

Numa análise geral conclui-se que o RSAEEP opta por desvalorizar a ação permanente especificando a ação em termos de valores médios mas, de certa maneira, mantém a necessária segurança estrutural impondo o aumento do tempo de atuação da ação acompanhante.

Em relação às restantes duas normas, estas apresentam uma formulação semelhante para a verificação da segurança em relação aos estados limites de utilização.

Tabela 2 – Resumo das combinações de ações para o estado limite de utilização

	RSAEPP	EN 1990	SIA 260
Combinações características	$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{m,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{1,i} Q_{k,i}$	$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$	$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$
Combinações frequentes	$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{m,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$	$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$	$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$
Combinações quase-permanentes	$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{m,j} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$	$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$	$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$

Capítulo 3 – A ação da sobrecarga de utilização em edifícios

A ação da sobrecarga de utilização é uma ação direta, geralmente vertical e descendente, determinada pela função e tipo de utilização a que o edifício está sujeito. A sobrecarga é aplicada em coberturas, pavimentos, varandas e acessos (rampas e vãos de escada). A ação da sobrecarga é pontualmente uma ação horizontal nos corpos e parapeitos.

Neste capítulo são classificadas as sobrecargas utilizadas em pavimentos, coberturas, zonas de acessos e varandas, segundo as três normas em análise.

3.1 – Quantificação da ação da sobrecarga de utilização segundo o RSAEEP

Analisando as sobrecargas de utilização em pavimentos impostas pelo RSAEEP, estas dividem-se em dois grupos: no caso de a concentração de pessoas ser o elemento preponderante, e quando a concentração de pessoas não é o fator mais preponderante. No primeiro grupo, são cinco as situações, em função da utilização prevista para o edifício:

- a) *Utilização de carácter privado: No caso de habitações, quartos de hotéis, quartos e pequenas enfermarias de hospitais. Para os casos em que os compartimentos são perfeitamente definidos e estes não excedem uma área de 20 m², a sobrecarga a ser utilizada pode tomar um valor inferior (ver Tabela 3).*
- b) *Utilização de carácter coletivo sem concentração especial: Para casos de dormitórios, salas de aula, escritórios em geral, salas de tratamento em hospitais, ou seja, a acumulação de pessoas é controlada.*
- c) *Utilização de carácter coletivo de média concentração: Para casos de salas de venda ao público, salas de espetáculos com cadeiras fixas, zonas acessíveis ao público e edifícios públicos, salas de espera, restaurantes, cafés.*
- d) *Utilização de carácter coletivo com possibilidade de grande concentração como sejam igrejas, salões de festas, ginásios, salas de espetáculos com cadeiras amovíveis.*

- e) *Utilização de carácter coletivo com possibilidade de muito elevada concentração, para os casos de estádios e recintos destinados a desportos.*

Para utilizações em que o elemento preponderante não é a concentração de pessoas, são também cinco as situações que contemplam o armazenamento de produtos, os equipamentos e mobiliários de carácter permanente:

- a) *Escritório com equipamentos pesados, cozinhas de hotéis e de restaurante.*
b) *Arquivo de escritório.*
c) *Oficina de indústria ligeira.*
d) *Garagem para automóveis ligeiros de carácter particular e garagens para automóveis ligeiros de carácter público.*
e) *Auto-silos destinados exclusivamente ao estacionamento de automóveis ligeiros, onde o seu pé direito é limitado a cerca de 2,20 m para impedir a entrada de veículos de maior porte, e onde a atividade de reparação e manutenção é interdita.*

Quanto às varandas, o valor característico da sobrecarga a ser considerado para estes espaços ou para espaços que possam ter funções análogas como é o caso de certas galerias, deverá ser dividido em duas frações. Numa faixa de 1 m a contar do parapeito da varanda deverá considerar-se o valor mínimo de 5,0 kN/m² (ver Tabela 3), na restante área deve considerar-se a sobrecarga do compartimento adjacente à varanda, ou seja, deverá ser utilizada a mesma sobrecarga que foi utilizada para o pavimento que dá acesso à varanda. Este agravamento no primeiro metro adjacente ao parapeito deve-se à possível aglomeração de pessoas junto ao parapeito aquando de eventos excepcionais [4].

No que se refere à quantificação da sobrecarga em acessos, esta deve, para os casos de escadas, rampas, galerias, ser considerada igual ao valor adotado para os pavimentos adjacentes. Para os casos de átrios e corredores de locais privados o valor da sobrecarga deverá ser de 3,0 kN/m², e de 5,0 kN/m² para locais públicos.^c

^c Excerto retirado de Comissão de Instituição e Revisão dos Regulamentos, 1983.

De seguida é apresentado, na Tabela 3, um resumo dos valores das sobrecargas de utilização recomendados pelo RSAEEP.

Tabela 3 – Resumo das sobrecargas de utilização (adaptado de RSAEEP)

Sobrecarga kN/m²	Coberturas	Cobertura ordinária		0,3	
		Terraço não acessível		1,0	
		Terraço acessível		2,0	
	Pavimentos	Concentração de pessoas é o elemento preponderante	Caráter privado	Geral	2,0
				< 20 m ²	1,5
			Caráter coletivo sem concentração especial		3,0
			Caráter coletivo de média concentração		4,0
			Caráter coletivo com elevada concentração		5,0
		Caráter coletivo com muito elevada concentração		6,0	
		Concentração de pessoas não é o elemento preponderante	Escritórios com equipamento pesado, cozinhas		4,0
			Arquivos		5,0
			Oficinas de indústria ligeira		5,0
			Garagem para automóveis ligeiros	Privadas	4,0
	Públicas			5,0	
	Auto-silo para automóveis ligeiros		3,0		
	Varandas	Locais que possam desempenhar funções análogas	Faixa de 1 m de largura adjacente ao parapeito	5,0	
			Restante superfície	Compartmento contíguo à varanda	
Acessos	Para escadas, rampas, galerias		Compartmento contíguo ao acesso		
	Para átrios e corredores	Privados	3,0		
		Públicos	5,0		

3.2 – Quantificação da ação da sobrecarga de utilização segundo a EN 1991

Segundo a EN 1991, as sobrecargas de utilização são classificadas conforme a categoria do edifício. Os valores da sobrecarga associada a equipamentos pesados, tais como cozinhas coletivas, salas de radiologia, salas de maquinaria, não são impostos por este regulamento, pelo que deve ser discutido com o dono de obra ou com a entidade competente e definir qual o valor a ser adotado.

Para os edifícios residenciais, sociais, comerciais e administrativos, procede-se à sua subdivisão por categorias de forma a corresponder às utilizações exigidas. A EN 1991 prevê quatro categorias, *A*, *B*, *C* e *D*, tendo como base a utilização específica do edifício. A categoria *A* é destinada a atividades domésticas e residenciais tais como salas em edifícios de habitação, quartos e enfermarias de hospitais, quartos de hotéis, cozinhas e lavabos. A Categoria *B* destina-se a escritórios em geral. Quanto à categoria *C*, referente a locais de reuniões com exceção das utilizações correspondentes às categorias *A*, *B* e *D*, esta divide-se em 5 subcategorias tendo em vista as diferentes zonas e configurações dos locais de reunião, sendo elas:

C1 – Zonas com mesas amovíveis, tal como salas de aulas, cafés, restaurantes, salões de jantar, receções, salas de leitura, entre outros;

C2 – Zonas com assentos fixos, ou com a disposição sempre idêntica, tal como igrejas, cinemas e teatros, salas de conferências, auditórios, salas de reuniões, salas de espera;

C3 – Zonas onde a movimentação de pessoas é facilitada pela ausência de mobiliário e objetos, tais como museus, salas de exposição, corredores de edifícios públicos e administrativos, hospitais, hotéis e em átrios de entrada de estações de comboio;

C4 – Zonas onde é possível a atividade física, tais como salões de dança, ginásios ou palcos;

C5 – Zonas onde é possível a acumulação de pessoas, tais como salas de concerto, zonas de atividade desportiva incluindo bancadas, terraços e zonas de acessos, plataformas rodoviários, entre outros.

As atividades comerciais integram a categoria *D*, e dividem-se em duas subcategorias, relativamente a zona de venda (subcategoria *D1*), e a zona de armazenamento (subcategoria *D2*).

Nos casos em que existam pavimentos com várias categorias, deve ser determinada a que induz os efeitos mais desfavoráveis efetuando o cálculo dos esforços ou das deformações para esse local.

No presente trabalho, somente se irão estudar as sobrecargas uniformemente distribuídas. Na Tabela 4 estão indicados os valores da sobrecarga para cada categoria e subcategoria.

Tabela 4 – Sobrecarga em pavimentos, varandas e escadas de edifícios (EN 1991)

Categorias de zonas carregadas	q_k [kN/m²]
Pavimentos	
Categoria <i>A</i>	2,0
Categoria <i>B</i>	3,0
Categoria <i>C</i>	
<i>C1</i>	3,0
<i>C2</i>	4,0
<i>C3</i>	5,0
<i>C4</i>	5,0
<i>C5</i>	6,0
Categoria <i>D</i>	
<i>D1</i>	4,0
<i>D2</i>	5,0
Varandas	^d
Escadas	^e

Relativamente às zonas de armazenamento e de atividades industriais, estas devem ser classificadas em duas subcategorias de acordo com a sua utilização; a categoria para armazenamento e a categoria de atividade industrial, denominadas respetivamente por *E1* e *E2* e divididas da seguinte forma:

^d Deve ser adotada uma sobrecarga uniformemente distribuída idêntica à do pavimento adjacente, com um mínimo de 5,0 kN/m² numa faixa de 1 m de largura adjacente ao parapeito.

^e Deve ser adotada uma sobrecarga uniformemente distribuída idêntica à do pavimento adjacente, com um mínimo de 3,0 kN/m².

E1 – Zonas ou locais suscetíveis à acumulação de mercadorias, incluídas as zonas de acesso;

E2 – Zonas destinadas a atividade industrial.

Na Tabela 5, é apresentado o valor característico recomendado para a sobrecarga de utilização uniformemente distribuída relativa à categoria indicada.

Tabela 5 – Valor característico da sobrecarga em pavimentos associados a armazenamento (EN 1991)

Categoria de zonas carregadas	q_k [kN/m²]
Categoria <i>E</i>	
<i>E1</i>	7,5
<i>E2</i>	^f

Tal como o RSAEEP, a EN 1991 prevê a utilização de sobrecargas em coberturas. Estas são classificadas em três categorias de acordo com o tipo de acessibilidade que possuem. As categorias para as coberturas são as *H*, *I* e *K*, sendo a *K* uma cobertura de utilização especial para aterragem de helicópteros, e depende da classe do helicóptero. Esta sobrecarga é analisada como uma carga concentrada. A categoria *H* é referente a coberturas não acessíveis com exceção para operações de manutenção e reparação correntes. A categoria *I* é relativa às coberturas acessíveis, sendo este tipo de cobertura comparada a um pavimento devido à facilidade de acesso e possível acumulação de pessoas. Desta forma as coberturas acessíveis devem ser incluídas numa categoria de *A* a *G*, referente aos pavimentos, dependendo da sua utilização.

Na Tabela 6, é apresentado o valor característico da sobrecarga de utilização a ser adotado para a categoria *H*.

Tabela 6 – Valor característico da sobrecarga em coberturas da categoria *H* (EN 1991)

Cobertura	q_k [kN/m²]
Categoria <i>H</i>	0,4

Para a determinação da sobrecarga a considerar em garagens e zonas de circulação de veículos, excluídas as pontes, é necessário determinar qual a categoria em que se insere de

^f As sobrecargas em zonas de atividade industrial deverão ser avaliadas consoante a utilização prevista e o tipo de equipamentos a instalar, como sejam guas, máquinas móveis, entre outros.

entre as duas disponíveis na EN 1991. As duas categorias têm por base a zona de acessibilidade dos veículos e são denominados pelas categorias *F* e *G*.

Na categoria *F*, incluem-se os espaços destinados a locais de circulação e de estacionamento para veículos ligeiros, tais como automóveis com um número de lugares inferior a 8 sem contar com o condutor e um peso bruto inferior a 30 kN. Esta categoria é indicada para garagens e zonas de estacionamentos térreas ou em altura.

Da categoria *G* constam os locais para circulação e estacionamento de veículos médios, com peso bruto entre os 30 kN e os 160 kN sobre dois eixos. Esta categoria é indicada para vias de acesso, zonas de cargas e descargas e zonas acessíveis a veículos de bombeiros com peso bruto inferior a 160 kN.

Na Tabela 7, são indicadas as sobrecargas a serem utilizadas para cada uma das categorias.

Tabela 7 – Valor característico da sobrecarga em estacionamentos e em zonas de circulação de veículos (EN 1991)

Categoria	q_k [kN/m²]
Categoria F Peso bruto do veículo \leq 30 kN	2,5
Categoria G 30 kN \leq peso bruto do veiculo \leq 160 kN	5,0

3.3 – Quantificação da ação da sobrecarga de utilização segundo a norma suíça SIA 261

O articulado da norma suíça SIA 261 é semelhante ao da EN 1991, dividindo o tipo de utilização pretendida por categorias. A SIA 261 propõe 8 categorias, de *A* a *H*, para a determinação do valor característico de carga a ser utilizada para cada tipo de superfície. A categoria *A* é alusiva a áreas de habitação e divide-se em 3 subcategorias:

A1 – Salas em edifícios de habitação, quartos e enfermarias de hospitais, quartos de hotéis, cozinhas e lavabos;

A2 – Varandas ou galerias;

A3 – Escadas e zonas de acesso.

A categoria *B* é reservada, tal como na EN 1991, para as zonas de escritórios.

Para a categoria *C*, relativamente aos locais de reunião, esta divide-se em 3 subcategorias dependendo do tipo de acessibilidade, sendo elas:

C1 – Zona com mesas e cadeiras móveis;

C2 – Zona com cadeiras fixas;

C3 – Zona sem obstáculos, com possível atividade desportiva e de grande probabilidade de acumulação de multidão.

As atividades comerciais fazem parte da categoria *D*, relativa às grandes superfícies de venda e de comércio.

A Categoria *E*, determinada para as categorias de armazenamento e de atividade industrial, como por exemplo armazéns, bibliotecas e seus acessos, corredores de fábricas.

A categoria *F* inclui as superfícies de estacionamento e zonas de circulação de veículos com peso bruto inferior a 3,5 toneladas, como sejam zonas de estacionamento em altura, garagens.

Para a categoria *G*, são consideradas as zonas de acesso e circulação de veículos com peso bruto entre 3,5 toneladas e 16 toneladas. Essas zonas são por exemplo rampas de acesso, zonas de cargas e descargas e zonas de acesso aos veículos de bombeiros.

Por fim a categoria *H* é referente às coberturas não acessíveis, onde a circulação de pessoas é rara, com a exceção de operações de manutenção ou reparação.

Na Tabela 8 é apresentado um quadro resumo com o valor característico das cargas a serem utilizados para a determinação da sobrecarga de utilização.

As coberturas acessíveis devem ser equiparadas a um pavimento corrente devido à facilidade de acesso e possível acumulação de pessoas. Desta forma as coberturas acessíveis devem ser incluídas numa categoria de *A* a *G*, referente aos pavimentos, dependendo da sua utilização.

Tabela 8 – Categoria de utilização e valores característicos das sobrecargas de utilização (SIA 261)

Categoria	Utilização específica	q_k [kN/m²]
Categoria A	Zona de habitação	
<i>A1</i>	Atividades domésticas e residenciais	2,0
<i>A2</i>	Varandas	3,0
<i>A3</i>	Escadas	4,0
Categoria B	Escritório	3,0
Categoria C	Locais de reuniões	
<i>C1</i>	Zona com mesas e cadeiras	3,0
<i>C2</i>	Zonas com assentos fixos	4,0
<i>C3</i>	Zonas sem obstruções em que seja possível a prática desportiva	5,0
Categoria D	Zonas comerciais	5,0
Categoria E	Zonas de armazenamento e de fabricação	^g
Categoria F	Zonas de estacionamento e acessos para veículos inferiores à 3,5 t	2,0
Categoria G	Zonas de estacionamento e acessos para veículos de 3,5 até 16 t	5,0
Categoria H	Coberturas não acessíveis	0,4

3.4 – Folha de cálculo automático

Fez parte deste trabalho o desenvolvimento de um programa de cálculo automático, em Microsoft Excel, que permita a determinação dos valores característicos para as ações de base sobrecarga de utilização, vento e neve, pelos regulamentos RSAEEP, EN 1991 e SIA 261.

A validação dos resultados obtidos foi feita através de um caso de estudo, de um edifício de três andares com 9 m de altura, localizado a 600 m de altitude. Houve a necessidade de escolher uma localidade em Portugal e outra na Suíça com climatologias similares.

Assim para a aplicação do modelo segundo o RSAEEP e a EN 1991 foi considerada a cidade de Bragança e para a aplicação do modelo segundo a SIA 261 foi considerada a cidade suíça de Lausanne.

^g O valor característico da sobrecarga a ser utilizado para a categoria *E* deverá ser acordado com o dono de obra ou com base numa análise das características específicas da indústria, devido ao tipo de equipamentos a instalar, como o caso de gruas, máquinas móveis, entre outros.

Na Figura 1 é apresentado o modelo tipo aplicado no programa de cálculo automático e desenvolvido para as ações da sobrecarga de utilização, do vento e da neve.

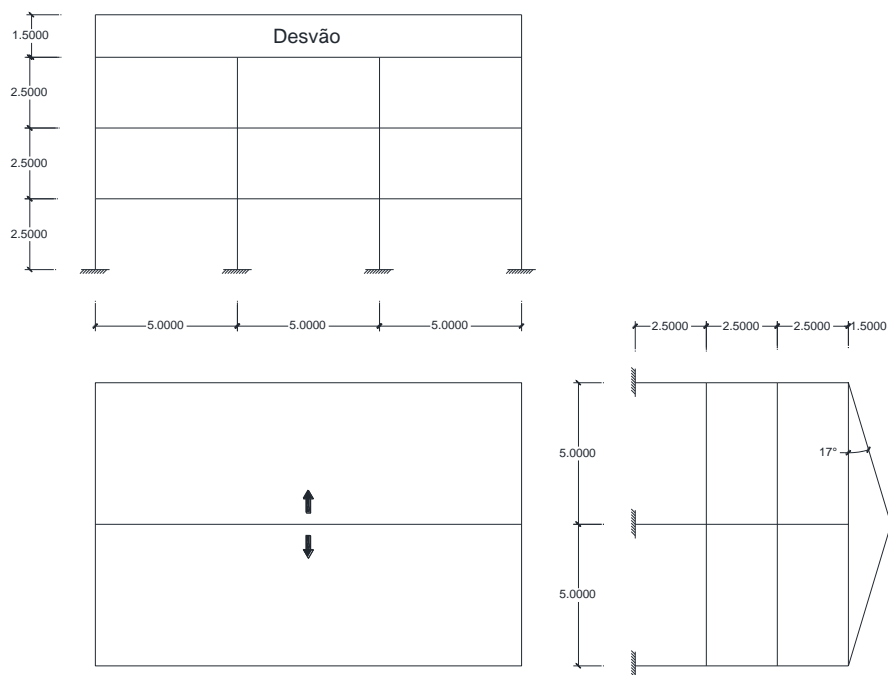


Figura 1 – Modelo tipo aplicado no programa de cálculo automático

O modelo tipo apresenta uma cobertura de duas vertentes com inclinação de 17° , sem platibanda nem qualquer tipo de obstrução que se oponha ao deslizamento natural da neve na a cobertura.

A estrutura apresenta, como dimensões em planta, 15 m de comprimento e 10 m de largura. Este modelo foi construído de uma forma aleatória apenas com o objetivo de analisar e validar os valores característicos obtidos a partir das folhas de cálculo para as diferentes ações estudadas neste trabalho.

Devido à existência de vários tipos de cobertura, optou-se por analisar apenas uma cobertura. Teve-se em conta um tipo de cobertura corrente em Portugal e na Suíça, de tal forma que se possa fazer uma análise comparativa entre os dois países.

Para o cálculo das sobrecargas de utilização foi necessário impor o tipo de emprego que será reservado à estrutura e assim calcular as necessidades de carregamento para garantir a futura resistência em função do tipo de utilização pretendida.

As fachadas possuem aberturas idênticas em todo o contorno do edifício. Desta forma, o edifício não apresenta qualquer face predominante para o cálculo da ação do vento incidente nas fachadas. O edifício será envolvido por construções semelhantes e vegetação rasa, sendo o vento pouco influenciado pelos edifícios circundantes.

Para facilitar a utilização das folhas de cálculo, adotou-se um sistema de cores nas células de forma a indicar a necessidade do seu preenchimento. Dessa forma, o preceito utilizado está apresentado na Figura 2:

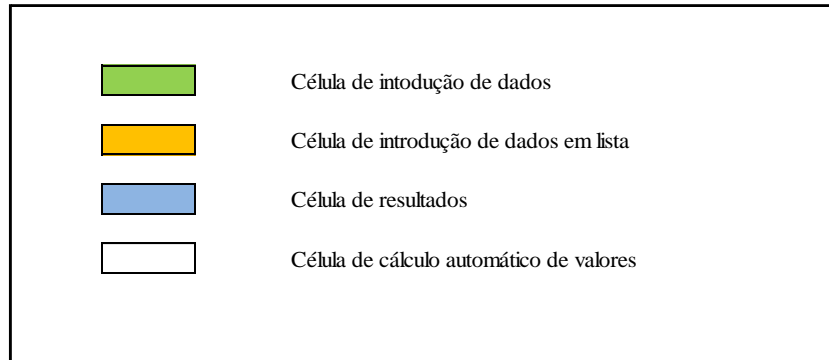


Figura 2 – Legenda de cores das células nas folhas de cálculo

3.5 – Implementação da ação da sobrecarga de utilização na folha de cálculo automático

Para validação dos resultados da folha de cálculo elaborada para cada regulamento é necessário definir para que efeito se destinará o edifício em estudo assim como a sua geometria. Como anteriormente referido, o edifício em estudo tem a geometria representada na Figura 1, sendo este o modelo tipo adotado para todas as ações em estudo neste trabalho. O edifício modelo é destinado a utilizações de carácter privado, onde a concentração de pessoas é o elemento predominante. A cobertura inclinada de duas vertentes dificulta a sua acessibilidade.

Como primeira análise, será implementado o RSAEEP com os parâmetros necessários para a obtenção dos valores característicos das ações necessárias para o dimensionamento estrutural.

Os espaços a verde/laranja indicam a necessidade de introdução de dados e os espaços preenchidos a azul representam os valores obtidos.

RSAEEP

Sobrecargas em coberturas:

Coberturas ordinárias

coberturas que, em virtude da sua forma (curvatura ou inclinação) ou pela natureza dos elementos de construção que as constituem, não permitem a fácil circulação de pessoas.

$$q_k = 0,3 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Sobrecargas em pavimentos:

Nas utilizações em que a concentração de pessoas é o elemento predominante, os valores a adoptar são os seguintes:

a.1)

Compartimentos destinados a utilização de carácter privado (por exemplo: habitações, quartos de hotéis, quartos e pequenas enfermarias de hospitais):
Em geral

$$q_k = 2,0 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Nas utilizações em que a concentração de pessoas **NÃO** é o elemento predominante, os valores a adoptar são os seguintes:

d.1)

Garagens para automóveis ligeiros:
Particulares

$$q_k = 4,0 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Sobrecargas em varandas:

Os valores característicos das sobrecargas a considerar nas varandas, ou em locais que possam desempenhar funções análogas (por exemplo, certas galerias), são: numa faixa de 1 m de largura adjacente ao parapeito, 5,0 kN/m² e, na restante superfície, um valor igual ao estabelecido para o comportamento contíguo.

Sobrecarga em acessos:

Em locais privados

$$q_k = 3,0 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

EN 1991

Analisa-se seguidamente a folha de cálculo implementada de acordo com a norma EN 1991.

Categoria	Utilização específica do edifício	Exemplos
A	Actividades domésticas e residenciais	Salas em edifícios de habitação; quartos e enfermarias de hospitais; quartos de hotéis, cozinhas e lavabos.

	q_k [kN/m ²]
Pavimentos :	2,0
Varandas :	5,0
Escadas :	3,0

Valores de q_k das sobrecargas dos pavimentos aplicando o valor de redução α_A :

$$\alpha_A = \frac{5}{7} \psi_0 + \frac{A_0}{A} \quad \text{com} \quad 0,65 \leq \alpha_A \leq 1,0$$

Valores de Ψ_0 do quadro A.1.1 da NP EN 1990:2009

$$\Psi_0 = 0,7$$

$$A = 150 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\alpha_A = 0,65$$

	q_k [kN/m ²]
Pavimentos :	1,3

Coberturas

Categoria	Utilização específica da cobertura
H	Coberturas não acessíveis, excepto para operações de manutenção e reparação

	q_k [kN/m ²]
Cobertura :	0,4

SIA 261

A formulação da norma suíça SIA 261 é idêntica à da norma EN 1991, como se pode verificar na folha de cálculo seguinte.

Sobrecargas em pavimentos:

Salas em edifícios de habitação, quartos e enfermarias de hospitais, quartos de hotéis, cozinhas e lavabos

A1)

$$q_k = 2,0 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Sobrecargas em coberturas:

Não acessível

Zonas de coberturas não acessíveis, onde a circulação de pessoas é rara apenas com a exceção de manutenção ou reparação

$$q_k = 0,4 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

3.6 – Análise paramétrica das diferentes normas

Através dos valores característicos da ação, obtidos pelas folhas de Microsoft Excel, foi feita uma análise paramétrica para as três normas de forma a comparar as principais diferenças. Partindo da mesma topologia do edifício e das mesmas funções que lhe foram destinadas, como anteriormente referido, é possível ilustrar as diferenças através da Figura 3.

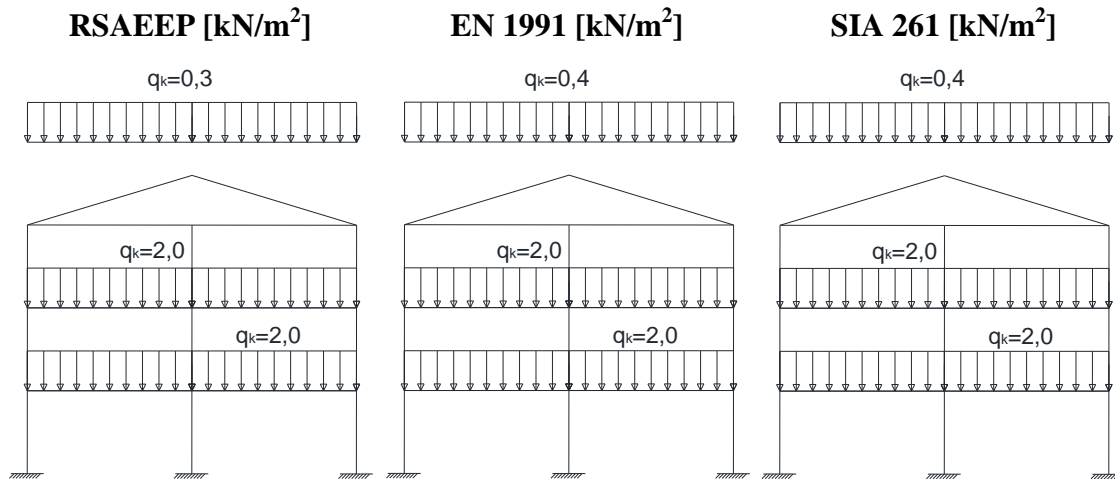


Figura 3 – Comparação dos valores da sobrecarga no edifício tipo para os três regulamentos em estudo

Como se pode verificar, os regulamentos são concordantes quanto ao valor da sobrecarga a ser utilizada para os pavimentos habitacionais. Existe uma diferença entre o RSAEEP e as normas EN 1991 e SIA 261 quanto à sobrecarga de utilização a empregar na cobertura. O RSAEEP é menos exigente quanto a esta sobrecarga mas impõe a utilização de sobrecargas de acesso, o que não é referido nas restantes normas analisadas. A sobrecarga de acesso, segundo a EN 1991 e a SIA 261, deverá tomar o valor da sobrecarga do pavimento adjacente à cobertura. O desvão não é contemplado com uma sobrecarga de utilização no pavimento porque este não é considerado uma zona acessível.

Capítulo 4 – A ação da neve

Com vista à quantificação da ação da neve em coberturas, e para os três regulamentos, é fundamental o conhecimento da localização geográfica prevista para o edifício, uma vez que cada região apresenta distintas probabilidades de ocorrência de neve. Outro fator importante a ter em conta na quantificação da ação da neve é o tipo de cobertura.

A inclinação da cobertura desempenha um papel fundamental no que refere à acumulação da neve. Coberturas com grandes inclinações acumulam pouca neve por permitirem que esta deslize para o solo. Dessa forma, nos países onde ocorrem grandes nevões, as coberturas apresentam inclinações superiores em comparação com países onde a ocorrência de neve é tida como rara. As coberturas mais propícias à acumulação da neve agravam o efeito no seu dimensionamento estrutural.

A inclinação da cobertura determina o valor do coeficiente de forma a considerar, uma vez que esta controla a quantidade de neve que se pode acumular. Se a inclinação da vertente for elevada, a neve desliza sem acumulação, enquanto uma cobertura plana acumula uma quantidade muito próxima da quantidade de neve a ser considerada ao nível do solo.

O vento é igualmente relevante porquanto as rajadas de vento geram a movimentação de grandes quantidades de neve de um local da cobertura para outro aumentando a acumulação nesses locais, mas também existem regiões da cobertura onde a neve é varrida pelo vento para fora da mesma, impedindo a sua acumulação.

No dimensionamento de uma cobertura, o valor característico da ação da massa da neve ao nível do solo é obtido com base na localização da estrutura e da altitude do local.

A seguir é apresentado o modo de determinação da ação da neve segundo o RSAEEP, a EN 1991, e a norma suíça SIA 261.

4.1 – Quantificação da ação da neve segundo o RSAEEP

O efeito da ação da neve em coberturas, com base no *Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes*, é somente quantificado para locais com altitude igual ou superior a 200 m situados nos distritos de Viana do Castelo, Braga, Vila Real, Bragança, Porto, Aveiro, Viseu, Guarda, Coimbra, Leiria, Castelo Branco e Portalegre.

Segundo o mesmo regulamento, todos os restantes locais do continente, incluindo os arquipélagos dos Açores e da Madeira, não há que considerar a ação da neve.

A ação da neve é quantificada sob a forma de uma carga, geralmente distribuída, aplicada na cobertura dos edifícios e com sentido descendente, sendo o valor característico, por metro quadrado em plano horizontal, s , expresso da seguinte forma:

$$s = \mu s_k \quad (15)$$

em que:

- s carga da neve na cobertura [kN/m²];
- μ coeficiente de forma para a carga da neve;
- s_k valor característico da carga da neve ao nível do solo no local considerado [kN/m²].

O valor característico da carga da neve ao nível do solo é dado em função da altitude do local por um parâmetro A , expresso em metros e arredondado às centenas. A expressão para a determinação de s_k é a seguinte

$$s_k = \frac{1}{400} (A - 50) \quad (16)$$

sendo:

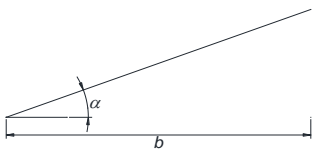
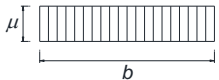
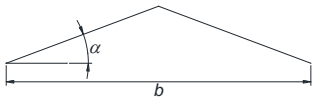
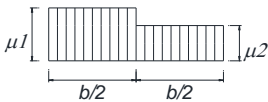
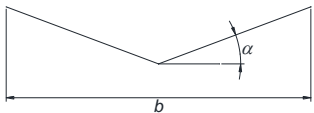

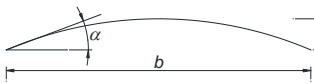

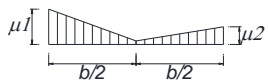
- A altitude do local, cota acima do nível médio do mar [m].

Os valores do coeficiente μ variam consoante o tipo de cobertura em análise, sendo o tipo de cobertura dividida em dois grupos: coberturas isoladas e coberturas múltiplas. Individualizando o tipo de cobertura, o fator determinante no dimensionamento é o ângulo de inclinação da cobertura relativamente ao plano horizontal, α .

No caso de coberturas cilíndricas, o parâmetro necessário é o ângulo, denominado por β , formado entre a tangente à diretriz da cobertura cilíndrica e o plano horizontal.

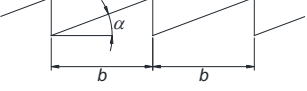
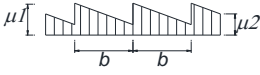
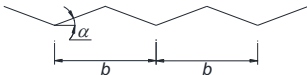
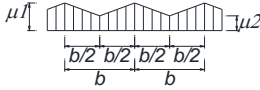
Para cada tipo de cobertura existem no máximo dois valores para o coeficiente de forma μ , dependendo do tipo de cobertura em estudo. Na Tabela 9 é apresentado um resumo dos valores de μ a considerar dependendo do tipo de cobertura e do ângulo de inclinação.

Tabela 9 – Coeficientes μ para coberturas isoladas (RSAEEP)

Forma da cobertura	α (graus)	Distribuição da carga	Valores de μ
	$0 \leq \alpha \leq 30$		$\mu = 0,8$
	$30 < \alpha < 60$		$\mu = 0,8 \frac{60 - \alpha}{30}$
	$\alpha \geq 60$		$\mu = 0$
	$0 \leq \alpha \leq 15$		$\mu_1 = \mu_2 = 0,8$
	$15 < \alpha \leq 30$		$\mu_1 = 0,8 \frac{15 + \alpha}{30}$ $\mu_2 = 0,8$
	$30 < \alpha < 60$		$\mu_1 = 1,2 \frac{60 - \alpha}{30}$ $\mu_2 = 0,8 \frac{60 - \alpha}{30}$
	$\alpha \geq 60$		$\mu_1 = \mu_2 = 0$
	$0 \leq \alpha \leq 30$		$\mu_1 = 0,8 \frac{20 + \alpha}{20}$ $\mu_2 = 0,8 \frac{30 - \alpha}{30}$
	$\alpha > 30$		$\mu_1 = 2,0$ $\mu_2 = 0$
	$0 \leq \alpha \leq 15$		$\mu = 0,8$
	$\alpha > 15$		

Para as coberturas múltiplas, o processo de obtenção do coeficiente de forma, μ , é idêntico ao utilizado para as coberturas isoladas. Na Tabela 10 é apresentado um resumo dos valores de μ a considerar dependendo da forma da cobertura e do ângulo de inclinação das vertentes.

Tabela 10 – Coeficientes μ para coberturas múltiplas (RSAEEP)

Forma da cobertura	α (graus)	Distribuição da carga	Valores de μ
	$0 \leq \alpha \leq 30$		$\mu_1 = 0,8 \frac{20 + \alpha}{20}$ $\mu_2 = 0,8 \frac{30 - \alpha}{30}$
	$\alpha > 30$		$\mu_1 = 2,0$ $\mu_2 = 0$
	$0 \leq \alpha \leq 30$		$\mu_1 = 0,8 \frac{20 + \alpha}{20}$ $\mu_2 = 0,8 \frac{30 - \alpha}{30}$
	$\alpha > 30$		$\mu_1 = 2,0$ $\mu_2 = 0$

4.2 – Quantificação da ação da neve segundo a EN 1991

A EN 1991 apresenta uma forma específica de determinar as situações de projeto em comparação com os restantes regulamentos em análise. Distingue duas condições para a queda de neve.

A queda de neve pode ocorrer em condições normais, sendo esta uma ocorrência de neve considerada de baixo grau de preocupação, ou seja, sem grande acumulação nas coberturas. Quando a ocorrência de neve é feita em condições normais, esta não é considerada no cálculo como sendo uma ação de acidente. Para este caso é necessário, apenas, efetuar uma análise numa situação de projeto persistente/transitório, ou seja, numa situação em que a queda da neve mantém uma camada constante ao longo do tempo e acabará por desaparecer de uma forma gradual. Esta análise deve, no entanto, englobar um estudo da deslocação da neve na cobertura por força do vento ou pela geometria da cobertura, através de parâmetros que serão mais adiante caracterizados.

Os casos que requerem mais atenção são quando a queda de neve ocorre em condições excepcionais, ou seja, nevões de grande intensidade e que obriga a grandes deslocamentos de massas de neve na cobertura. Estas condições são analisadas como sendo uma ação de acidente, uma vez que podem provocar o desmoronamento da cobertura. Contudo, a EN 1991 propõe, além de uma análise em condições de projeto acidentais como no caso das condições normais, um estudo em termos de situações de projeto persistente/transitórias.

De entre as situações acidentais de projeto existem dois tipos de acontecimentos que a estrutura deve ser capaz de suportar:

- A acumulação da neve devido a uma queda excecional;
- O deslocamento da neve na cobertura.

Na Tabela 11 são apresentadas, de uma forma resumida, as situações de projeto e a disposição das cargas a serem utilizadas.

Tabela 11 – Situações de projeto e disposições de carga

		Condição normal		Condição excecional	
		Locais onde seja improvável a ocorrência de quedas de neve excecionais		Locais onde seja provável a ocorrência de quedas de neve excecionais	
Situações de projeto persistentes/transitórias	não deslocada	$s = \mu_1 C_e C_t S_k$		não deslocada	$s = \mu_1 C_e C_t S_k$
	deslocada	$s = \mu_1 C_e C_t S_k$		deslocada	$s = \mu_1 C_e C_t S_k$
Situações de projeto acidentais			queda excecional como ação de acidente	não deslocada	$s = \mu_1 C_e C_t C_{esl} S_k$
				deslocada	$s = \mu_1 C_e C_t C_{esl} S_k$
	deslocamento excecional como ação de acidente		$s = \mu_1 S_k$		

Os deslocamentos excecionais constituem uma ação de acidente que representa um acréscimo de carga, devido a uma redistribuição da neve, causado por um deslizamento de

massa de um lado para outro da cobertura, com uma probabilidade de ocorrência exceccionalmente reduzida.

É denominada de queda exceccional a ocorrência pouco vulgar de um nevão e por consequência uma camada de neve de altura considerável.

A EN 1991 impõe a divisão do continente em três zonas (Figura 4), sendo a zona sul a zona com menor probabilidade de ocorrência de queda de neve, associado a um menor coeficiente dependente da zona (C_z). A zona mais gravosa segundo a EN 1991 é caracterizada pela zona Z_1 , possuindo um coeficiente de zona maior do que as restantes zonas do território português. A zona Z_2 , abrange a totalidade do norte do país exceto a zona abrangida por Z_1 . A zona sul, caracterizada pela zona Z_3 , possui uma baixa probabilidade de ocorrência de neve, mas que deve ser tida em conta no cálculo por uma questão de segurança. Os arquipélagos da Madeira assim como as dos Açores integram a zona Z_3 , sendo a probabilidade de ocorrência de neve quase nula.

Para a divisão do território português, foi tida em conta a altitude do local, assim como a probabilidade de ocorrência de neve, devido ao arrefecimento súbito das massas de ar na presença de montanhas nas suas redondezas.

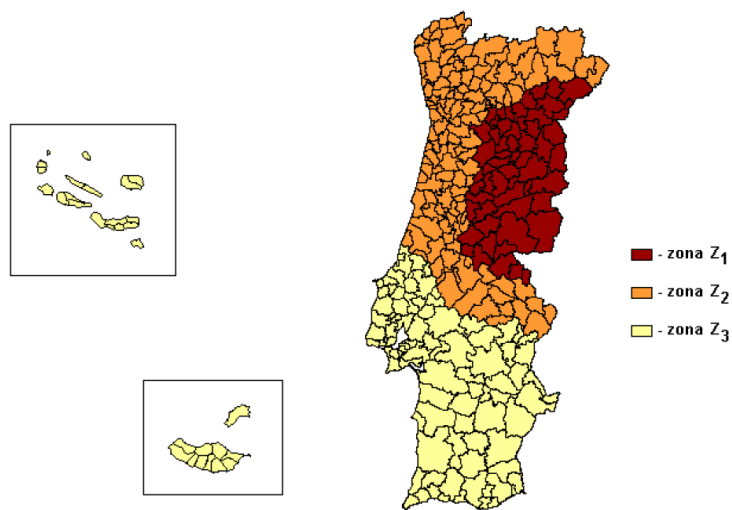


Figura 4 – Distribuição do coeficiente dependente da zona para o continente e ilhas (EN 1991)

Dessa forma os valores a atribuir para o coeficiente dependente da zona são:

Zona Z1: $C_z = 0,30$

Zona Z2: $C_z = 0,20$

Zona Z3: $C_z = 0,10$

A altitude também é um fator preponderante no cálculo do valor característico da ação da neve ao nível do solo uma vez que a sua quantidade aumenta com o aumento da altitude. Assim, o cálculo do valor característico da carga da neve ao nível do solo (s_k) é obtido da seguinte forma:

$$s_k = C_z \left[1 + \left(\frac{H}{500} \right)^2 \right] \quad (17)$$

sendo:

C_z Coeficiente dependente da zona (ver Figura 4);

H Altitude do local, expressa em m.

O vento tem um papel importante na alteração da disposição da neve na cobertura, uma vez que existem zonas na cobertura onde a neve é varrida pelo vento impedindo a sua acumulação. Dessa forma deve determinar-se qual o tipo de exposição a que a cobertura está sujeita. As coberturas muito expostas ao efeito benéfico da ação do vento, que impede grandes acumulações de neve, são de tratamento simples mas existem exceções no caso de edifícios cuja geometria permita que a neve se acumule em outras zonas. Na Tabela 12 são apresentadas as diferentes exposições impostas pela norma EN 1991 para a tipificação da influência do vento na acumulação da neve nas coberturas [9].

Tabela 12 – Topografias de exposição ao vento (EN 1991)

Topografia da cobertura	C_e
Topografia exposta ao vento – zonas planas, sem obstáculos e expostas de todos os lados, sem ou com pouco abrigo conferido pelo terreno, por construções mais altas ou por árvores.	0,8
Topografia normal – zonas nas quais não há uma remoção significativa da neve pelo vento, devido à configuração do terreno, à existência de outras construções ou de árvores.	1,0
Topografia abrigada – zonas tais que a construção em causa fica a um nível consideravelmente mais baixo que o do terreno circundante ou que está rodeada por árvores altas e/ou por outras construções mais altas.	1,2

Caso existam mecanismos de aquecimento nas coberturas para impedir a acumulação de neve ou no caso de coberturas envidraçadas, o coeficiente térmico deverá ser tido em conta uma vez que, devido ao fluxo de calor ascendente, as cargas da neve tendem a ser reduzidas.

No caso de não existir qualquer fenómeno que provoque a fusão da neve, ou de coberturas que possuem uma baixa transmissão térmica ($< 1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), o coeficiente térmico a considerar é $C_t = 1$. Para informações adicionais poderá consultar-se a norma *ISO 4355* [8]. O coeficiente térmico é um parâmetro a considerar na determinação da carga da neve na cobertura como se irá mostrar mais adiante.

Tal como no caso do coeficiente térmico, o coeficiente de exposição é, também ele, um parâmetro fundamental na determinação da carga da neve na cobertura.

Dessa forma, a carga da neve na cobertura é obtida com a seguinte expressão:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (18)$$

As situações de projeto persistentes/transitórias são estabelecidas para todas as condições, normais ou excecionais, o que significa que devem ser consideradas associadas à queda mínima de neve num determinado local.

A consideração da queda de neve excecional, onde a ocorrência desse fenómeno é considerado como ação de acidente, deve ser analisada consoante os concelhos e distritos indicados na EN 1991.

Existem três formas de quantificar a ação de acidente, sendo a primeira a quantificação de uma queda excecional, ou seja, um nevão de grande intensidade. A segunda forma é quantificando o deslocamento excecional da neve na cobertura, de um local para o outro da cobertura ou da cobertura para o solo. A terceira forma é o caso mais gravoso, materializando-se através da quantificação simultânea das duas ações de acidente [10].

Nos casos em que se está a conduzir uma análise em situações de projeto acidentais é necessário determinar o valor de cálculo da carga da neve excecional ao nível do solo, s_{Ad} , para o local considerado, cujo valor é determinado pela expressão seguinte:

$$s_{Ad} = C_{esl} s_k \quad (19)$$

onde:

s_{Ad} Valor de cálculo da carga da neve excecional ao nível do solo para o local considerado;

C_{esl} Coeficiente para cargas da neve excecionais (utilizou-se o valor 2,5);

s_k Valor característico da carga da neve ao nível do solo para o local considerado.

Desta forma, para quantificar a carga da neve na cobertura para as situações de projeto acidentais em que a queda de neve excepcional é a ação de acidente, é necessário, apenas, multiplicar a expressão referente às situações de projeto persistentes/transitórias (expressão 18) pelo coeficiente para cargas da neve excepcionais, C_{esl} . Uma vez que o valor característico da carga da neve ao nível do solo, s_k , já se encontra quantificado na expressão para as situações de projeto persistentes/transitórias, a expressão para as situações de projeto acidentais em que a queda excepcional de neve é a ação de acidente é a seguinte:

$$s = \mu_i C_e C_t C_{esl} s_k \quad (20)$$

Nos casos em que a situação de projeto acidental considerada é devida ao deslocamento excepcional da neve na cobertura, sendo este fenómeno uma ação de acidente, a expressão a ser utilizada é a seguinte:

$$s = \mu_i s_k \quad (21)$$

É de referir que os deslocamentos excepcionais podem ocorrer simultaneamente com quedas excepcionais de neve para alguns concelhos e distritos pertencentes à zona *Z1*.

Um dos fatores mais importantes é, como se disse, a forma da cobertura onde a neve se irá acumular. A EN 1991 tem em atenção vários tipos de coberturas e o coeficiente de forma a ser tomado na análise e na quantificação da ação da neve. Os vários tipos de coberturas contemplados pela EN 1991 são:

- Cobertura de uma vertente;
- Cobertura de duas vertentes;
- Cobertura de múltiplas vertentes;
- Cobertura cilíndrica.

Na norma EN 1991 é ainda tida em conta a existência de coberturas em contacto, ou muito próximas, de construções mais altas. Este tipo de cobertura é dimensionado para suportar um peso adicional devido ao deslizamento de grandes quantidades de neve dos edifícios próximos ou zonas do edifício mais altas. Para a determinação do valor do

coeficiente de forma a ser tomado é necessária apenas a inclinação das vertentes e o tipo de geometria da cobertura.

Dependendo da localização da construção, existem necessidades de verificações distintas, isto é, a EN 1991 dispõe de dois grupos de condições. As condições normais aplicam-se a todos os locais situados nas zonas *Z2* e *Z3*. No caso da zona *Z1*, esta enquadra-se no grupo das condições excepcionais devido à probabilidade de ocorrência de neve ser elevada.

A EN 1991 impõe dois tipos de situações na disposição da carga da neve na cobertura sendo elas:

- Situações de projeto persistentes/transitórias;
- Situações de projeto acidentais em que a carga da neve excepcional é a ação de acidente.

No caso da disposição da carga da neve em condições normais, a situação de projeto acidental não é considerada. Desta forma, para a quantificação da ação da neve em condições normais, apenas é necessário estabelecer as situações de projeto persistentes/transitórias. Dentro das situações de projeto persistentes/transitórias é necessário determinar a carga na cobertura para as situações em que existe simultaneamente a ocorrência de vento, sendo portanto a neve deslocada, e para as situações em que não existe a influência do vento na disposição da neve na cobertura.

A EN 1991 impõe dois tipos de situações excepcionais na disposição da carga da neve na cobertura, como sejam:

- Condições excepcionais com a queda excepcional como ação de acidente, isto é, a carga da camada de neve resultante de uma queda de neve com uma probabilidade de ocorrência excepcionalmente reduzida;
- Condições excepcionais com o deslocamento excepcional como ação de acidente, ou seja, disposição de carga correspondente à carga da camada de neve na cobertura resultante de uma redistribuição da neve deposta com uma probabilidade de ocorrência excepcionalmente reduzida.

4.3 – Quantificação da ação da neve segundo a norma suíça SIA 261

À semelhança da EN 1991, o valor característico da carga da neve na cobertura é determinado com parâmetros semelhantes, isto é, depende do tipo de exposição ao vento, do coeficiente térmico da cobertura, do valor característico da carga de neve ao nível do solo, e do coeficiente de forma da cobertura. A diferença reside no valor característico da carga da neve ao nível do solo a ser considerado. Na EN 1991, este depende de dois fatores: o coeficiente dependente da zona e a altitude do local, enquanto, na norma SIA 261, apenas se faz depender da altitude de referência. Esta altitude de referência é retirada a partir de um mapa helvético dividido em cinco cores. A altitude de referência a considerar no cálculo é obtida somando ou subtraindo à altitude real do local os valores indicados no canto inferior direito do mapa representado na Figura 5 [11].

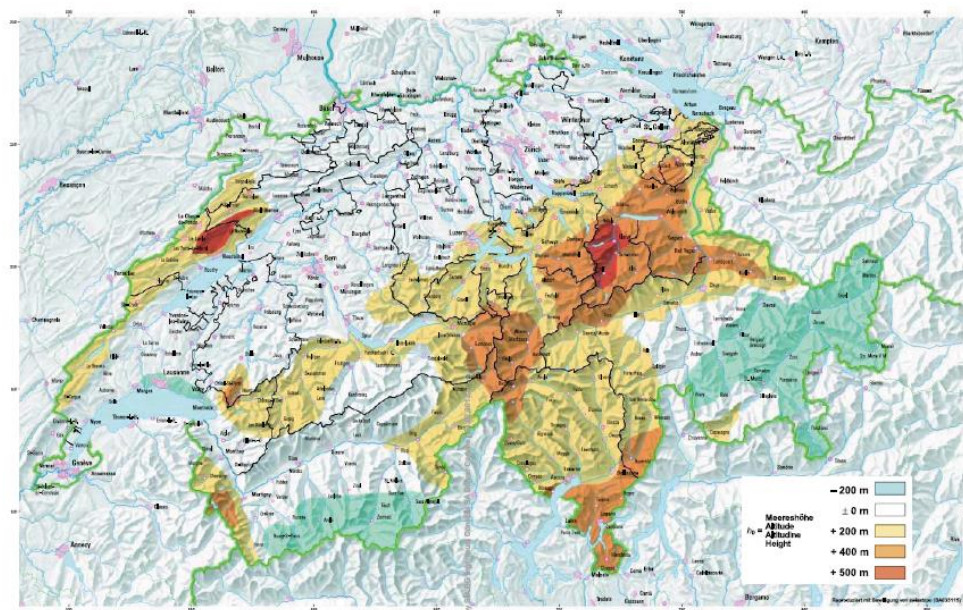


Figura 5 – Altitude de referência para a carga da neve (SIA 261)

Obtida a altitude de referência é agora possível a determinação do valor característico da carga de neve ao nível do solo, para o local considerado, através da expressão seguinte:

$$s_k = \left[1 + \left(\frac{h_0}{350} \right)^2 \right] 0,4 \geq 0,9 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (22)$$

A SIA 261 impõe um valor mínimo de 0,9 kN/m² para o valor característico da carga da neve ao nível do solo.

No que se refere à disposição das cargas, existem algumas diferenças em relação à norma europeia. Na norma SIA 261, apenas são consideradas as situações de queda de neve em condições normais, não existindo as condições excepcionais. A forma como o valor da carga é obtido é análoga às duas normas anteriormente expostas, ou seja, têm em comum o caso de considerarem a influência ou não do vento no processo de acumulação da neve na cobertura. Outra importante analogia diz respeito ao fato de ser desprezada a carga da neve na cobertura se esta tiver inclinação superior a 60° e não possuir qualquer impedimento ao deslizamento da neve para o solo.

O coeficiente de forma da cobertura é obtido de modo análogo à EN 1991. A norma SIA 261 fornece a disposição da carga a considerar somente para três tipos distintos de coberturas, sendo elas de duas vertentes, de múltiplas vertentes ou cilíndricas. De seguida, na Figura 6, é apresentado um resumo dos valores dos coeficientes de forma (μ) a serem utilizados para cada tipo de cobertura e para cada modelo de carregamento (com e sem neve deslocada na cobertura).

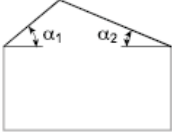
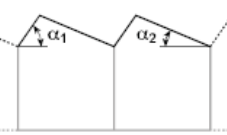
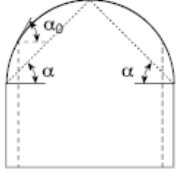
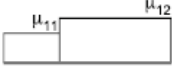

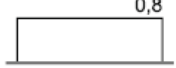
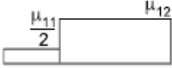
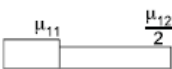
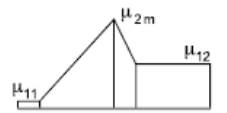
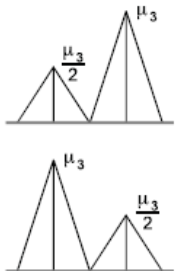
			
Modelo de carga 1			
Modelo de carga 2	 		
	$\mu_{11} = \mu_1(\alpha_1) \quad \mu_{12} = \mu_1(\alpha_2)$	$\mu_{2m} = \mu_2\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)$	$\mu_3 = \mu_3(\alpha) \quad \alpha_0 = 60^\circ$

Figura 6 – Disposição da carga da neve nas diferentes coberturas (SIA 261)

Para ângulos de inclinação da cobertura inferiores a 60°, a acumulação de neve é frequente e deve ser obrigatoriamente considerada no cálculo. Quando o ângulo da cobertura com a horizontal ultrapassar os 60°, e esta não possuir qualquer sistema que impeça o

deslizamento da neve para o solo, ou para coberturas a cota inferior, a consideração da acumulação da neve neste local deixa de fazer sentido para a quantificação da ação, sendo portanto desprezada na fração de cobertura em causa.

4.4 – Implementação da ação da neve numa folha de cálculo automático

No presente trabalho, para determinar a carga da neve nas coberturas é necessário definir alguns parâmetros a serem inseridos no programa de cálculo automático desenvolvido.

Os espaços a verde/laranja indicam a necessidade de introdução de dados e os espaços preenchidos a azul são os valores obtidos.

RSAEEP

A quantificação da carga da neve segundo o RSAEEP depende apenas, como se disse, de dois parâmetros, sendo eles a altitude do local e o ângulo de inclinação da cobertura. O local de referência para a implementação do programa de cálculo pelo RSAEEP foi a zona de Bragança. A seguir é apresentado um exemplo de aplicação da ação da neve pelo RSAEEP, para o exemplo tipo adotado em 3.4

O Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes refere que deve ser tido em conta a ação da neve em locais com altitude igual ou superior a 200 m situados nos distritos de Viana do Castelo, Braga, Vila Real, Bragança, Porto, Aveiro, Viseu, Guarda, Coimbra, Leiria Castelo Branco e Portalegre.

Valor característico da ação da neve

$$s = \mu s_k$$

Altitude = [m]

$$s_k = 1,375$$

Ângulo da cobertura [graus]

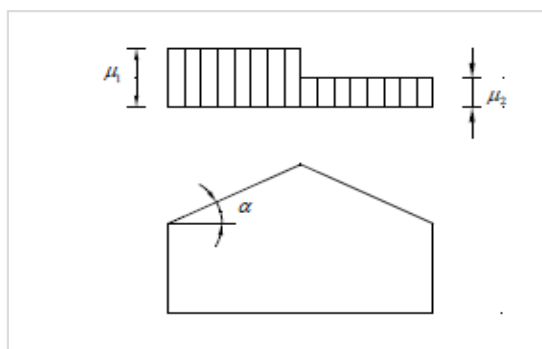
Cobertura de duas vertentes

$$\mu_1 = 0,853$$

$$\mu_2 = 0,8$$

$$s_1 = 1,17333 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$s_2 = 1,1 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$



EN 1991

A implementação do exemplo de aplicação da ação da neve pela EN 1991 é feita seguidamente.

Esta Norma aplica-se também a locais com altitude superior a 1500 m, segundo consta no Anexo Nacional. (Pag. 51)

Valores recomendados dos coeficientes Ψ_0 , Ψ_1 e Ψ_2 para diferentes localizações de edifícios:

Regiões	Ψ_0	valor de combinação $\Psi_0 s$
Restantes Estados-Membros do CEN, para locais situados a uma altitude H ≤ 1000 m acima do nível do mar	0,5	valor frequente $\Psi_1 s$ valor quase-permanente $\Psi_2 s$

Tratamento das cargas da neve ao nível do solo

$$s_{Ad} = C_{esl} s_k$$

O coeficiente C_{esl} para determinação do valor de cálculo das cargas da neve excepcionais ao nível do solo (s_{Ad}) para locais com possibilidade de ocorrência de cargas da neve excepcionais **deve**

$$s_k = C_z [1 + (H/500)^2]$$

Altitude do local [m]
 Distrito/Concelho ZONA
 Informação

Selecionar
 (Nenhum destes) =>

$$C_z = 0,2$$

$$s_k = \text{0,488} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$s_{Ad} = \text{1,22} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Topografia
 informação
 $C_e = \text{1,0}$
 $C_t = \text{1,0}$

Ângulo de inclinação da vertente α_1 °
 Ângulo de inclinação da vertente α_2 °

Existe guarda-neves, platibanda ou outros obstáculos?

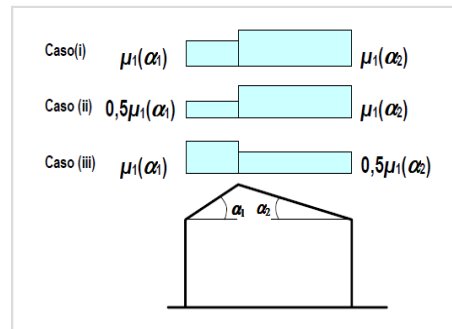
Cobertura de duas vertentes



Caso (i)	$\mu_1(\alpha_1) =$	0,800
	$\mu_1(\alpha_2) =$	0,800

Caso(ii)	$0,5 \cdot \mu_1(\alpha_1) =$	0,400
	$\mu_1(\alpha_2) =$	0,800

Caso(iii)	$\mu_1(\alpha_1) =$	0,800
	$0,5 \cdot \mu_1(\alpha_2) =$	0,400



Carga da neve em coberturas

a) Situações como acção de acidente

Carga da neve não deslocada em coberturas:

$s = \mu_i C_e C_t s_k$

Caso (i)	$s =$	0,3904	[kN/m ²]
	$s =$	0,3904	[kN/m ²]

Carga da neve deslocada em coberturas:

$s = \mu_i C_e C_t s_k$

Caso (ii)	$s =$	0,1952	[kN/m ²]
	$s =$	0,3904	[kN/m ²]

Caso (iii)	$s =$	0,3904	[kN/m ²]
	$s =$	0,1952	[kN/m ²]

SIA 261

De acordo com a formulação da norma SIA 261, o processo é semelhante ao da EN 1991 com a única diferença de se necessitar de uma altitude de referência fornecida a partir da altitude real e somando ou subtraindo o valor indicado pela cor da zona de implantação do edifício. A folha seguinte foi elaborada para um edifício localizado em Lausanne.

A disposição seguinte não são aplicáveis a construções com uma altitude superior a 2000 metros, nem em zonas expostas a condições extremas de neve e vento.

Valor característico da carga de neve ao nível do solo

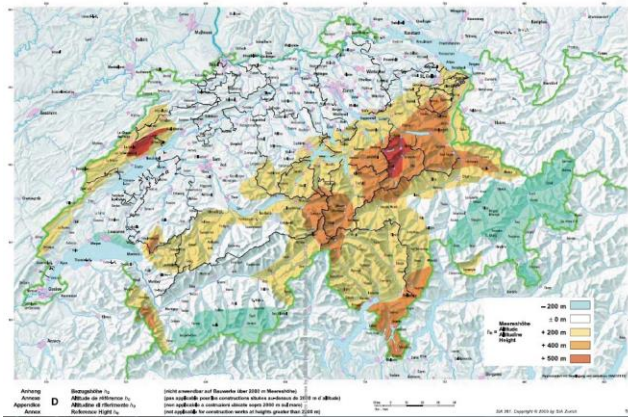
$$s_k = [1+(h_0/350)^2]*0.4 \geq 0.9$$

h = 600 [m]

Zona: Azul

h₀ = 400 [m]

s_k = 0,922 [kN/m²]



Ângulo de inclinação da vertente α₁ 17 [°]

$$s = \mu C_e C_T s_k$$

Ângulo de inclinação da vertente α₂ 17 [°]

Tipo de exposição ao vento Normal

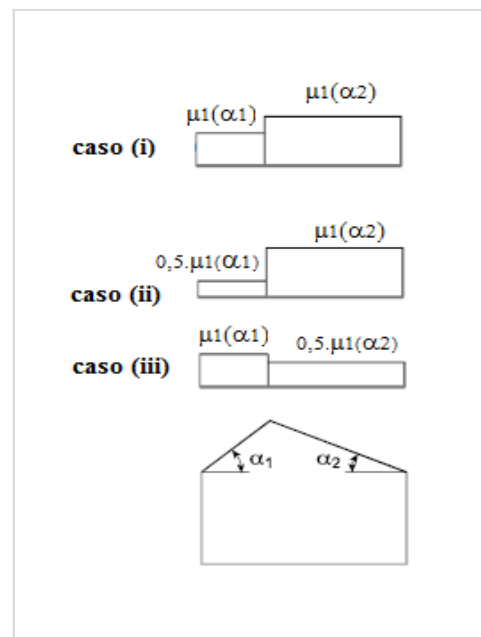
C_e = 1,0

coberturas de duas vertentes

caso (i)	s =	0,738	[kN/m ²]
	s =	0,738	[kN/m ²]

caso (ii)	s =	0,369	[kN/m ²]
	s =	0,738	[kN/m ²]

caso (iii)	s =	0,738	[kN/m ²]
	s =	0,369	[kN/m ²]



4.5 – Análise paramétrica das diferentes normas

Na Figura 7 são apresentados os resultados obtidos na hipótese de a ação de base da combinação ser a neve na cobertura, para as diferentes normas. Podem observar-se as diferentes ações a serem utilizadas para a contribuição da ação da neve no dimensionamento do edifício. De uma forma direta é possível verificar que o RSAEEP apresenta valores superiores aos dois outros regulamentos, o que poderá originar um sobredimensionamento associado à carga da neve na cobertura. A SIA 261 apresenta, aproximadamente, o dobro da carga de neve na cobertura em relação à EN 1991, o que indica que o fator de localização geográfica determinado através da altitude de referência (ver Figura 5) é o parâmetro determinante para estes resultados, uma vez que os restantes parâmetros são idênticos aos da norma EN 1991. Isto poderá significar que existe uma maior preocupação com a ação da neve na cobertura na norma suíça quando comparada com o articulado do regulamento europeu.

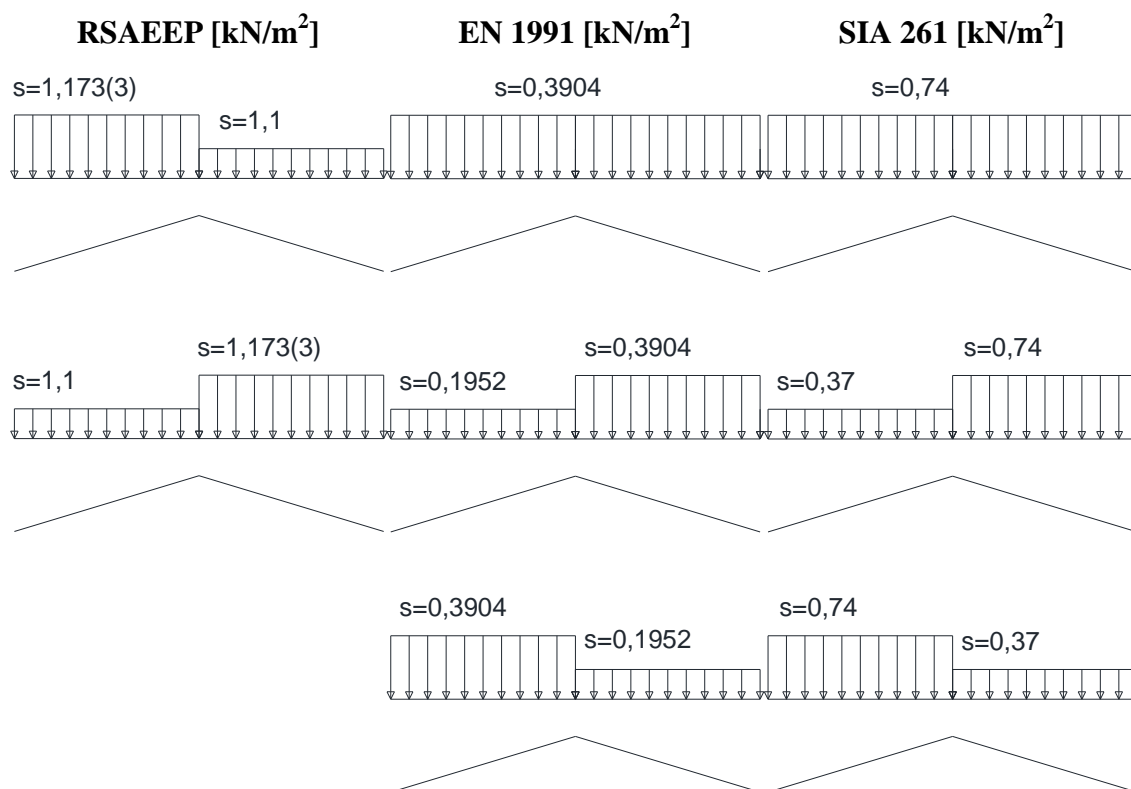


Figura 7 – Análise de resultados da carga da neve na cobertura para os três regulamentos em estudo

Da análise às três normas em estudo, verifica-se uma divergência entre elas. O RSAEEP, em particular, apresenta valores da carga da neve na cobertura aproximadamente três vezes superior em comparação com a EN 1991, o que pode indiciar que o RSAEEP preconiza um sobredimensionamento excessivo. A razão para este facto reside na abordagem da quantificação feita de forma linear pelo RSAEEP para a carga de neve ao nível do solo. Como é possível observar no Gráfico 1, a abordagem do RSAEEP é feita de uma forma menos pormenorizada em relação à norma EN 1991, seguindo uma análise da ação da neve de forma gradual com o aumento da altitude do local da construção. As zonas identificadas no Gráfico 1 estão descritas na Figura 4.

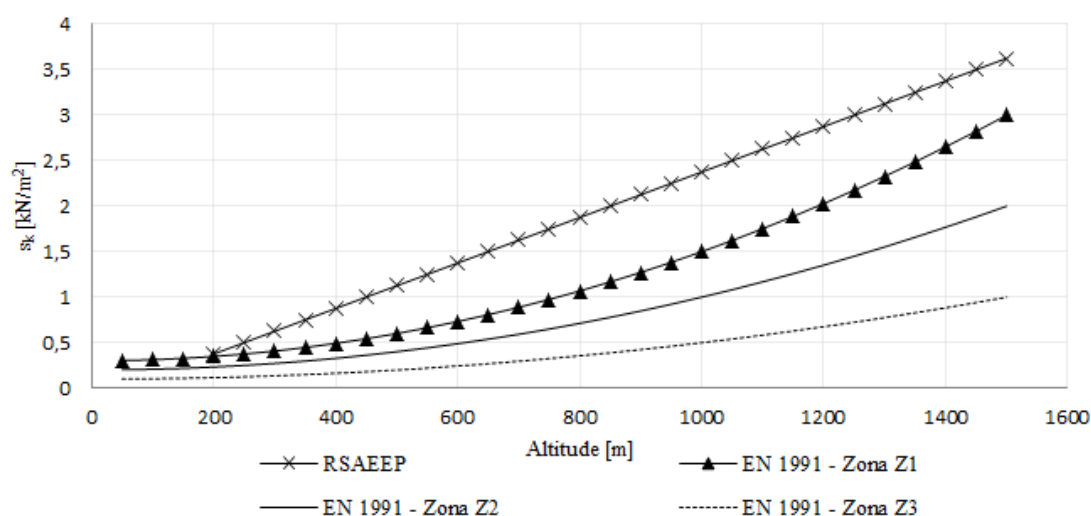


Gráfico 1 - Valor característico da carga da neve ao nível do solo em função da altitude

O Gráfico 1 indica, de forma clara, que o RSAEEP aborda a quantificação da ação da neve ao nível do solo variando linearmente com a altitude enquanto, na EN 1991, a variação é feita parabolicamente. Para a norma SIA 261, esta comparação torna-se complexa uma vez que a norma suíça diferencia várias zonas por cores, associando-as a um valor a adicionar ou subtrair à altitude real do local de implantação do edifício. Para que seja possível essa comparação, foram, como se disse, definidas as localidades de Lausanne e Bragança que apresentam uma altitude de aproximadamente 600 m. Com estas duas informações foi possível uma análise comparativa entre o RSAEEP, a EN 1991 e a SIA 261. Devido ao facto da cidade de Bragança integrar a zona Z2 (EN 1991), e esta não ser a zona mais gravosa, considerou-se também a zona Z1 para uma análise extrema. O Gráfico 2 mostra os valores da ação da neve a serem considerados para cada regulamento tendo como altitude padrão o valor de 600 m.

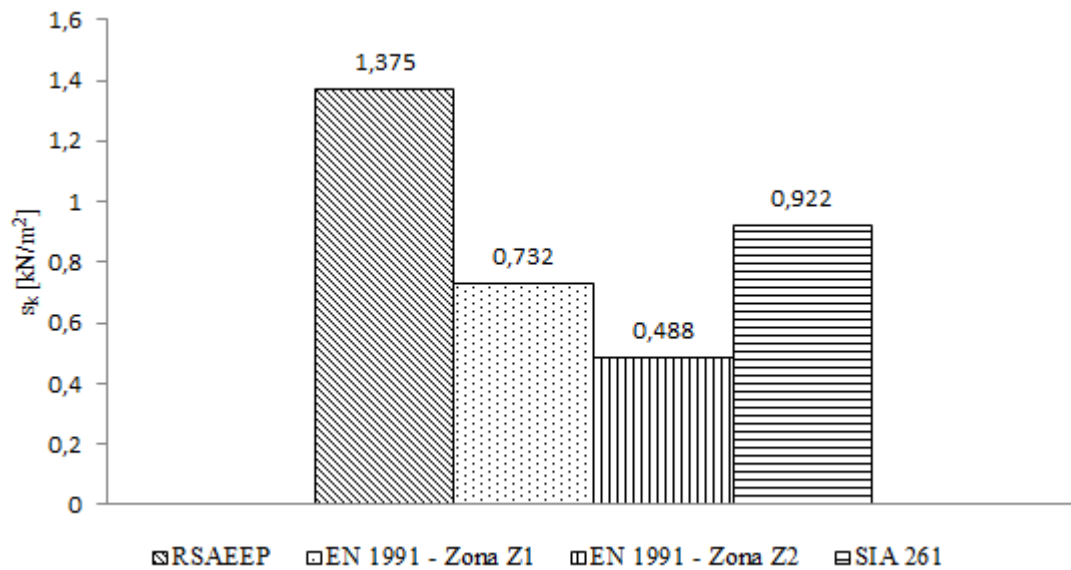


Gráfico 2 – Valores da carga da neve ao nível do solo para uma altitude de 600 m segundo as diferentes normas

Analisando o Gráfico 2, pode concluir-se que existe uma discrepância do RSAEEP em relação às duas restantes normas, o que indicia, de novo, uma eventual sobrevalorização devido à ação da neve. Em relação à EN 1991 verifica-se um aumento da carga da neve ao nível do solo da zona Z1 para a zona Z2 como era de esperar uma vez que a zona Z1 é caracterizada como sendo um local com maior probabilidade de grandes nevões. No que se refere à norma SIA 261, esta apresenta valores superiores aos valores obtidos pela EN 1991, o que leva a concluir que existe uma maior incidência da ação da neve.

Capítulo 5 – A ação do vento

Neste Capítulo irá ser feita uma comparação no dimensionamento da ação do vento para os três regulamentos. Existem dois tipos de coeficientes de forma: coeficientes de pressão e coeficientes de força. Para o presente estudo, apenas são abordados os coeficientes de pressão, os mais indicados no estudo da ação do vento num edifício. Os coeficientes de pressão destinam-se a superfícies tais como fachadas e coberturas, enquanto os coeficientes de força são utilizados para estruturas reticuladas. O vento é considerado como uma ação estática variável ao longo da altura da construção. Regra geral, a pressão ou a força do vento é medida perpendicularmente a superfície de contato considerada.

No que se refere à convenção de sinais, ela é idêntica nos três regulamentos em estudo. São consideradas positivas as forças de pressão sobre a superfície e negativas as forças de sucção. A Figura 8 define a convenção de sinais para as diferentes pressões, tendo em conta para a situação *a*) que a permeabilidade é preponderante à superfície situada ao vento, e para a situação *b*) a permeabilidade é preponderante à superfície oposta ao vento.

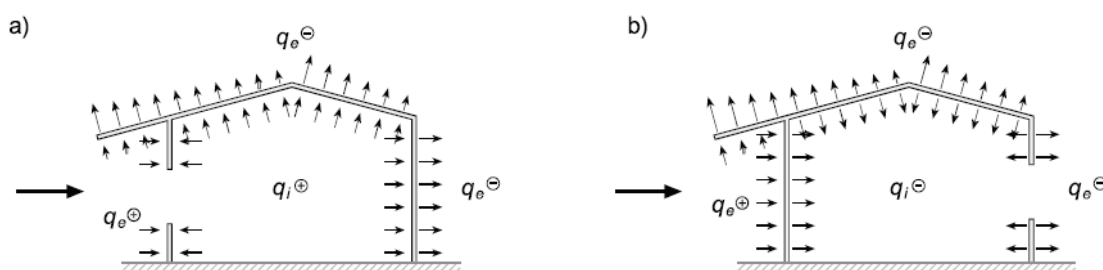


Figura 8 – Convenção de sinais para a ação exercida pelo vento sobre as superfícies (SIA 261)

5.1 – Quantificação da ação do vento segundo o RSAEEP

Para a quantificação da ação do vento segundo o RSAEEP é necessário definir em que zona o edifício em análise está inserido. Segundo o RSAEEP, o território português está dividido em duas zonas, a saber as zonas *A* e *B*: a zona *A* engloba a generalidade do território exceto para altitudes superiores a 600 m assim como os arquipélagos da Madeira e dos Açores, e ainda as regiões do continente situadas a uma distância de 5 km da costa, sendo estas condições englobadas na zona *B*. O regulamento impõe algumas exceções no que diz respeito ao zonamento territorial para locais pertencentes à zona *A* mas cujas condições

orográficas e estudos prévios no local determinem exposições ao vento desfavorável. Deve-se, nesse caso, optar por incluir o local na zona *B* por uma questão de segurança.

Determinada a zona do local onde será implantado o edifício, é necessário avaliar o tipo de obstrução que o vento poderá enfrentar, o que definirá a pressão nas fachadas do edifício. Desta forma, o Regulamento dispõe de dois tipos de rugosidade: rugosidade do tipo I, definida para os locais situados no interior de zonas urbanas em que a altura média da construção existente nesse local é superior ao da construção pretendida, e a rugosidade do tipo II, definida para locais mais expostos ao vento, como sejam as zonas rurais e a periferia de zonas urbanas.

Com estes dois parâmetros é possível quantificar a influência dos obstáculos no que se refere à aerodinâmica da periferia do edifício e à distribuição do vento nas suas fachadas. Isto não implica a atribuição do mesmo tipo de rugosidade em todas as direções de incidência da ação do vento. É pois possível que, para um dado edifício, exista uma fachada em que a zona de ação do vento possua obstruções, associada portanto a uma rugosidade aerodinâmica do solo do tipo I, enquanto as restantes fachadas sejam associadas a direções do vento com rugosidade do tipo II.

Deve ser efetuada uma análise geométrica ao edifício para ser quantificada a pressão que o vento exerce nas fachadas do mesmo, uma vez que os parâmetros geométricos influem na quantificação da ação do vento. Essa pressão é denominada por pressão dinâmica do vento (w) e varia com as rajadas de vento [12].

Para a determinação da pressão dinâmica do vento, é necessário conhecer os parâmetros descritos anteriormente como sejam o zonamento do território, a rugosidade aerodinâmica do solo, e a altura da construção, uma vez que as rajadas do vento são mais intensas com o aumento da altura do edifício. O RSAEEP fornece um quadro e um gráfico (Gráfico 3) para a obtenção da pressão dinâmica do vento em função dos parâmetros acima referidos, referentes apenas aos locais pertencentes à zona *A*. O valor característico da pressão dinâmica do vento para a zona *B* é obtido multiplicando o valor retirado do referido gráfico por 1,2.

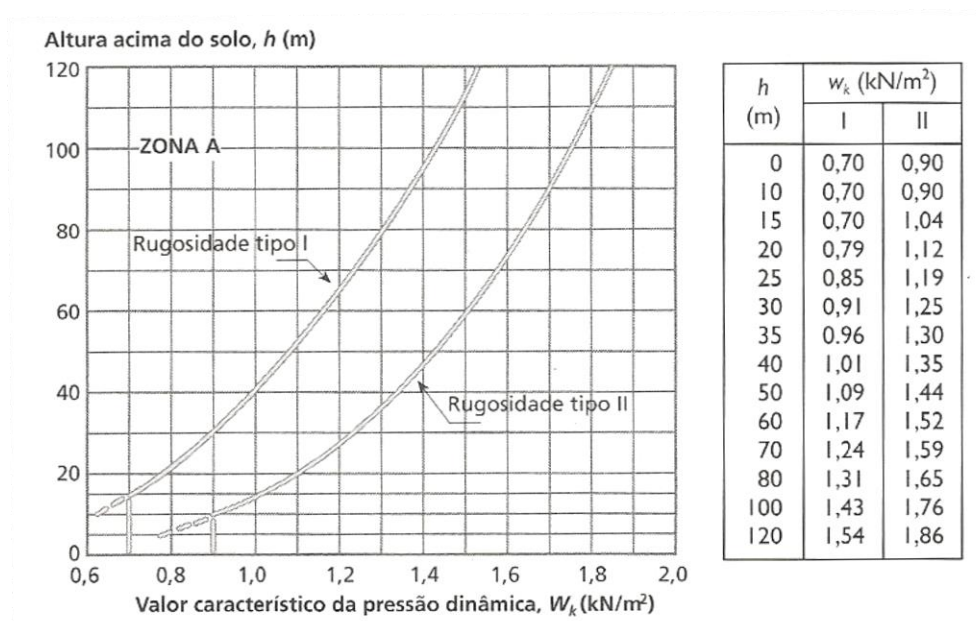


Gráfico 3 – Valor característico da pressão dinâmica do vento (RSAEEP)

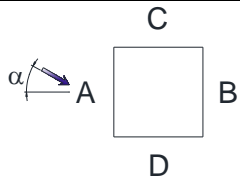
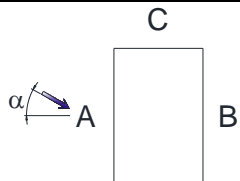
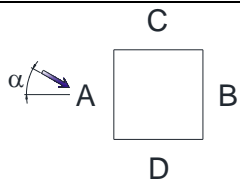
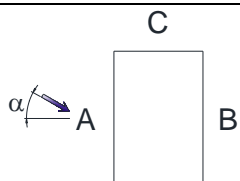
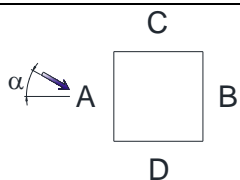
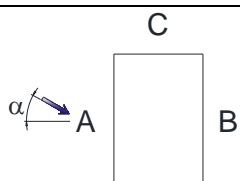
Determinada a pressão dinâmica do vento é necessário quantificar os coeficientes de forma relativos à construção em causa, de maneira a quantificar a ação do vento sobre a estrutura. Como já foi referido, ir-se-ão analisar os coeficientes de pressão por serem os mais apropriados para elementos com grandes superfícies. A pressão que o vento exerce normalmente à superfície (p) é obtida pela expressão:

$$p = \delta_p w \quad (23)$$

O coeficiente de pressão, δ_p , representa a soma vetorial do coeficiente de pressão exterior com o coeficiente de pressão interior. Os valores dos coeficientes de pressão exteriores e interiores são dados no Anexo I do RSAEEP. As pressões exteriores dependem da forma da construção e do sentido de incidência do vento, enquanto o coeficiente de pressão interior depende da existência de aberturas na envolvente do edifício. Estes coeficientes são afetados por sinais positivos e negativos consoante provoquem, respetivamente, pressões ou sucções.

Na Tabela 13 são apresentados os valores da pressão exterior para duas orientações do vento, a considerar nas fachadas para edifícios com planta retangular segundo o RSAEEP. Os parâmetros de entrada para a determinação do coeficiente de pressão são a geometria do edifício em planta e o ângulo de incidência do vento na fachada designada por A. O ângulo formado com a fachada A é nulo quando a ação do vento é perpendicular à superfície.

Tabela 13 – Coeficientes de pressão exterior (RSAEEP)

Relações geométricas do edifício		Planta	Direção do vento θ (graus)	Ações globais sobre superfícies			
$\frac{h}{b}$	$\frac{a}{b}$			A	B	C	D
$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0	+ 0,7	- 0,2	- 0,5	- 0,5
			90	- 0,5	- 0,5	+ 0,7	- 0,2
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$		0	+ 0,7	- 0,25	- 0,6	- 0,6
			90	- 0,5	- 0,5	+ 0,7	- 0,1
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0	+ 0,7	- 0,25	- 0,6	- 0,6
			90	- 0,6	- 0,6	+ 0,7	- 0,25
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$		0	+ 0,7	- 0,3	- 0,7	- 0,7
			90	- 0,5	- 0,5	+ 0,7	- 0,1
$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} > 6$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0	+ 0,8	- 0,25	- 0,8	- 0,8
			90	- 0,8	- 0,8	+ 0,8	- 0,25
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$		0	+ 0,7	- 0,4	- 0,7	- 0,7
			90	- 0,5	- 0,5	+ 0,8	- 0,1

Para as coberturas o processo é idêntico ao anterior. É necessário conhecer as relações geométricas do edifício e a inclinação da vertente. A quantificação da ação do vento é feita para cada uma das direções do vento. O RSAEEP prevê cinco tipos de cobertura para a análise do coeficiente de pressão, sendo elas:

- Cobertura de duas vertentes;
- Cobertura de uma vertente;
- Cobertura cilíndrica com diretriz circular;
- Cobertura de múltiplas vertentes;
- Cobertura de múltiplas vertentes em dente de serra.

Os valores dos coeficientes de pressão exterior, a serem utilizados para a determinação da ação do vento na superfície, são análogos para todos os tipos de cobertura. O RSAEEP fornece uma série de tabelas de maneira a obter o coeficiente de pressão exterior dependendo das relações geométricas do edifício e do tipo de cobertura. A título de exemplo irá ser analisada a cobertura do modelo tipo (ver Figura 1, pág.22) recorrendo à Tabela 14 e tratando-se de uma cobertura de duas vertentes.

A primeira coluna da tabela é referente à relação geométrica do edifício e será o parâmetro de entrada para a obtenção do coeficiente de pressão exterior na cobertura. Após determinar em que geometria se enquadra o edifício deverá seguir-se para a coluna seguinte relativa à inclinação da vertente da cobertura. De seguida, deverá retirar-se o valor dos coeficientes encontrados no seguimento destes e dispô-los como indica a Figura 9.

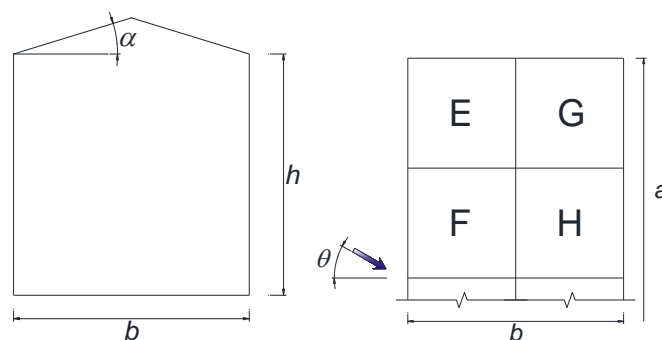


Figura 9 – Zonas em cobertura de duas vertentes

Tabela 14 – Coeficiente de pressão exterior para cobertura de duas vertentes

Relações geométricas do edifício h/b	Inclinação da vertente α (graus)	Ações globais			
		Direção do vento			
		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 90^\circ$	
		E, F	G, H	E, G	F, H
$h/b \leq \frac{1}{2}$	0	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4
	5	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4
	10	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6
	20	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6
	30	0	-0,4	-0,7	-0,6
	45	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	0	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6
	5	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6
	10	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6
	20	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6
	30	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8
	45	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	0	-0,7	-0,6	-0,9	-0,7
	5	-0,7	-0,6	-0,8	-0,8
	10	-0,7	-0,6	-0,8	-0,8
	20	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8
	30	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7
	45	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7
	50	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7

Para os edifícios onde os compartimentos interiores não impeçam a livre circulação do ar, o coeficiente de pressão interior, δ_{pi} , é obtido tendo em conta a permeabilidade das fachadas exteriores, ou seja, no caso de as fachadas possuírem permeabilidade igual ou muito semelhante, em que não é possível distinguir uma fachada francamente predominante, podem

considerar-se duas situações: ter duas fachadas opostas com permeabilidade semelhante e as outras duas fachadas impermeáveis, sendo o vento normal às fachadas permeáveis com um coeficiente de pressão interior de +0,2 e para o vento normal às fachadas impermeáveis com um coeficiente de pressão interior de -0,3; a outra situação é considerar as quatro fachadas com permeabilidade semelhante com um coeficiente de pressão interior de -0,3.

Para os edifícios que possuam aberturas numa face predominante, durante a ocorrência de vento intenso, os coeficientes de pressão interior deverão ser iguais a 0,75 dos valores de coeficiente exterior para a fachada onde predomina a abertura.

5.2 – Quantificação da ação do vento segundo a EN 1991

A aplicação do articulado da EN 1991 está limitada a edifícios até 200 m de altura. Para alturas superiores recomenda-se bibliografia especializada bem como modelações numéricas e/ou ensaios em túnel de vento.

Como a velocidade do vento aumenta em altura, é necessário determinar uma velocidade média, v_m , de forma a serem quantificadas as rajadas do vento no edifício. Para tal a velocidade do vento depende de fatores fundamentais tais como a zona onde será inserida a construção, a época do ano mais gravosa (ventosa), a direção predominante do vento e por fim a quantidade de obstruções capazes de alterar a direção do vento impedindo que este atinja as fachadas do edifício.

Antes de ser possível determinar a velocidade média do vento é necessário determinar o seu valor de referência, v_b , que consiste em definir a direção do vento e o coeficiente de razão. Estes dois parâmetros são considerados unitários segundo o Anexo Nacional da EN 1991 e o valor básico da velocidade de referência do vento é retirado a partir da zona em que a construção será inserida. De forma idêntica ao RSAEEP, o continente nacional está dividido em duas zonas, zona A e zona B, sendo este parâmetro idêntico ao visto anteriormente. Assim, os valores de base da velocidade de referência do vento para a zona A e para a zona B são de 27 m/s e 30 m/s, respetivamente.

Determinado o valor da velocidade de referência, é necessário determinar a rugosidade do terreno. Este parâmetro está associado a quatro categorias de terreno, como é possível observar pela Tabela 15 onde são indicados os valores do comprimento de rugosidade, z_0 , e a altura mínima, z_{min} , a considerar para a respetiva categoria.

Tabela 15 – Categoria de terreno e respetivo parâmetro (EN 1991)

Categoria do 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

Pela expressão seguinte é possível determinar o coeficiente de rugosidade que depende da altura da construção acima do nível do solo e da categoria do terreno.

Para $z_{min} \leq z \leq z_{max}$

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (24)$$

Para $z \leq z_{min}$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad (25)$$

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (26)$$

em que:

$Z_{0,II}$ = 0,05 m;

z_{min} e z_0 dependem da categoria do terreno, definidos na Tabela 15;

z_{max} a ser considerado igual a 200 m.

Para determinar a velocidade média falta conhecer o coeficiente de orografia, $c_0(z)$, geralmente considerado igual a 1,0. Desta forma a velocidade média do vento a uma altura z acima do solo, $v_m(z)$, é obtida pela expressão:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (27)$$

O fator seguinte com vista à determinação da ação do vento pela EN 1991 é a intensidade de turbulência à altura z , $I_v(z)$. Este parâmetro é definido como sendo o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento, sendo o desvio padrão obtido por:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \quad (28)$$

em que:

- k_I coeficiente de turbulência considerado igual a 1,0 segundo a EN 1991;
- c_0 coeficiente de orografia;
- z_0 comprimento de rugosidade, ver Tabela 15.

Como referido no parágrafo anterior, a intensidade de turbulência à altura z , $I_v(z)$, é obtida por:

Para $z_{min} \leq z \leq z_{max}$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad (29)$$

Para $z < z_{min}$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad (30)$$

Determinados todos os parâmetros, é possível calcular a pressão dinâmica de pico à altura z , $q_p(z)$, que resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração da velocidade como a expressão seguinte indica:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (31)$$

O valor da massa volúmica do ar, ρ , depende da temperatura do ar, da pressão atmosférica da região e da altitude do local. O Anexo Nacional não contém qualquer prescrição, pelo que se toma o valor recomendado segundo o regulamento em análise de 1,25 kg/m³.

À semelhança do RSAEEP, existe a necessidade de determinar o coeficiente de pressão exterior, c_{pe} , e o coeficiente de pressão interior, c_{pi} . Na EN 1991, existem duas representações para o coeficiente de pressão exterior, sendo elas $c_{pe,1}$ para coeficientes locais,

destinando-se a cálculos de elementos com áreas iguais ou inferiores a 1 m^2 e $c_{pe,10}$ para os coeficientes globais, sendo estes destinados para o cálculo da estrutura resistente global do edifício. Neste estudo irão apenas ser abordados os coeficientes de pressão globais.

Para áreas compreendidas entre 1 m^2 e 10 m^2 , o coeficiente de pressão exterior, $c_{pe,10}$, poderá ser determinado interpolando os resultados através da seguinte expressão:

$$c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \log_{10} A \quad (32)$$

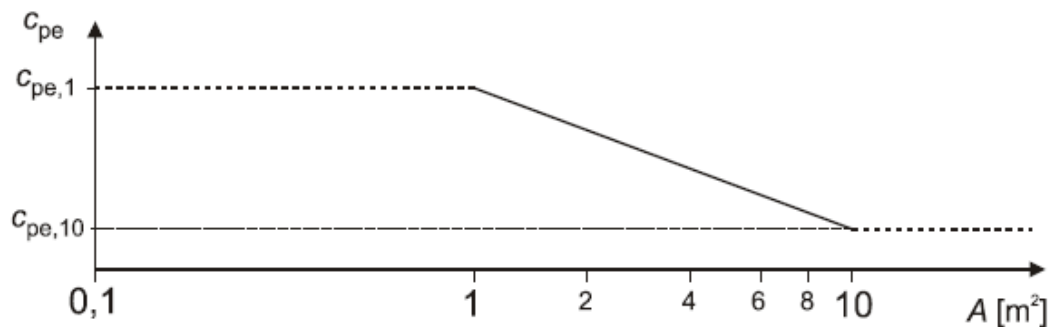


Figura 10 – Procedimento recomendado para determinação do coeficiente de pressão exterior c_{pe} em edifícios, para uma superfície carregada A compreendida entre 1 m^2 e 10 m^2 (EN 1991)

Analisando agora a forma do perfil de pressão dinâmica do vento ao longo da altura do edifício, este aumenta com a altura do mesmo. Para edifícios com grandes alturas é necessário corrigir a pressão dinâmica de pico. A EN 1991 propõe o escalonamento da forma do perfil de pressão dinâmica ao longo da altura do edifício, como se pode observar na Figura 11.

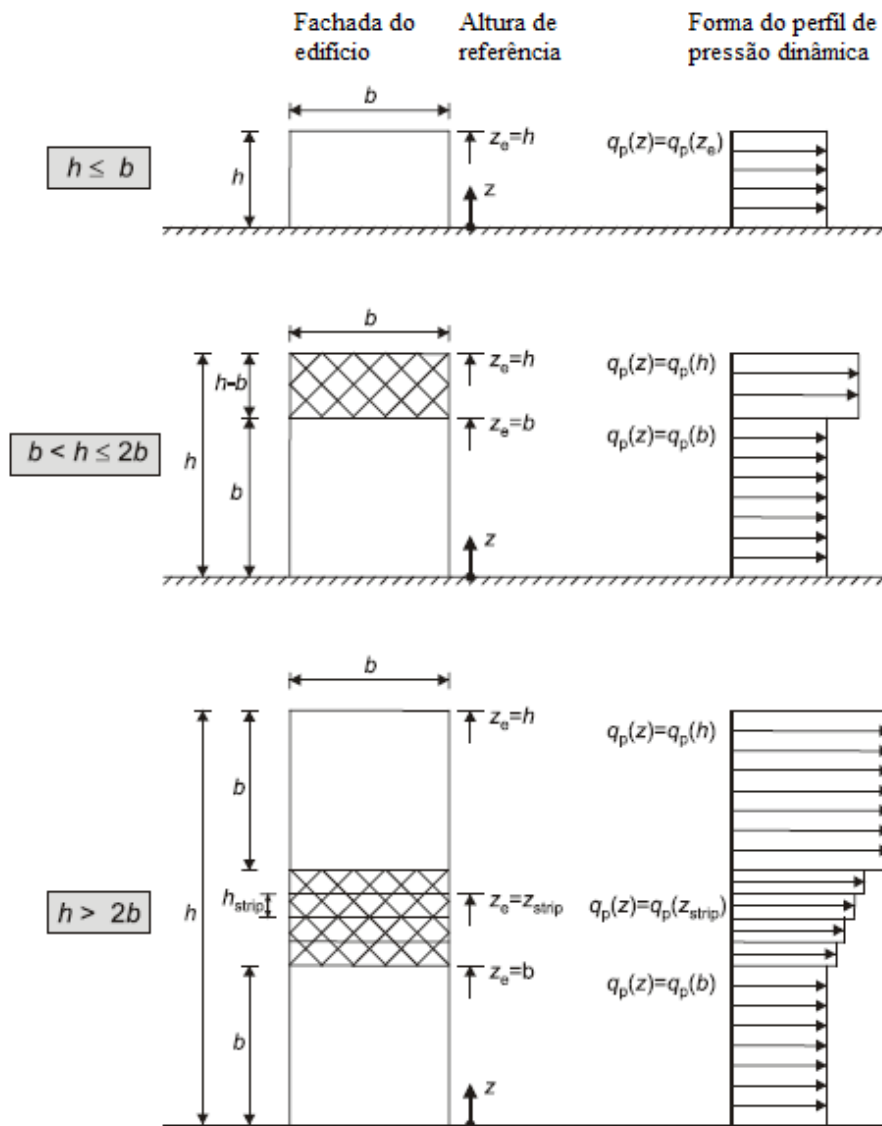


Figura 11 – Altura de referência z_e em função de h e b , e correspondente perfil de pressão dinâmica (EN 1991)

Pela análise da Figura 11 é possível determinar as alturas de referência, z_e , para o que é necessário apenas estabelecer a relação h/b . Os três casos indicados para a determinação da altura de referência são descritos de seguinte forma:

- *um edifício cuja altura h é inferior a b , deverá ser considerado como tendo uma única parte;*
- *no caso de um edifício cuja altura h é superior a b mas inferior a $2b$, poderá considerar-se que o edifício é constituído por duas partes, compreendendo: uma parte inferior que se prolonga na vertical, a partir*

do solo, até uma altura igual a b , e uma parte superior constituída pelo restante;

- no caso de um edifício cuja altura h é superior a $2b$, poderá considerar-se que o edifício é constituído por diversas partes, compreendendo: uma parte inferior que se prolonga na vertical, a partir do solo, até uma altura igual a b ; uma parte superior que se estende, desde o topo, numa altura igual a b , e uma zona intermédia, entre as partes superior e inferior, que poderá ser dividida em faixas horizontais com uma altura h_{strip}^h

A EN 1991 propõe três disposições distintas como é possível observar na Figura 12.

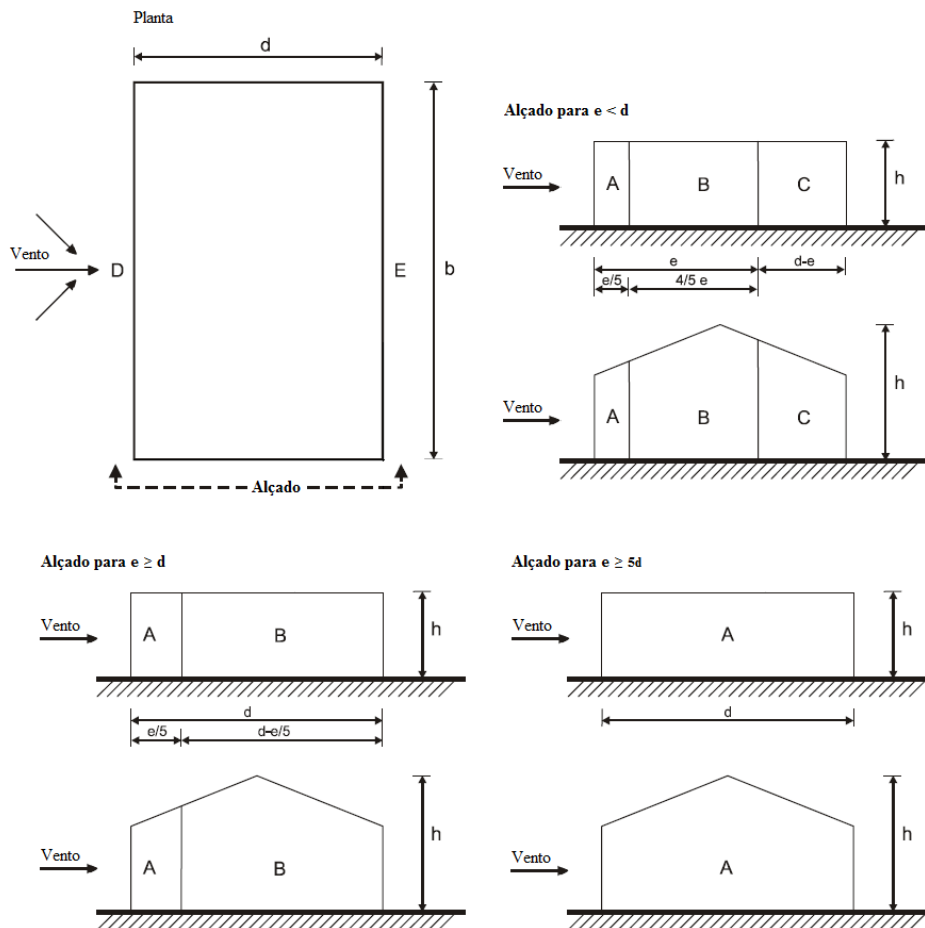


Figura 12 – Zonas em paredes verticais (EN 1991)

Para a determinação do coeficiente de pressão exterior a ser adotado para as paredes verticais é necessário determinar o menor valor entre a dimensão transversal à direção do

^h Excerto retirado do Comité Europeu de Normalização, 2010.

vento e duas vezes a altura do edifício. Esse menor valor é denominado por e , e a relação deste parâmetro com o parâmetro d indica qual a estrutura de divisão das pressões a ser utilizada para o alçado.

Com recurso à Tabela 16 é possível determinar o valor recomendado do coeficiente de pressão exterior para fachadas de edifícios de planta regular. Para os valores intermédios da relação h/d , poderá ser efetuada uma interpolação linear. Os valores do Tabela 16 são aplicáveis para qualquer tipo de cobertura.

Tabela 16 – Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta regular (EN 1991)

Zona	A	B	C	D	E
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$
5	-1,2	-0,8	-0,5	+0,8	-0,7
1	-1,2	-0,8	-0,5	+0,8	-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-0,8	-0,5	+0,7	-0,3

Como foi referido anteriormente, apenas serão analisados os coeficientes globais de pressão exterior, $c_{pe,10}$.

Da mesma forma que se determina o coeficiente de pressão exterior para as fachadas, é necessário repetir o procedimento para a cobertura. A EN 1991 dispõe de seis tipos de cobertura com seis respetivas tabelas onde são apresentados os valores recomendados para os coeficientes de pressão exterior. Os seis tipos de coberturas que a EN 1991 contempla são:

- Cobertura em terraço;
- Coberturas de uma vertente;
- Coberturas de duas vertentes;
- Cobertura de quatro vertentes;
- Coberturas múltiplas;
- Coberturas em abóbada e cúpulas.

Os valores dos coeficientes de pressão exterior a serem utilizados para a determinação da ação do vento na superfície são análogos para todos os tipos de cobertura (à semelhança do RSAEEP). A EN 1991 fornece uma série de tabelas de maneira a obter o coeficiente de

pressão exterior dependendo das relações geométricas do edifício e do tipo de cobertura. A título de exemplo, irá ser analisada a cobertura de duas vertentes do modelo tipo (ver Figura 1, pág. 22) com recurso à Tabela 17.

Tabela 17 – Coeficiente de pressão exterior para coberturas de duas vertentes

Ângulo de inclinação α	Zona: Direcção do vento $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
-45°	-0,6		-0,6		-0,8		-0,7		-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	+0,2		+0,2	
							-0,6		-0,6	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6		+0,2	
	+0,0		+0,0		+0,0				-0,6	
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,4		-1,0	-1,5
	+0,2		+0,2		+0,2		+0,0		+0,0	+0,0
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4		-0,5	
	+0,7		+0,7		+0,4		+0,0		+0,0	
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,2		-0,3	
	+0,7		+0,7		+0,6		+0,0		+0,0	
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,2		-0,3	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,2		-0,3	

Ângulo de inclinação α	Zona: Direcção do vento $\theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,8	-1,2
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5	
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	
60°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	
75°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	

Para a determinação do coeficiente de pressão exterior na cobertura é necessário indicar o ângulo de inclinação da vertente da cobertura. Efetuado o passo anterior, basta aplicar o coeficiente de pressão exterior na cobertura para as duas direcções do vento indicadas na Tabela 17. Como já foi referido, apenas irão ser analisados os coeficientes de pressão global, $c_{pe,10}$.

A forma de distribuição dos coeficientes de pressão é indicada na Figura 13.

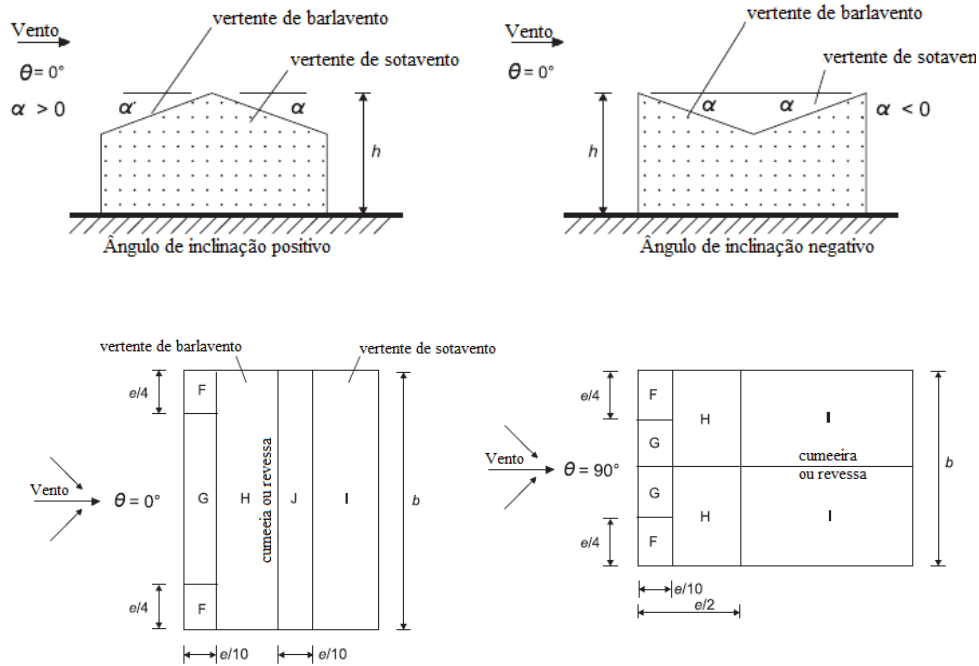


Figura 13 – Zonamento em coberturas de duas vertentes

Por fim, falta apenas analisar os coeficientes de pressão interior. Existem 3 formas de determinar o valor para o coeficiente de pressão interior:

- Quando uma face de um edifício é proeminente sendo a área das aberturas nessa face, pelo menos, o dobro da área das aberturas nas restantes faces, sendo que as aberturas podem ser qualquer via de passagem de ar;
- Quando a área das aberturas na fachada predominante é igual a, pelo menos, três vezes a área das aberturas nas restantes fachadas;
- Quando o edifício não possui uma fachada predominante.

Para a primeira forma, deverá ser considerada uma fração do coeficiente de pressão exterior ao nível das aberturas na face predominante, sendo a expressão a seguinte:

$$c_{pi} = 0,75 \cdot c_{pe,10} \quad (33)$$

Quando a área das aberturas na face predominante é igual a, pelo menos, três vezes a área das aberturas nas restantes faces, deverá ser considerada uma fração mais gravosa do que a anterior, como se indica:

$$c_{pi} = 0,90 \cdot c_{pe,10} \quad (34)$$

No caso de edifícios sem uma face predominante, o coeficiente de pressão interior é determinado pelo Gráfico 4, sendo função do quociente entre a altura e a profundidade do edifício, h/d , e do índice de abertura, μ , para cada direção do vento θ . O índice de abertura é determinado através da expressão (35).

$$\mu = \frac{\Sigma \text{área das aberturas em que } c_{pe} \text{ é negativo ou } -0,0}{\Sigma \text{área de todas as aberturas}} \quad (35)$$

Nos casos em que não seja possível determinar o valor de μ , deverá ser considerado o valor mais gravoso de entre +0,2 e -0,3.

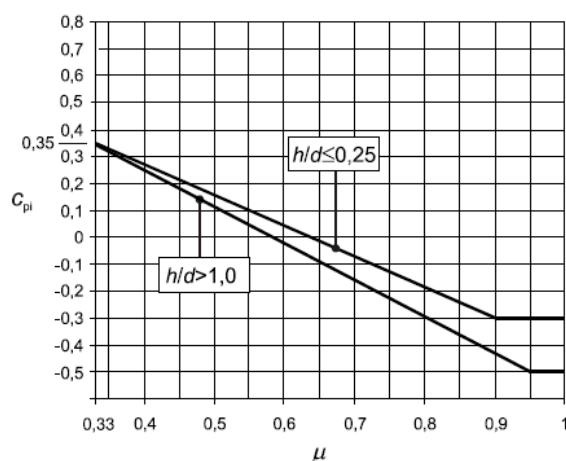


Gráfico 4 – Coeficiente de pressão interior no caso de aberturas uniformemente distribuídas (EN 1991)

Os valores de h/d são compreendidos entre 1,0 e 0,25 e poderão ser determinados por meio de uma interpolação linear.

5.3 – Quantificação da ação do vento segundo a norma suíça SIA 261

À semelhança da EN 1991, a determinação da ação do vento pela norma SIA 261 é somente exequível para construções em que a altura total do edifício, ou qualquer outra construção, não ultrapasse os 200 m.

Primeiramente, para ser possível determinar a pressão dinâmica do vento no local da construção, necessitamos de determinar o coeficiente de repartição do vento na construção pretendida. Esse coeficiente é obtido tendo em conta a velocidade do vento no local, em função da altura, e do tipo de rugosidade ou obstruções existentes na área circundante devidas a vegetação ou outras construções. A partir da Tabela 18 é possível determinar a altura do gradiente de pressões, assim como a rugosidade do local. A SIA 261 disponibiliza quatro categorias de terreno para a determinação dos dois parâmetros anteriores, sendo eles apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Altura de gradiente z_g e exposição da rugosidade do solo, α_r

Categoria do terreno	Exemplos	Z_g [m]	α_r
II	Costa do lago	300	0,16
IIa	Grande planície	380	0,19
III	Localidades em meio rural	450	0,23
IV	Grandes áreas urbanas	526	0,30

É possível a determinação do coeficiente de repartição do vento graficamente. No Gráfico 5, verifica-se que para alturas z inferiores a 5 m, o coeficiente de repartição do vento permanece constante, sendo que para a categoria IV essa relação mantém-se até a altura de 10 m. Para alturas superiores a 30 m, a categoria IV sobrepõe-se à categoria III.

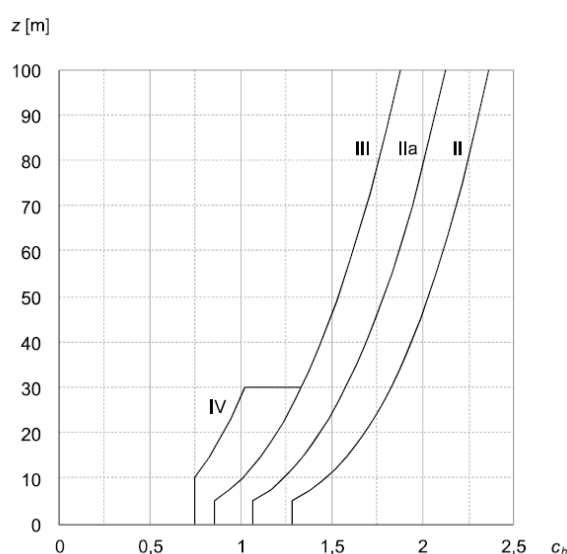


Gráfico 5 – Coeficiente de repartição do vento c_h em função da altura z e da categoria do terreno (SIA 261)

Desta forma, para ser determinada a pressão exercida pelo vento apenas é necessário estabelecer, de seguida, o coeficiente de pressão interior e exterior para as fachadas e para as coberturas, sendo o processo idêntico aos regulamentos anteriormente estudados. Os valores característicos da pressão exercida pelo vento sobre as superfícies interior e exterior, respetivamente, são determinados da seguinte forma:

$$q_{ik} = c_{pi} \cdot q_p \quad (38)$$

$$q_{ek} = c_{pe} \cdot q_p \quad (39)$$

Em analogia aos regulamentos em estudo, os coeficientes de pressão c_{pe} e c_{pi} têm em conta o ângulo de incidência do vento sobre a superfície e a volumetria da construção. O coeficiente de pressão interior é influenciado pela permeabilidade das fachadas, ou seja, as aberturas nas fachadas (janelas, portas, ventilação) do edifício.

Uma das diferenças entre os regulamentos anteriormente estudados e a norma SIA 261, no que se refere aos coeficientes de pressão exterior e interior, é que na SIA 261 não é feita separadamente a quantificação da ação na cobertura e nas fachadas. Na determinação do coeficiente de pressão interior, é essencial determinar qual das aberturas é preponderante, sendo uma necessidade não existente no RSAEEP. Este apenas faz referência à importância da distribuição das aberturas pelo contorno da construção. Se existirem aberturas preponderantes, a abordagem é distinta de forma a que seja possível determinar o valor a utilizar. Isto é, supondo que existe uma abertura preponderante na fachada A que coincide com a fachada perpendicular à direção do vento, pelas tabelas da SIA 261, dever-se-á utilizar o valor indicado para todas as superfícies interiores com o sinal positivo ou negativo conforme indicado. No caso de as aberturas serem repartidas, a SIA 261 fornece o valor do coeficiente de pressão interior a ser utilizado.

Relativamente ao valor do coeficiente de pressão exterior, a sua determinação é feita de forma análoga à já exposta nos restantes regulamentos com a particularidade de as fachadas e coberturas serem analisadas simultaneamente na mesma tabela.

A Tabela 19 foi retirada do regulamento suíço para coberturas de duas vertentes, e é aplicada ao modelo tipo utilizado ao longo da presente tese (ver Figura 1, pág. 22). A escolha da tabela é feita em função de dois fatores: o primeiro fator a ter-se em conta é o ângulo de inclinação da cobertura, e o segundo fator é a geometria do edifício sendo necessário

determinar a relação geométrica dos parâmetros h , b e d . No caso de a relação não corresponder a nenhuma das relações disponíveis na SIA 261, deve optar-se pela tabela fornecida pela norma que mais se aproxime do caso pretendido. Poderá, ainda, ser requerida uma interpolação entre duas tabelas. Eleita a tabela, apenas é necessária a direção do vento para retirar os coeficientes de pressão exterior e interior. A título de exemplo é apresentada a Tabela 19, retirada diretamente da norma SIA 261 sem qualquer interpolação, por ser a que melhor se ajusta à geometria do modelo tipo.

Tabela 19 – Coeficiente para $h:b:d = 1:1:1$, inclinação da cobertura de 10° (adaptado da SIA 261)

Coeficientes de pressão													
	C_{pe}								C_{pi}				
	Superfície de aplicação								Aberturas laterais predominantes				
θ	A	B	C	D	E	F	G	H	rep.	A	B	C	D
0°	0,75	-0,3	-0,75	-0,75	-1,05	-1,05	-0,4	-0,4	-0,3	0,75	-0,35	-0,75	-0,75
15°	0,6	-0,4	-0,5	-0,55	-1,05	-0,9	-0,35	-0,4	-0,2	0,55	-0,4	-0,45	-0,55
45°	0,4	-0,45	0,4	-0,45	-1,05	-0,6	-0,6	-0,35	$\pm 0,1$	0,45	-0,45	0,45	-0,45
90°	-0,75	-0,75	0,75	-0,3	-1,05	-0,4	-1,05	-0,4	-0,3	-0,75	-0,75	0,75	-0,35

A forma de distribuição dos coeficientes de pressão é a indicada na Figura 15.

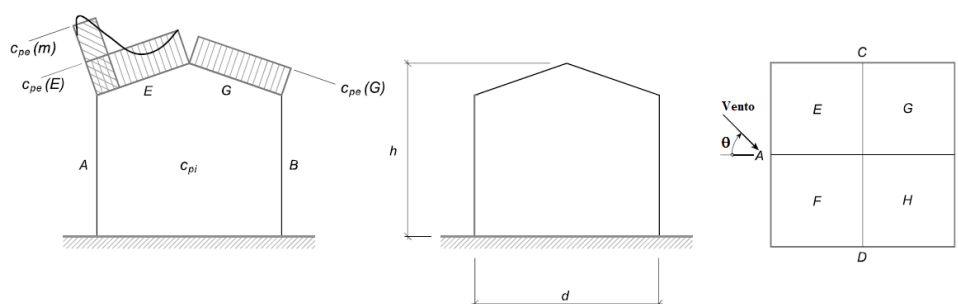


Figura 15 – Zonas em coberturas de duas vertentes (adaptado da SIA 261)

5.4 – Implementação da ação do vento numa folha de cálculo automático

O procedimento de quantificação da ação do vento foi implementado numa folha de cálculo automático, tal como para as restantes ações analisadas.

Os espaços a verde indicam a necessidade de introdução de dados e os espaços preenchidos a azul são os valores obtidos.

RSAEEP

Os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitudes superiores a 600

Tipo de rugosidade aerodinâmica **II** rugosidade a atribuir aos restantes locais, nomeadamente zonas rurais e periferia de zonas urbanas

Altura do edifício acima do solo = **9** [m]

$$w_k = \boxed{0,90} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

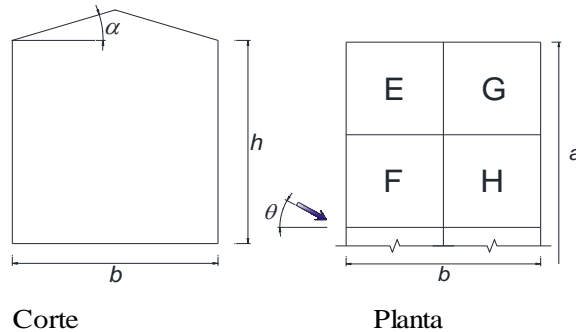
Para a zona B, os valores característicos da pressão dinâmica a considerar devem ser obtidos multiplicando por 1,2 os valores obtidos para a zona A o que obtem-

$$w_k = \boxed{1,08} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Valor de h = **7,5** [m]

Valor de b = **10** [m]

Valor de a = **15** [m]



Coefficiente de pressão c_{pe} para paredes

Relações geométricas do edifício		Direção do vento θ	Ações globais sobre as superfícies			
h/b	a/b		A	B	C	D
0,75	1,5	0	0,70	-0,25	-0,60	-0,60
		90	-0,60	-0,60	0,70	-0,25

Coefficiente de pressão c_{pe} para coberturas de duas vertentes

Relações geométricas do edifício	Inclinação da vertente α	Ações globais			
		Direção do vento			
		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 90^\circ$	
h/b		E, F	G, H	E, G	F, H
0,75	17	-0,77	-0,6	-0,8	-0,8

Coefficiente de pressão interior, c_{pi}

Edifícios em que, durante a ocorrência de vento intenso, existam aberturas numa das fachadas ou, se existirem em várias fachadas, as de uma delas sejam fracamente predominantes:

as quatro fachadas com permeabilidade semelhante

$$c_{pi} = -0,3$$

Direção do vento = 0°

Fachada

$$w_A = 0,4320 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$w_B = -0,5940 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$w_C = -0,9720 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$w_D = -0,9720 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Cobertura

$$w_{E, F} = -1,1556 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$w_{G, H} = -0,9720 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Direção do vento = 90°

Fachada

$$w_A = -0,9720 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$w_B = -0,9720 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$w_C = 0,4320 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$w_D = -0,5940 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Cobertura

$$w_{E, G} = -1,1880 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$w_{F, H} = -1,1880 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

EN 1991

Esta Norma aplica-se a edifícios e outras obras de engenharia civil com alturas até 200m e pontes em que nenhum tramo tenha um vão superior a 200m.

Velocidade do vento e pressão dinâmica**Valores de referência**

ZONA B - Os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitudes superiores a 600 m.

$$\begin{aligned} v_{b,0} &= 30,0 \quad [\text{m/s}] \\ c_{\text{dir}} &= 1,0 \\ c_{\text{season}} &= 1,0 \end{aligned}$$

$$v_b = c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot v_{b,0}$$

$$v_b = 30 \quad [\text{m/s}]$$

Vento médio**Rugosidade do terreno**

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln(z/z_0)$$

Escolher categoria do terreno

III

Altura de z acima do solo? 9

$$k_r = 0,215389$$

$$c_r(z) = 0,732582$$

$$k_r = 0,19 \cdot (z_0/z_0, \Pi)^{0,07}$$

$$c_o = 1,0$$

Variação com a altura

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot C_o(z) \cdot v_b$$

$$v_m(z) = 21,9774 \quad [\text{m/s}]$$

Turbulência do vento

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I$$

$k_I = 1,0$

$\sigma_v = 6,46168$

$$I_v(z) = \sigma_v / v_m(z)$$

$I_v(z) = 0,294014$

Pressão dinâmica de pico

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

$q_p(z) = 923,1793 \text{ [N/m}^2\text{]}$

$$q_b = 1/2 \cdot \rho \cdot v_b^2$$

$q_b = 562,5 \text{ [N/m}^2\text{]}$

$$c_e(z) = q_p(z) / q_b$$

$c_e(z) = 1,641208$

Acções do vento

Pressão exercida pelo vento em superfícies exteriores

Largura da construção (comprimento da superfície perpendicular à direcção do vento)?, $b = 15 \text{ [m]}$

$e = 15 \text{ [m]}$

Profundidade da construção (comprimento da superfície paralela à direcção do vento)?, 10 [m] $h/d = 0,900$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot C_{pe}$$

$$w_i = q_p(z_i) \cdot C_{pi}$$

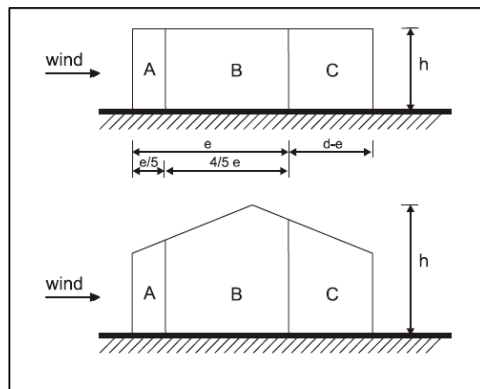
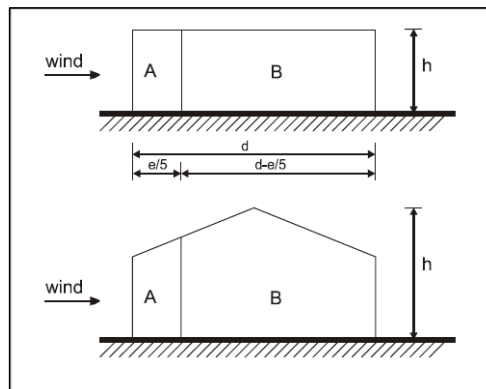
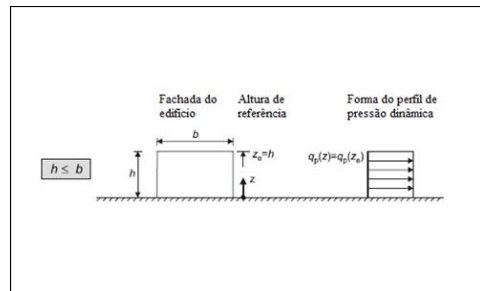
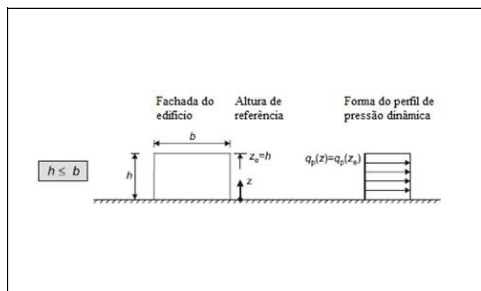
Não existe nenhuma face predominante

Insira o somatório das áreas em que C_{pe} é negativo ou $-0,0 = 262,5$ [m²]

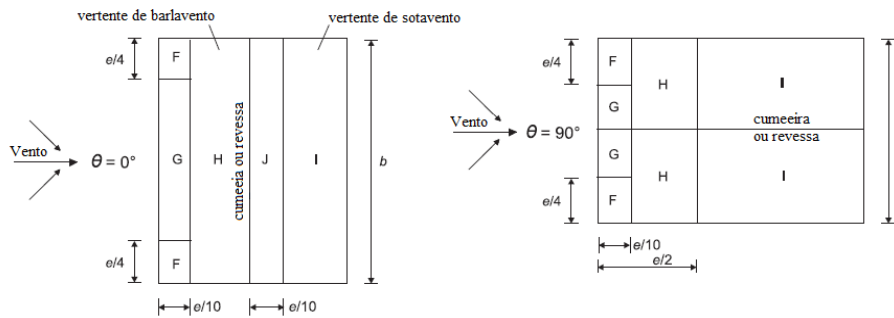
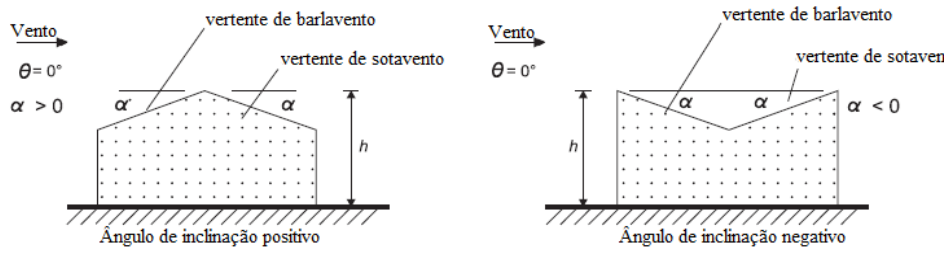
Insira o somatório de todas as aberturas = 375 [m²]

Pressão nas fachadas com ângulo de incidência do vento 0°

Pressão nas fachadas com ângulo de incidência do vento 90°



Perfil de pressão	Direção do vento	w para cada Zona [kN/m ²]				
		D	E	A	B	C
q _p (h)	0°	0,871	-0,292	-0,963	-0,593	
	90°	0,834	-0,218	-0,963	-0,593	-0,316
q _p (b)	0°	0,832	-0,278	-0,919	-0,566	
	90°	0,796	-0,208	-0,919	-0,566	-0,302
q _p (zstrip)	0°	1,040	-0,348	-1,148	-0,708	
	90°	0,996	-0,260	-1,148	-0,708	-0,377



Ângulo de inclinação α	Zona; Direção do vento $q = 0^\circ$				
	F	G	H	I	J
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
17	-0,85	-0,76	-0,29	-0,40	-0,93

Ângulo de inclinação α	Zona; Direção do vento $q = 90^\circ$			
	F	G	H	I
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
17	-1,27	-1,31	-0,63	-0,50

Direção do vento	w para cada Zona				
	F	G	H	I	J
Valores (-) $\theta = 0^\circ$	-0,636	-0,556	-0,119	-0,224	-0,716
Valores (+) $\theta = 0^\circ$	-0,636	-0,556	-0,119	-0,224	-0,716
$\theta = 90^\circ$	-1,030	-1,067	-0,433	-0,316	-

SIA 261

O regulamento é válido para construções não superiores a 200m metros de altura.

Altitude = 600 [m]

Zona = Localidades em meio rural

z = 9 [m]

$c_h = 0,9776$

Coefficiente para $h : b : d = 1,5 : 2 : 1$, inclinação da cobertura de 10

φ	c_{pe}							
	Superfície de aplicação							
	A	B	C	D	E	F	G	H
0	0,8	-0,4	-0,85	-0,85	-1,1	-1,1	-0,5	-0,5
15	0,55	-0,4	-0,8	-0,75	-1,05	-0,95	-0,5	-0,55
45	0,35	-0,5	0,35	-0,55	-1,00	-0,7	-0,7	-0,4
90	-0,55	-0,55	0,85	-0,25	-1,05	-0,2	-1,05	-0,2

φ	c_{pi}				
	Aberturas predominantes				
	Repartido	A	B	C	D
0	-0,35	0,8	-0,4	-0,85	-0,85
15	-0,35	0,55	-0,4	-0,8	-0,65
45	-0,15	0,25	-0,55	0,35	-0,55
90	-0,1	-0,3	-0,3	0,85	-0,25

Valor de q_{p0} retirado do anexo E da SIA = 0,9

$q_p = 0,87984$

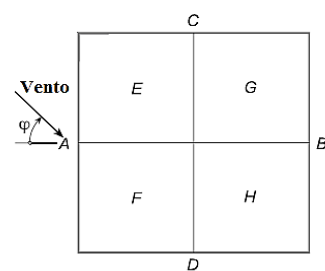
Qual o tipo de abertura? Sem abertura predominante

Valor característico da pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores:

φ	q_{ek}							
	Superfície de aplicação							
	A	B	C	D	E	F	G	H
0°	0,7039	-0,3519	-0,7479	-0,7479	-0,9678	-0,9678	-0,4399	-0,4399
15°	0,4839	-0,3519	-0,7039	-0,6599	-0,9238	-0,8358	-0,4399	-0,4839
45°	0,3079	-0,4399	0,3079	-0,4839	-0,8798	-0,6159	-0,6159	-0,3519
90°	-0,4839	-0,4839	0,7479	-0,2200	-0,9238	-0,1760	-0,9238	-0,1760

Valor característico da pressão exercida pelo vento nas superfícies interiores:

φ	q_{ik}				
	Aberturas predominantes				
	Repartido	A	B	C	D
0°	-0,3079	0,7039	-0,3519	-0,7479	-0,7479
15°	-0,3079	0,4839	-0,3519	-0,7039	-0,5719
45°	-0,1320	0,2200	-0,4839	0,3079	-0,4839
90°	-0,0880	-0,2640	-0,2640	0,7479	-0,2200



φ	w							
	Superfície de aplicação							
	A	B	C	D	E	F	G	H
0°	1,0118	-0,0440	-0,4399	-0,4399	-0,6599	-0,6599	-0,1320	-0,1320
15°	0,7919	-0,0440	-0,3959	-0,3519	-0,6159	-0,5279	-0,1320	-0,1760
45°	0,4399	-0,3079	0,4399	-0,3519	-0,7479	-0,4839	-0,4839	-0,2200
90°	-0,3959	-0,3959	0,8358	-0,1320	-0,8358	-0,0880	-0,8358	-0,0880

5.5 – Análise paramétrica das diferentes normas

Numa primeira análise às diferentes normas, salienta-se a nomenclatura distinta utilizada para definir as diferentes superfícies atuadas pela pressão do vento. O regulamento RSAEEP e a norma SIA 261 apresentam a mesma abordagem quanto à nomenclatura utilizada para delimitar as várias zonas, tanto nas fachadas quanto nas coberturas. A EN 1991 difere das restantes normas devido à consideração de uma possível divisão, por zonas de influência do vento, numa dada fachada ou cobertura. Devido a essa dissemelhança, optou-se por obter a relação dos valores característicos de pressão com a superfície da região que ocupa nas várias zonas de uma fachada, utilizando-se a forma descrita pelo RSAEEP e pela SIA 261 apenas para efeitos de comparação. Sendo assim, as fachadas perpendiculares ao vento, com incidência de 0° e 90° , são denominadas *A* e *C* respetivamente. A cobertura é dividida em quatro zonas como é possível verificar na Figura 16.

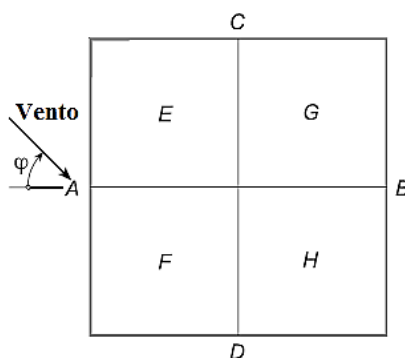


Figura 16 – Zonamento em fachadas e coberturas (RSAEEP e SIA 261)

No Gráfico 6 é apresentado um quadro resumo dos valores das pressões do vento exercidas nas diferentes fachadas assim como na cobertura. Foram analisadas duas direções ortogonais de incidência do vento dada a simetria apresentada pelo modelo (ver Figura 1, pág. 22), obtendo-se os seguintes resultados para as diferentes superfícies para a situação de vento normal à fachada *A* (vento a 0°).

Os valores negativos indicam pressões de sucção ou seja, pressões perpendiculares à superfície com direção oposta ao do elemento, enquanto os valores positivos indicam pressões de compressão na superfície seguindo a convenção de sinais da norma EN 1991.

Numa primeira análise verifica-se que o antigo regulamento português RSAEEP não dá tanta importância à fachada de incidência direta do vento (região *A*), dando mais relevância

aos efeitos de sucção nas restantes superfícies verticais. Por outro lado, a cobertura (zonas *E-F* e *G-H*) é, marcadamente, uma zona crítica para este regulamento, obtendo-se, numa relação com as duas outras normas em análise, quase o triplo da pressão de sucção na porção *E-F* da cobertura.

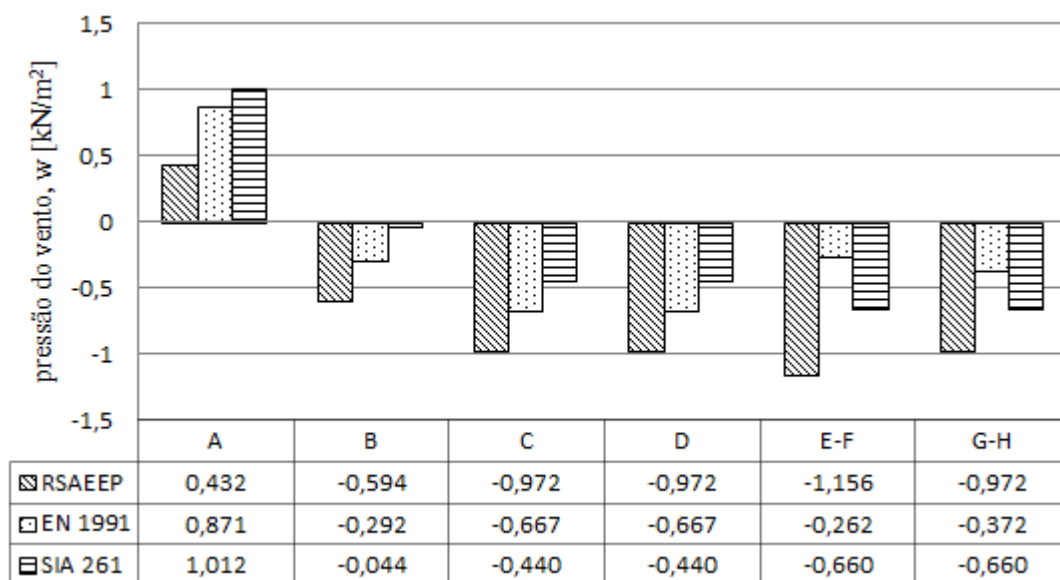


Gráfico 6 – Comparação dos valores de pressão do vento para a direção de 0 graus

A norma SIA 261 apresenta valores de pressão superiores em cerca de 40% relativamente à norma EN 1991, o que representa uma ligeira preocupação relativamente à ação do vento na fachada incidente mas que poderá facilmente ser justificado pelo facto da SIA 261 não utilizar os coeficientes de segurança para as ações concomitantes, o que levará a aproximar-se da EN 1991 após uma combinação de ação. Na fachada a sotavento, verifica-se uma desconsideração da ação do vento por parte da SIA 261, apresentando valores quase nulos.

De uma forma geral, verifica-se que a EN 1991 apresenta valores de pressões intermédios nas diferentes superfícies, enquanto a dispersão evidenciada pelo RSAEEP conduz a valores exagerados, ou insuficientes como é o caso da fachada de incidência direta do vento.

Apresenta-se, no Gráfico 7 referente à direção de incidência perpendicular à fachada *C* (vento a 90°), o quadro resumo para uma análise global da pressão do vento nas diferentes zonas de ação.

Da análise ao Gráfico 7 resulta poder-se desde já referir que a norma EN 1991 apresenta valores intermédios para as pressões do vento sobre as superfícies verticais,

mantendo a tendência já descrita para o caso do ângulo de incidência do vento a 0° (Gráfico 6). Quanto à cobertura, a SIA 261 opta por dar maior importância à metade da cobertura mais próxima da incidência do vento, na zona *E-G*, e desvaloriza a restante zona *F-H*. A abordagem da norma EN 1991 segue um princípio semelhante ao solicitar parte da cobertura *E-G* mas não subestima a restante metade diminuindo o valor de pressão a considerar na cobertura cerca de 50,6%, enquanto, na SIA 261, a diferença entre as pressões do vento nas duas metades é de cerca de 10 vezes. Ainda numa análise das diferentes zonas da cobertura, conclui-se que a norma europeia EN 1991 não a considera como uma zona crítica atribuindo valores de pressão superiores para as fachadas, como se aferiu no Gráfico 6.

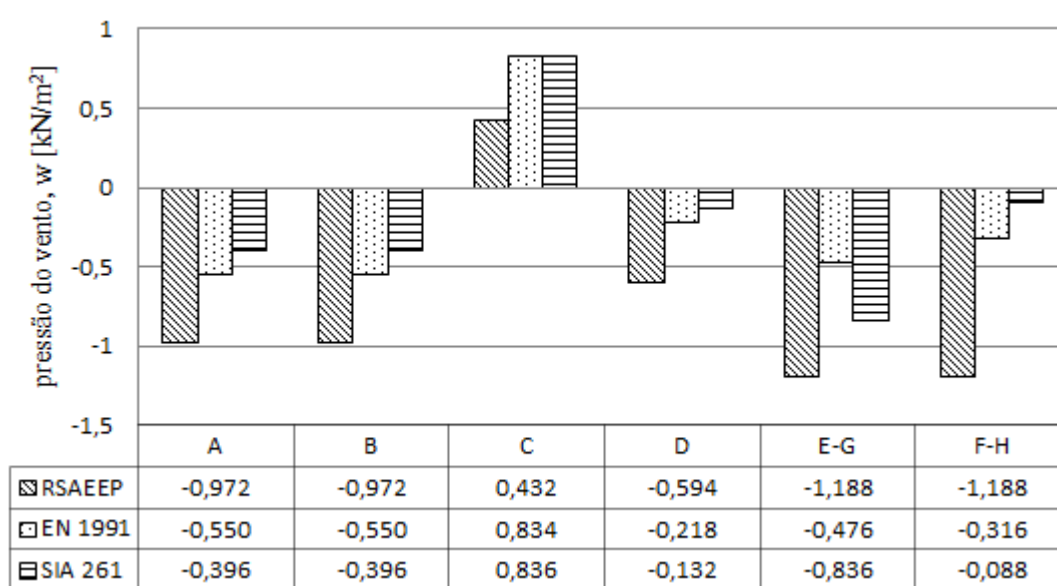


Gráfico 7 – Comparação dos valores de pressão do vento para a direção de 90 graus

Relativamente ao antigo regulamento português RSAEEP, verifica-se novamente uma considerável discrepância em relação às restantes normas, o que pode indicar que o regulamento substituído veio refinar os valores de pressão do vento reduzindo um eventual sobredimensionamento.

Em suma, a norma EN 1991 apresenta tipicamente valores intermédios entre o antigo regulamento RSAEEP e a norma SIA 261. Após a combinação das ações, os valores de pressão do vento determinados pela norma suíça poderão apontar para valores semelhantes aos obtidos pela EN 1991, uma vez que a ação do vento em combinação com outras ações, em que este seja uma das ações acompanhantes, não é majorada por um coeficiente de segurança como acontece com a EN 1991.

Capítulo 6 – Caso de Estudo

6.1 – Considerações iniciais

O caso de estudo aplicado a um exemplo real é feito neste capítulo (ver anexo A). O estudo consiste na quantificação das ações do vento, da neve e das sobrecargas de utilização para um edifício habitacional com 5 andares e 1 andar comercial situado no rés-do-chão. Abaixo da cota térrea, existem dois andares destinados a estacionamento e zona de arrumos. Os equipamentos afetos ao edifício encontram-se localizados no desvão da cobertura do mesmo. O conjunto habitacional é constituído por dois edifícios separados por junta estrutural. O edifício objeto do presente estudo, que apresenta aproximadamente 21 m acima da cota térrea, 25 m de comprimento e 16 m de largura, está assinalado pela cor laranja na Figura 17. O sistema estrutural será em lajes vigadas.

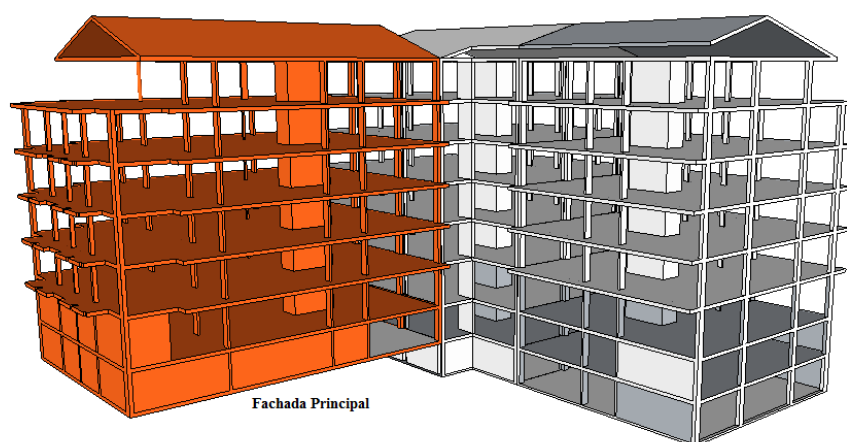


Figura 17 – Representação tridimensional do edifício

Para efeito do presente estudo, o edifício será implantado nas cidades de Bragança e de Lausanne, obedecendo às normas de base de projeto e de quantificação das ações, EN 1990 e EN 1991, no primeiro caso, e às normas homólogas SIA 260 e SIA 261 no segundo. A altitude de projeto é de 600 m para ambos os casos.

Inicia-se o estudo pela quantificação das diferentes ações a considerar para o edifício representado na Figura 17. São estabelecidas comparações diretas entre os dois conjuntos

normativos de forma a verificar a intervenção de cada parâmetro na quantificação da ação, apontando ainda as analogias entre ambas as formulações.

6.2 – Comparação da ação da sobrecarga de utilização segundo a EN 1991 e a norma suíça SIA 261

Na Tabela 20 é apresentada uma comparação do processo de quantificação da sobrecarga de utilização, assim como os parâmetros intervenientes em ambas as normas.

Tabela 20 – Análise comparativa do processo de quantificação da sobrecarga de utilização

q_k [kN/m ²]		
Procedimento	EN 1991	SIA 261
1º Passo – Delimitar a zona destinada a atividades domésticas e residenciais.	Pavimentos: 2,0 Varandas: O valor utilizado ^j foi de 5,0 Escadas: O valor utilizado ^k foi de 3,0	Pavimentos: 2,0 Varandas: 3,0 Escadas: 4,0
2º Passo – Delimitar a zona destinada a atividades comerciais.	Zonas de lojas em geral: 4,0	Zonas de lojas em geral: 5,0
3º Passo – Delimitar zona destinada a estacionamento e circulação de veículos.	Peso bruto do veículo ≤ 30 kN: 2,5	Peso bruto do veículo ≤ 30 kN: 2,0
4º Passo – Delimitar a categoria de cobertura.	Cobertura não acessível: 0,4	Cobertura não acessível: 0,4

^j Deve ser adotada uma sobrecarga uniformemente distribuída idêntica à do pavimento adjacente, com um mínimo de 5,0 kN/m² numa faixa de 1 m de largura adjacente ao parapeito.

^k Deve ser adotada uma sobrecarga uniformemente distribuída idêntica à do pavimento adjacente, com um mínimo de 3,0 kN/m².

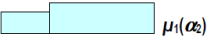

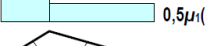
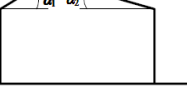
6.3 – Comparação da ação da neve segundo a EN 1991 e a norma suíça SIA 261

Na Tabela 21 é apresentada a análise comparativa do processo de quantificação da ação da neve para a norma EN 1991 e para a norma SIA 261.

Tabela 21 – Análise comparativa do processo de quantificação da ação da neve

Procedimento	EN 1991	SIA 261
1º Passo – Definir o tipo de exposição topográfica, C_e .	Topografia normal: 1,0	Topografia normal: 1,0
2º Passo – Definir o coeficiente térmico da cobertura, C_t .	Transmissão térmica normal: 1,0	Transmissão térmica normal: 1,0
3º Passo – Definir a forma da cobertura e retirar o coeficiente de forma, μ , em função do ângulo da inclinação da vertente, α .	Ângulo de inclinação da vertente: $\alpha = 19^\circ$ $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ $\mu_1 = 0,8$	Ângulo de inclinação da vertente: $\alpha = 19^\circ$ $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ $\mu_1 = 0,8$
4º Passo – Definir a zona em que está localizada a estrutura e retirar o coeficiente dependente da zona, C_z .	Zona Z₂ (Bragança): $C_z = 0,20$	Zona Azul (Lausanne): $h_0 = A - 200$ Parâmetro de redução da altitude, h_0 .
5º Passo – Em função da altitude do local, A , determinar o valor característico da carga ao nível do solo, s_k .	Altitude do local: $A = 600 \text{ m}$ Valor característico da carga ao nível do solo: $s_k = C_z [1 + (A/500)^2]$ $s_k = 0,20 \times [1 + (600/500)^2]$ $s_k = 0,488 \text{ [kN/m}^2\text{]}$	Altitude do local: $h_0 = 600 - 200 = 400 \text{ m}$ Valor característico da carga ao nível do solo: $s_k = [1 + (h_0/350)^2 \times 0,4 \geq 0,9]$ $s_k = [1 + (400/350)^2 \times 0,4 \geq 0,9]$ $s_k = 0,92 \geq 0,90 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Tabela 21 – Análise comparativa do processo de quantificação da ação da neve (continuação)

Procedimento	EN 1991	SIA 261
<p>6º Passo – Definir a situação de projeto e disposição de carga em função das condições locais.</p> <p>Caso (i) $\mu_1(\alpha_1)$  $\mu_1(\alpha_2)$</p> <p>Caso (ii) $0,5\mu_1(\alpha_1)$  $\mu_1(\alpha_2)$</p> <p>Caso (iii) $\mu_1(\alpha_1)$  $0,5\mu_1(\alpha_2)$</p> 	<p>Sem neve como ação de acidente (situações de projeto persistente/transitórias):</p> <p>Não deslocada (caso i)</p> $s = \mu_1 C_e C_t s_k$ $s = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 0,488$ $s = 0,39 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ <p>Deslocada (caso ii e caso iii)</p> $s = \mu_1 C_e C_t s_k$ $s = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 0,488$ $s = 0,39 \text{ [kN/m}^2\text{]}$	<p>Existe apenas a situação de normal de queda de neve:</p> <p>Não deslocada (caso i)</p> $s = \mu_1 C_e C_t s_k$ $s = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 0,92$ $s = 0,74 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ <p>Deslocada (caso ii e caso iii)</p> $s = \mu_1 C_e C_t s_k$ $s = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 0,92$ $s = 0,74 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

6.4 – Comparação da ação do vento segundo a EN 1991 e a norma suíça SIA 261

É apresentada, na Tabela 22, uma análise comparativa do processo de quantificação da ação do vento para a norma EN 1991 e SIA 261.

Tabela 22 – Análise comparativa do processo de quantificação da ação do vento

Procedimento	EN 1991	SIA 261
1º Passo – Determinar o valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$.	Zona B: $v_{b,0} = 30 [m/s]$	
2º Passo – Definir o coeficiente de sazão, c_{season} assim como o coeficiente de direção do vento, c_{dir} .	Coefficientes recomendados $c_{season} = 1,0$ $c_z = 1,0$	
3º Passo – Calcular o valor de referência da velocidade do vento, v_b em função dos parâmetros anteriores.	Valor de referência da velocidade do vento, v_b: $v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0}$ $v_b = 30 [m/s]$	
4º Passo – Definir a categoria do terreno e respectivos parâmetros.	Categoria do terreno Categoria IV Comprimento de rugosidade $z_0 = 1,0 [m]$ Altura mínima $z_{min} = 15 [m]$ Coefficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade z_0 $k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$ $k_r = 0,19 \left(\frac{1,0}{0,05} \right)^{0,07}$ $k_r = 0,234$	Categoria do terreno Categoria IV Altura do gradiente $z_g = 526 [m]$ Rugosidade do solo $\alpha_r = 0,30$

Tabela 22 – Análise comparativa do processo de quantificação da ação do vento (continuação)

Procedimento	EN 1991	SIA 261
<p>5º Passo – Determinar o coeficiente de orografia, $c_o(z)$, e o coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, em função da altura do edifício, z.</p> <p>NOTA: Pela SIA 261, o valor básico da velocidade do vento, $v_{b,0}$, assim como os valores da velocidade do vento v_b e da velocidade média do vento, v_m estão quantificados na expressão do coeficiente de repartição do vento de forma indireta.</p>	<p>Coeficiente de orografia</p> $C_0(z) = 1,0 \text{ (recomendado)}$ <p>Coeficiente de rugosidade para $z_{min} \leq z \leq z_{max}$</p> $c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ $c_r(z) = 0,234 \times \ln\left(\frac{21}{1,0}\right)$ $c_r(z) = 0,712$	<p>Coeficiente de repartição do vento</p> $c_h = 1,6 \left[\left(\frac{z}{z_g} \right)^{\alpha_r} + 0,375 \right]^2$ $c_h = 1,6 \left[\left(\frac{21}{526} \right)^{0,30} + 0,375 \right]^2$ $c_h = 0,913$
<p>6º Passo – Calcular o valor da velocidade média do vento em função da altura do edifício, z.</p>	<p>$z = 21 \text{ m}$</p> $v_m(z) = c_r(z) c_o(z) v_b$ $v_m(z) = 0,712 \times 1,0 \times 30$ $v_m(z) = 21,37 \text{ m/s}$	
<p>7º Passo – Determinar o desvio padrão da turbulência σ_v.</p>	<p>Coeficiente de turbulência</p> $k_I = 1,0 \text{ (recomendado)}$ <p>Desvio padrão da turbulência</p> $\sigma_v = k_r v_b k_I$ $\sigma_v = 0,234 \times 30 \times 1,0$ $\sigma_v = 7,02$	
<p>8º Passo – Calcular a intensidade de turbulência em função da altura do edifício, z.</p>	<p>Para $z_{min} \leq z \leq z_{max}$</p> $I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)}$ $I_v(z) = \frac{7,02}{21,37}$ $I_v(z) = 0,328$	<p>A norma suíça propõe a utilização de um valor de referência da pressão dinâmica em função da localização da estrutura.</p> <p>Zona amarela (ver Figura 14):</p> $q_{p0} = 0,9 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Tabela 22 – Análise comparativa do processo de quantificação da ação do vento (continuação)

Procedimento	EN 1991	SIA 261
9º Passo – Determinar a pressão dinâmica de pico em função da altura do edifício, z .	$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z)$ $q_p(z) = [1 + 7 \times 0,328] \times \frac{1}{2} \times 1,25 \times 21,37^2$ $q_p(z) = 940,75 \text{ N/m}^2$ $q_p(z) = 0,941 \text{ kN/m}^2$	$q_p = c_h q_{p0}$ $q_p = 0,913 \times 0,9$ $q_p = 0,822 \text{ kN/m}^2$
10º Passo – Determinar os coeficientes de pressão exterior, c_{pe} , para as fachadas e coberturas pelas tabelas disponíveis nas normas, para o ângulo de inclinação da vertente $\alpha=19^\circ$. A direção do vento é perpendicular à fachada principal, fachada D , quando $\theta = 0^\circ$ (ver Figura 17).	<p>Fachadas</p> <p>Direção do vento $\theta = 0^\circ$</p> <p>Zona D $c_{pe} = 0,800$</p> <p>Zona E $c_{pe} = -0,516$</p> <p>Zona A $c_{pe} = -1,200$</p> <p>Zona B $c_{pe} = -0,800$</p> <p>Direção do vento $\theta = 90^\circ$</p> <p>Zona D $c_{pe} = 0,779$</p> <p>Zona E $c_{pe} = -0,457$</p> <p>Zona A $c_{pe} = -1,200$</p> <p>Zona B $c_{pe} = -0,800$</p> <p>Zona C $c_{pe} = -0,500$</p>	<p>Fachadas</p> <p>Direção do vento $\theta = 0^\circ$</p> <p>Zona A $c_{pe} = 0,800$</p> <p>Zona B $c_{pe} = -0,400$</p> <p>Zona C $c_{pe} = -0,850$</p> <p>Zona D $c_{pe} = -0,850$</p> <p>Direção do vento $\theta = 90^\circ$</p> <p>Zona A $c_{pe} = -0,550$</p> <p>Zona B $c_{pe} = -0,550$</p> <p>Zona C $c_{pe} = 0,850$</p> <p>Zona D $c_{pe} = -0,250$</p>
	<p>Coberturas</p> <p>Direção do vento $\theta = 0^\circ$</p> <p>Zona F $c_{pe} = -0,790$</p> <p>Zona G $c_{pe} = -0,720$</p> <p>Zona H $c_{pe} = -0,270$</p> <p>Zona I $c_{pe} = -0,400$</p> <p>Zona J $c_{pe} = -0,870$</p> <p>Direção do vento $\theta = 90^\circ$</p> <p>Zona F $c_{pe} = -1,250$</p> <p>Zona G $c_{pe} = -1,330$</p> <p>Zona H $c_{pe} = -0,650$</p> <p>Zona I $c_{pe} = -0,500$</p>	<p>Coberturas</p> <p>Direção do vento $\theta = 0^\circ$</p> <p>Zona E $c_{pe} = -1,100$</p> <p>Zona F $c_{pe} = -1,100$</p> <p>Zona G $c_{pe} = -0,500$</p> <p>Zona H $c_{pe} = -0,500$</p> <p>Direção do vento $\theta = 90^\circ$</p> <p>Zona E $c_{pe} = -1,050$</p> <p>Zona F $c_{pe} = -0,200$</p> <p>Zona G $c_{pe} = -1,050$</p> <p>Zona H $c_{pe} = -0,200$</p>

Tabela 22 – Análise comparativa do processo de quantificação da ação do vento (continuação)

Procedimento	EN 1991	SIA 261
<p>11º Passo – Determinar a pressão exercida nos diferentes paramentos exteriores.</p>	$w_e = q_p(z) c_{pe}$ Fachadas Direção do vento $\theta = 0^\circ$ Zona D $w_e = 0,756$ Zona E $w_e = -0,487$ Zona A $w_e = -1,133$ Zona B $w_e = -0,756$ Direção do vento $\theta = 90^\circ$ Zona D $w_e = 0,735$ Zona E $w_e = -0,432$ Zona A $w_e = -1,133$ Zona B $w_e = -0,756$ Zona C $w_e = -0,472$	$w_e = q_p c_{pe}$ Fachadas Direção do vento $\theta = 0^\circ$ Zona A $w_e = 0,658$ Zona B $w_e = -0,329$ Zona C $w_e = -0,699$ Zona D $w_e = -0,699$ Direção do vento $\theta = 90^\circ$ Zona A $w_e = -0,452$ Zona B $w_e = -0,452$ Zona C $w_e = 0,699$ Zona D $w_e = -0,206$
	$w_e = q_p(z) c_{pe}$ Coberturas Direção do vento $\theta = 0^\circ$ Zona F $w_e = -0,800$ Zona G $w_e = -0,718$ Zona H $w_e = -0,271$ Zona I $w_e = -0,378$ Zona J $w_e = -0,882$ Direção do vento $\theta = 90^\circ$ Zona F $w_e = -1,203$ Zona G $w_e = -1,241$ Zona H $w_e = -0,592$ Zona I $w_e = -0,472$	$w_e = q_p c_{pe}$ Coberturas Direção do vento $\theta = 0^\circ$ Zona E $w_e = -0,904$ Zona F $w_e = -0,904$ Zona G $w_e = -0,411$ Zona H $w_e = -0,411$ Direção do vento $\theta = 90^\circ$ Zona E $w_e = -0,863$ Zona F $w_e = -0,165$ Zona G $w_e = -0,863$ Zona H $w_e = -0,165$

Tabela 22 – Análise comparativa do processo de quantificação da ação do vento (continuação)

Procedimento	EN 1991	SIA 261
<p>12º Passo – Estudo da permeabilidade das fachadas.</p>	<p>Não existe nenhuma face predominante:</p> $\mu = \frac{\sum \text{área das aberturas em que } c_{pe} \text{ é negativo ou } -0,0}{\sum \text{área de todas as aberturas}}$ $\mu = \frac{1197}{1722}$ $\mu = 0,695$	<p>Não existe nenhuma face predominante:</p> <p>Pressão repartida pelas superfícies interiores</p> <p>Direção do vento $\theta = 0^\circ$</p> $c_{pi} = -0,35$ <p>Direção do vento $\theta = 90^\circ$</p> $c_{pi} = \pm 0,10$
<p>13º Passo - Determinar os coeficientes de pressão interior, c_{pi}, para as fachadas e coberturas.</p>	<p>Retirar o valor de c_{pi} do gráfico:</p> <p>$c_{pi} = -0,151$</p>	<p>O valor de c_{pi} é obtido diretamente pela tabela.</p>
<p>14º Passo - Determinar a pressão exercida nas diferentes superfícies interiores.</p> <p>NOTA: Como o coeficiente de pressão interior é igual para todas as superfícies, a pressão interior exercida será igual para todos os elementos:</p>	<p>Coefficiente de pressão interior</p> $w_i = q_p(z) c_{pi}$ $w_i = 0,941 \times (-0,151)$ $w_i = -0,142$	<p>Coefficiente de pressão interior</p> $w_i = q_p(z) c_{pi}$ <p>Direção do vento $\theta = 0^\circ$</p> $w_i = 0,9 \times -0,35$ $w_i = -0,315$ <p>Direção do vento $\theta = 90^\circ$</p> $w_i = 0,9 \cdot \pm 0,100$ $w_i = \pm 0,090$

Tabela 22 – Análise comparativa do processo de quantificação da ação do vento (continuação)

Procedimento	EN 1991	SIA 261
<p>15º Passo – Obter a resultante da soma não algébrica dos valores de pressão interior e exterior nas várias superfícies.</p> $w = w_e + w_i$	<p>Fachadas</p> <p>Direção do vento $\theta = 0^\circ$</p> <p>Zona <i>D</i> $w = 0,898$</p> <p>Zona <i>E</i> $w = -0,345$</p> <p>Zona <i>A</i> $w = -0,991$</p> <p>Zona <i>B</i> $w = -0,613$</p> <p>Direção do vento $\theta = 90^\circ$</p> <p>Zona <i>D</i> $w = 0,817$</p> <p>Zona <i>E</i> $w = -0,270$</p> <p>Zona <i>A</i> $w = -0,922$</p> <p>Zona <i>B</i> $w = -0,570$</p> <p>Zona <i>C</i> $w = -0,307$</p>	<p>Fachadas</p> <p>Direção do vento $\theta = 0^\circ$</p> <p>Zona <i>A</i> $w = 0,973$</p> <p>Zona <i>B</i> $w = -0,014$</p> <p>Zona <i>C</i> $w = -0,384$</p> <p>Zona <i>D</i> $w = -0,384$</p> <p>Direção do vento $\theta = 90^\circ$</p> <p>Zona <i>A</i> $w = -0,542$</p> <p>Zona <i>B</i> $w = -0,542$</p> <p>Zona <i>C</i> $w = 0,789$</p> <p>Zona <i>D</i> $w = -0,296$</p>
	<p>Coberturas</p> <p>Direção do vento $\theta = 0^\circ$</p> <p>Zona <i>F</i> $w = -0,657$</p> <p>Zona <i>G</i> $w = -0,576$</p> <p>Zona <i>H</i> $w = -0,129$</p> <p>Zona <i>I</i> $w = -0,236$</p> <p>Zona <i>J</i> $w = -0,739$</p> <p>Direção do vento $\theta = 90^\circ$</p> <p>Zona <i>F</i> $w = -1,060$</p> <p>Zona <i>G</i> $w = -1,098$</p> <p>Zona <i>H</i> $w = -0,450$</p> <p>Zona <i>I</i> $w = -0,330$</p>	<p>Coberturas</p> <p>Direção do vento $\theta = 0^\circ$</p> <p>Zona <i>E</i> $w = -0,589$</p> <p>Zona <i>F</i> $w = -0,589$</p> <p>Zona <i>G</i> $w = -0,096$</p> <p>Zona <i>H</i> $w = -0,096$</p> <p>Direção do vento $\theta = 90^\circ$</p> <p>Zona <i>E</i> $w = -0,953$</p> <p>Zona <i>F</i> $w = -0,255$</p> <p>Zona <i>G</i> $w = -0,953$</p> <p>Zona <i>H</i> $w = -0,255$</p>

6.5 – Aplicação das diferentes normas – análise estrutural comparativa

Conduz-se, neste subcapítulo, a análise estrutural comparativa de um edifício com recurso ao *software* avançado de simulação estrutural SAP2000® [13].

6.5.1 – Geometria

O primeiro passo para a construção do modelo numérico em 3D consistiu no pré-dimensionamento dos diferentes elementos (pilares, vigas, lajes, caixa de elevadores, lajes de escada, elementos rígidos e muros de suporte (ver anexo B). Assim, as secções de base consideradas são 0,30×0,30 m para os pilares em todos os pisos, vigas de 0,30×0,20 m embebidas nas lajes, e lajes maciças de betão armado com a espessura de 20 cm [14]. Foram especificadas as espessuras de 20 cm para a laje de escada e de 30 cm para os muros de suporte de terras. Foram colocados elementos rígidos verticais (paredes) em três pontos do edifício (ver anexo B) de forma a conferir rigidez à estrutura. Os elementos inicialmente considerados foram de 0,75×0,30 m na análise utilizando a norma EN 1991, e reduzidos para 0,70×0,30 m para a modelação de acordo com a norma SIA 261. Foram ainda colocadas paredes rígidas com 30 cm de espessura formando a caixa de escada, e vigas auxiliares para o encastramento dos patamares de escada nos vários pisos. Procedeu-se à redução da rigidez dos núcleos de betão armado devido aos efeitos de retração, fluência e fissuração. Para tal, diminuiu-se em 20% o módulo de elasticidade do betão nos elementos rígidos (paredes sísmicas), assim como na caixa de elevadores e muros de suporte.

Concluída a análise inicial, em que as ações foram introduzidas no modelo tridimensional com base nas normas europeias, procedeu-se a um estudo de forma a otimizar as secções transversais de acordo com critérios de economia (material) e desempenho (ductilidade) estruturais, no respeito da segurança estrutural em ELU. Verificou-se a necessidade de tornar algumas vigas salientes em relação à laje, motivo este causado por grandes vãos, cargas elevadas como é o caso da sobrecarga de utilização nas lajes de comércio, e por problemas de esforço transversal devido aos apoios de alguns pilares de cobertura sobre estas. Efetuou-se também um escalonamento das secções transversais dos pilares, diminuindo a secção em altura à medida que esta assegura a estabilidade estrutural em ELU.

Seguidamente, levou-se a cabo uma nova análise estrutural assente nas normas suíças tomando como ponto de partida a solução estrutural final obtida na análise acima descrita. Detetou-se a possibilidade de reduzir as secções transversais dos elementos em algumas zonas (Ver anexo B).

6.5.2 – Ações

Modelada a estrutura tridimensional, foram aplicadas as ações previstas por cada norma de forma a obter-se o comportamento estrutural.

O *software* SAP2000[®] quantifica automaticamente o peso próprio dos diferentes elementos estruturais do modelo na solicitação do edifício. Foram considerados valores de cargas permanentes adicionais de 0,5 kN/m² para efeitos de revestimento das lajes de habitação e varandas, e de 0,3 kN/m² para revestimento de lajes de garagem, escadas e pavimento comercial. Foram também quantificadas as cargas das fachadas com uma carga uniformemente distribuída de 2,8 kN/m, de face, aplicada na projeção dos diferentes troços das paredes de fachada, assim como o peso das paredes interiores, distribuído uniformemente por todas as lajes, com o valor de 1,2 kN/m².

As restantes ações consideradas foram as ações estudadas ao longo do presente trabalho, ao que acresce o impulso do solo, como se mostra:

- sobrecarga de utilização;
- ação da neve;
- ação do vento.

Os valores das ações utilizados no modelo tridimensional foram obtidos por simulação através das folhas de cálculos elaboradas no âmbito do presente trabalho, e estão descritos nas tabelas dos subcapítulos anteriores (3.5, 4.4 e 5.4).

Para a sobrecarga de utilização foram aplicadas cargas uniformemente distribuídas, perpendiculares ao plano das lajes, com sentido gravítico (ver Tabela 20).

Relativamente à ação da neve, levou-se em consideração o seguinte: para a parte plana da cobertura foi utilizado o valor da carga de neve ao nível do solo, uma vez que este local não é afetado pelo deslizamento da neve, permanecendo a neve por mais tempo, enquanto em

relação à cobertura inclinada foram utilizados os valores afetados do efeito de deslizamento da neve, dando cumprimento aos regulamentos.

A quantificação da ação do vento foi feita, por via indireta, encaminhando as pressões das paredes para os pilares uma vez que as paredes divisórias e de fachada¹ não foram incluídas na modelação. Este procedimento traduziu-se multiplicando a largura da zona de influência pelo valor da pressão do vento na superfície, concentrando as ações ao nível dos elementos verticais sob a forma de cargas lineares uniformemente distribuídas. Para a cobertura, foi introduzida a ação do vento como uma pressão normal de sucção em toda a superfície em conformidade com os valores obtidos na quantificação da ação do vento, respeitando as convenções de sinais recomendadas nas normas.

6.5.3 – Combinações de ações

Aplicadas as ações à estrutura, foi elaborado um mapa de combinações de ações de forma a varrer o leque de solicitações verosímeis a que o edifício poderá vir a estar sujeito. Foi também incluída uma combinação do tipo “envelope” contendo todas as combinações de ações, de forma a obter uma envolvente dos esforços máximos e mínimos, sintetizando os resultados. Para as combinações de ações em estado limite último (ELU) e para ambas as análises (EN e SIA), são utilizados os coeficientes parciais de segurança relativos a combinações do tipo 2, sendo o coeficiente parcial de segurança para as ações permanentes $\gamma_G = 1,35$ e o coeficiente parcial de segurança para as ações variáveis $\gamma_Q = 1,50$. Ainda, foram verificados os estados limites de utilização (ELS) estabelecendo as combinações frequentes e quase-permanentes regulamentares para ambas as normas.

6.5.4 – Resultados

Inicia-se a comparação entre as duas normas analisadas neste capítulo em termos do conceito de corte basal, que constitui um indicador compacto para a comparação global do valor dos efeitos das ações para ambas as normas analisadas. As reações verticais obtidas em cada uma das duas simulações são também comparadas.

¹ Contudo, o seu peso foi automaticamente considerado pelo *software* na introdução das ações permanentes.

Na Tabela 23 são apresentados os valores máximos e mínimos dos esforços de base (corte basal) obtidos para as normas EN e SIA. Inclui-se, para mais fácil análise, a comparação, sob a forma de variação percentual, entre os resultados obtidos pela SIA e os valores obtidos pela norma EN.

Tabela 23 – Corte basal para o modelo tridimensional segundo ambas as normas

[kN]			EN 1991	SIA 261	Diferença [%]
Corte basal	F_x	máx.	5213	5194	-0,4
		mín.	3037	3199	5,3
	F_y	máx.	6668	6550	-1,8
		mín.	4801	4782	-0,4
Reações verticais	F_z	máx.	88767	88214	-0,6
		mín.	56914	56895	0,0

Verifica-se que os valores do corte basal obtidos segundo os dois regulamentos são muito próximos, diferindo apenas com percentagens entre -0,6 a 0, exceto em dois casos. Com cerca de -1,8%, verifica-se uma maior força horizontal para a ação na direção y que se fica a dever ao facto dos valores da ação do vento obtidos pela EN 1991 serem superiores aos valores da mesma ação obtidos pela SIA 261 (como se pode comprovar no 15º passo da Tabela 22. Quanto à força horizontal obtida para a direção x, sendo a diferença entre as normas de 5,3%, poderá indicar uma influência da cobertura no comportamento da estrutura para a envolvente mínima de esforços.

A partir destes indicadores, conclui-se que o esforço de base segundo ambos os regulamentos para o modelo proposto foi praticamente idêntico, variando muito pouco para que se possam alterar as secções da base do modelo tridimensional. Estes valores constituem um bom indicador da semelhança, em termos globais, entre os dois regulamentos. Embora existam aparentes diferenças nos valores das ações aplicadas à estrutura, e na diferente abordagem na combinação de ação, os resultados finais obtidos convergem para soluções idênticas.

Como foi verificado anteriormente, a norma SIA 261 não adota a utilização de coeficientes parciais de segurança associados às ações concomitantes nas combinações de ações em ELU, mas compensa a falta destes adotando valores de ações ligeiramente superiores aos da EN 1991, o que conduziu à obtenção de secções transversais

maioritariamente idênticas, existindo mesmo, em alguns pontos a possibilidade de uma diminuição de secção dos elementos estruturais, por parte da SIA 261, que foi contemplada (ver anexo B).

Relativamente às reações verticais pode afirmar-se que os resultados não diferem significativamente.

Para o estudo dos deslocamentos, considerando-se uma combinação quase-permanente em ELS, foi escolhido um pórtico que interjeta a caixa de elevador, e monitorizados os deslocamentos de 3 pontos, como se indica na Figura 18. Na Tabela 24 são apresentados os deslocamentos nas várias direções para ambas as normas.

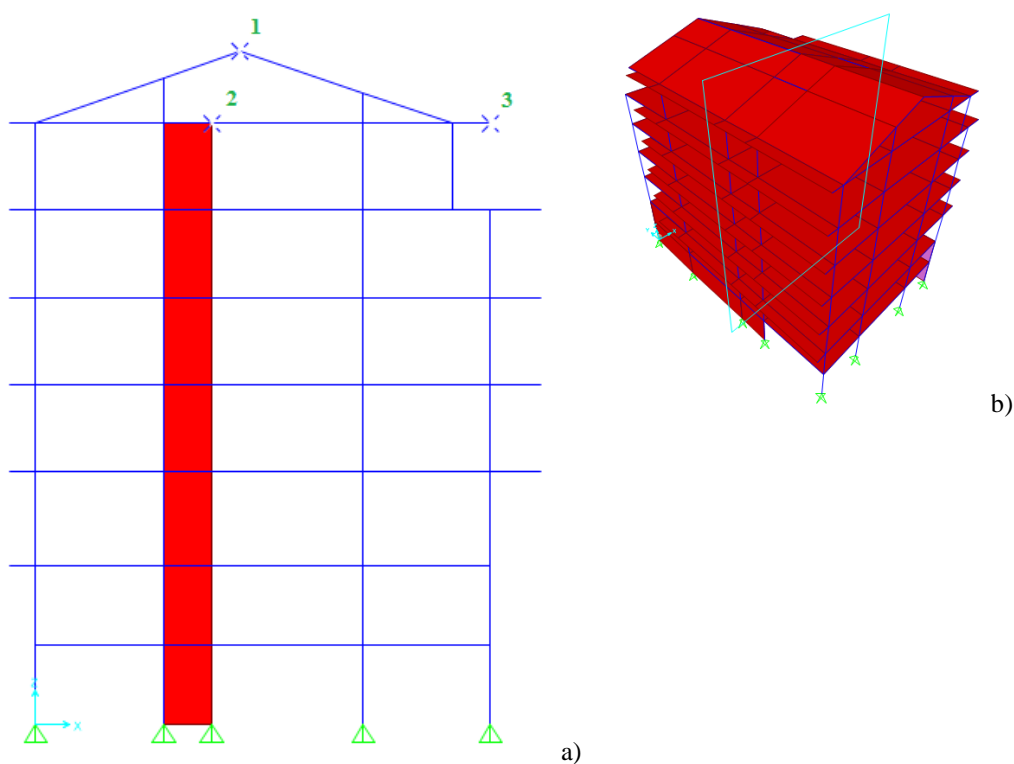


Figura 18 – a) Pontos de análise dos deslocamentos em ELS, b) localização do pórtico em estudo

Pela análise da Figura 19 é possível verificar diferenças nas deformadas dos elementos para ambas as normas. Numa análise visual qualitativa verificam-se deformadas horizontal e vertical mais importantes para a norma SIA 261.

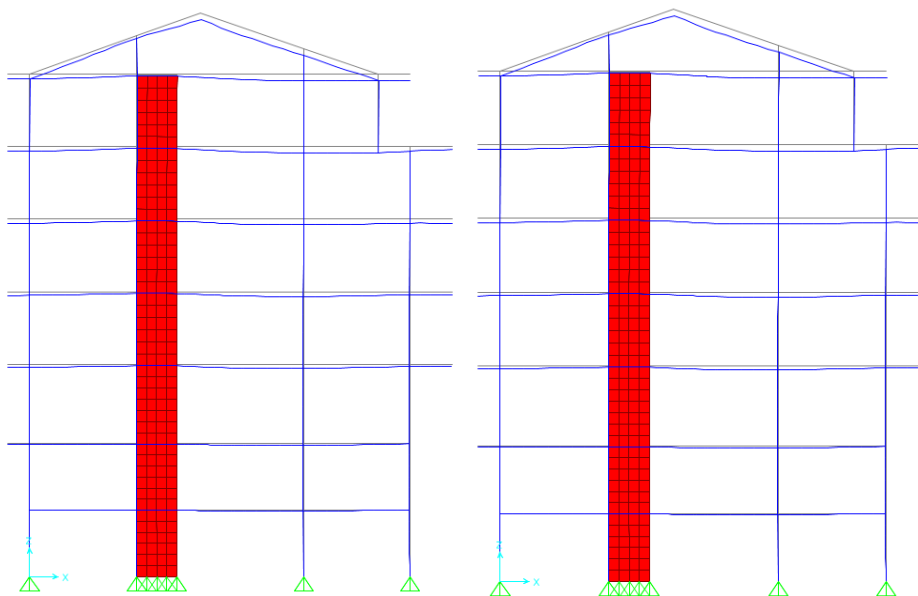


Figura 19 – Deformada em ELS para as normas EN 1991 (esquerda) e SIA 261 (direita)

Na Tabela 24 são apresentados os valores dos deslocamentos referentes aos 3 pontos de comparação indicados na Figura 18.

Tabela 24 – Deslocamentos (ELS) nos pontos em análise para as normas EN 1991 e SIA 261

Deslocamento [mm]		EN 1991	SIA 261	Varição [%]
1	u_x	0,9	1,0	11,1
	u_y	1,1	1,2	9,1
	u_z	-6,5	-6,5	0,0
2	u_x	0,5	0,6	20,0
	u_y	0,8	0,8	0,0
	u_z	-2,4	-2,4	0,0
3	u_x	0,6	0,7	16,7
	u_y	0,5	0,4	-25
	u_z	-6,8	-6,9	1,5

As diferenças mais significativas registam-se nos deslocamentos na direção x para os três pontos observados. A justificação encontra-se no facto de os valores das ações horizontais associadas ao vento serem superiores à luz da norma suíça quando comparados com a norma EN 1991.

Resulta ainda desta análise que a deformação vertical é globalmente superior na simulação com recurso à norma suíça relativamente aos valores obtidos pela norma EN 1991.

Numa análise geral, conclui-se que a estrutura se deforma mais para as ações calculadas segundo a norma SIA 261, verificando-se uma deformação vertical maior devida à quantificação da neve, uma vez que as sobrecargas de utilização são idênticas na cobertura em ambos os regulamentos.

Seguidamente, recorre-se ao mesmo pórtico para analisar a rotação nos apoios, no plano indicado na Figura 20, obtendo-se os valores indicados na Tabela 25.

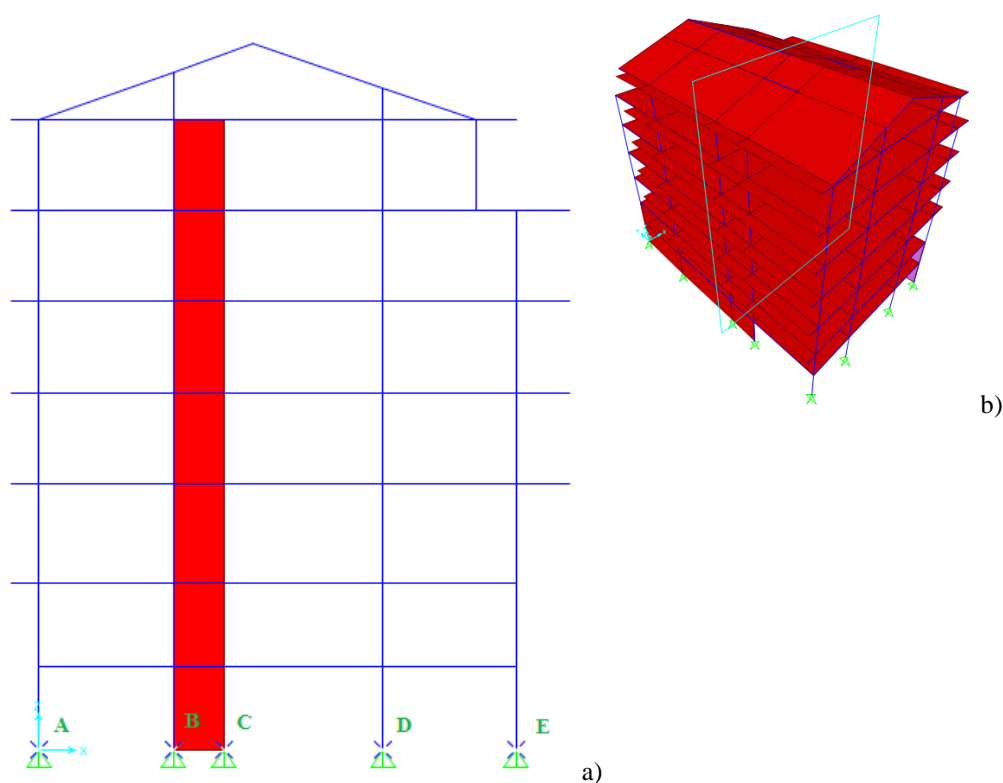


Figura 20 – a) Pontos de análise das rotações, b) localização do pórtico em estudo

Tabela 25 – Rotação dos pontos em análise para as normas EN 1991 e SIA 261

Rotação [rad.×10 ⁵]		EN 1991	SIA 261	Variação [%]
A	r_x	-0,79	-0,80	1,3
	r_y	2,00	2,00	0,0
	r_z	-0,62	-0,62	0,0
B	r_x	-2,00	-2,00	0,0
	r_y	-14,0	-14,0	0,0
	r_z	-0,31	-0,30	-3,3
C	r_x	6,00	6,00	0,0
	r_y	-4,00	-4,00	0,0
	r_z	-0,34	-0,34	0,0
D	r_x	46,00	45,00	-2,2
	r_y	-10,00	-10,00	0,0
	r_z	-6,00	-7,00	16,7
E	r_x	3,00	3,00	0,0
	r_y	-65,00	-65,00	0,0
	r_z	-0,30	-0,29	-3,4

Numa primeira análise às rotações das diferentes secções definidas na Figura 20, verifica-se uma convergência dos resultados diferindo apenas, significativamente, em certos pontos. No ponto A verifica-se apenas uma diferença de rotação em torno do eixo x de cerca de 1,3%. Isto indica que as normas SIA 260 e 261, impõem à estrutura esforços horizontais superiores aos exercidos pelas normas EN 1990 e 1991. Verifica-se também a influência do muro de suporte, nos dois restantes resultados do ponto A. No ponto B, verifica-se a resposta da caixa de escada, traduzindo uma rotação no eixo z , uma vez que o pórtico utilizado para análise (ver Figura 20) intersesta a caixa de escada excêntrica. O mesmo acontece às rotações em torno do eixo z nos restantes pontos, sendo no ponto D detetada a variação mais significativa da presente análise com uma variação de cerca de 16,7%. A justificação para tal variação encontra-se no facto de se ter eleito um pórtico excêntrico e como o ponto D não sofre a influência nem da caixa de elevador (de uma forma direta) nem dos muros de suporte, o valor de rotação obtido é superior.

Para uma comparação em termos de esforços originados pelas ações impostas por cada norma, é seguidamente apresentado um pórtico orientado segundo a direção y , uma vez que os vãos nesta direção são superiores, originando esforços mais elevados nos elementos.

Na Figura 21 são apresentados os momentos fletores obtidos no pórtico submetido às diferentes ações segundo ambas as normas.

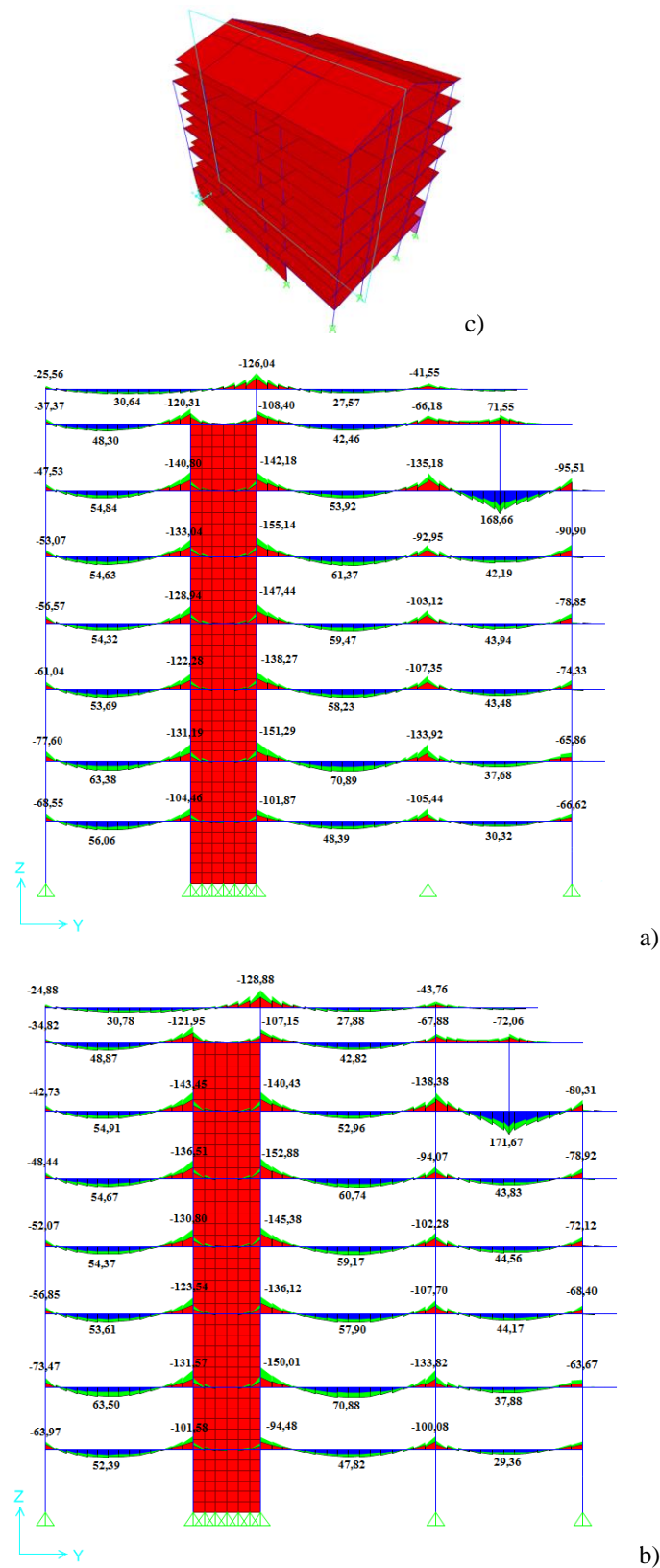


Figura 21 – Momentos fletores ELU segundo: a) EN 1991, b) SIA 261, e c) localização do pórtico em estudo

Na Figura 22 é apresentado o esforço transversal obtido no referido pórtico para ambas as normas.

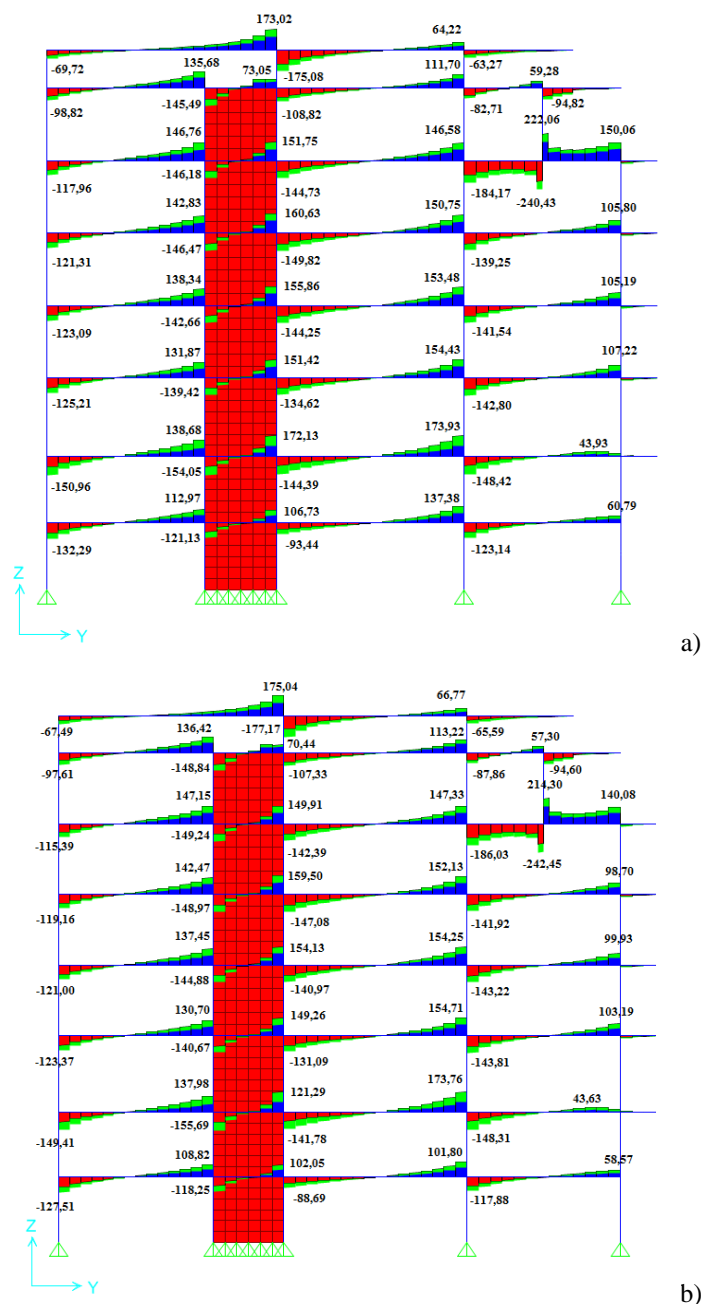


Figura 22 – Esforço transversal ELU segundo: a) EN 1991, b) SIA 261

Numa análise geral, verificam-se esforços similares, existindo pequenas variações. Uma vez mais, estes resultados confirmam a semelhança na utilização das normas EN relativamente às normas SIA. Pode pois concluir-se que as ações bem assim como os critérios de combinação das mesmas, impostos por ambas as normas, não são, de maneira global, suficientemente distintas para originar diferenças significativas nos esforços de

dimensionamento. Tal facto pode encontrar justificação na crescente e inevitável aproximação das normas suíças ao quadro normativo europeu.

Apresentam-se de seguida os esforços de dimensionamento para uma laje segundo as ações preconizadas pelas normas EN 1991 e SIA 261, para as duas direções. A laje analisada é o pavimento com utilização de cariz comercial, onde a sobrecarga de utilização em ambos os regulamentos é de 5 kN/m^2 , a carga devida ao peso das paredes interiores é de $1,2 \text{ kN/m}^2$, e ainda $0,3 \text{ kN/m}^2$ devidos ao peso do revestimento.

Na Figura 23, são apresentados os mapas de momento fletor na laje em ambas as direções.

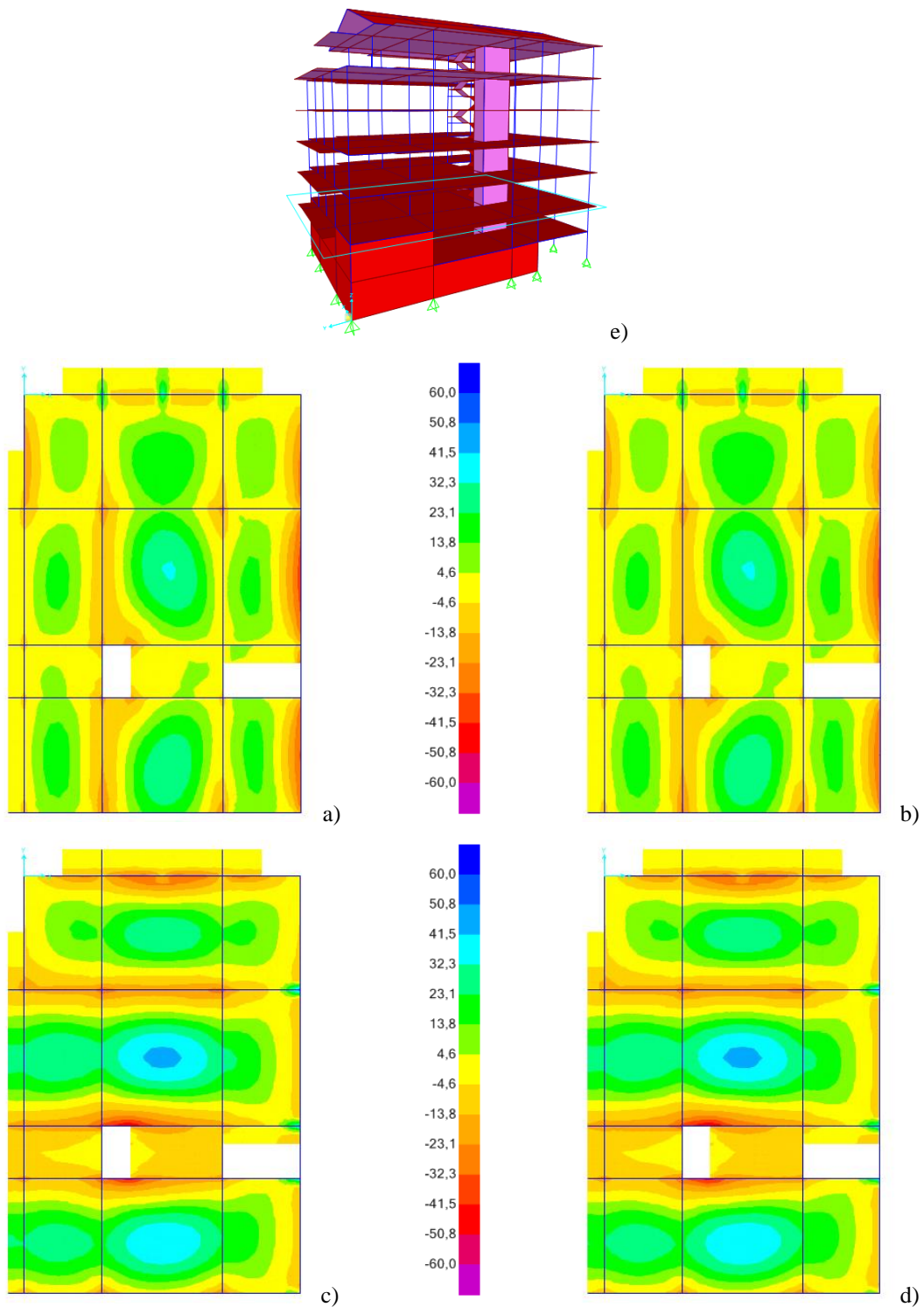


Figura 23 – Momento fletor na laje no plano indicado para as normas a) EN 1991 para M_x , b) SIA 261 para M_x , c) EN 1991 para M_y , d) SIA 261 para M_y , e) localização do pórtico em estudo

Na Figura 24, é apresentado o esforço transverso na laje em ambas as direções para as normas EN 1991 e SIA 261.

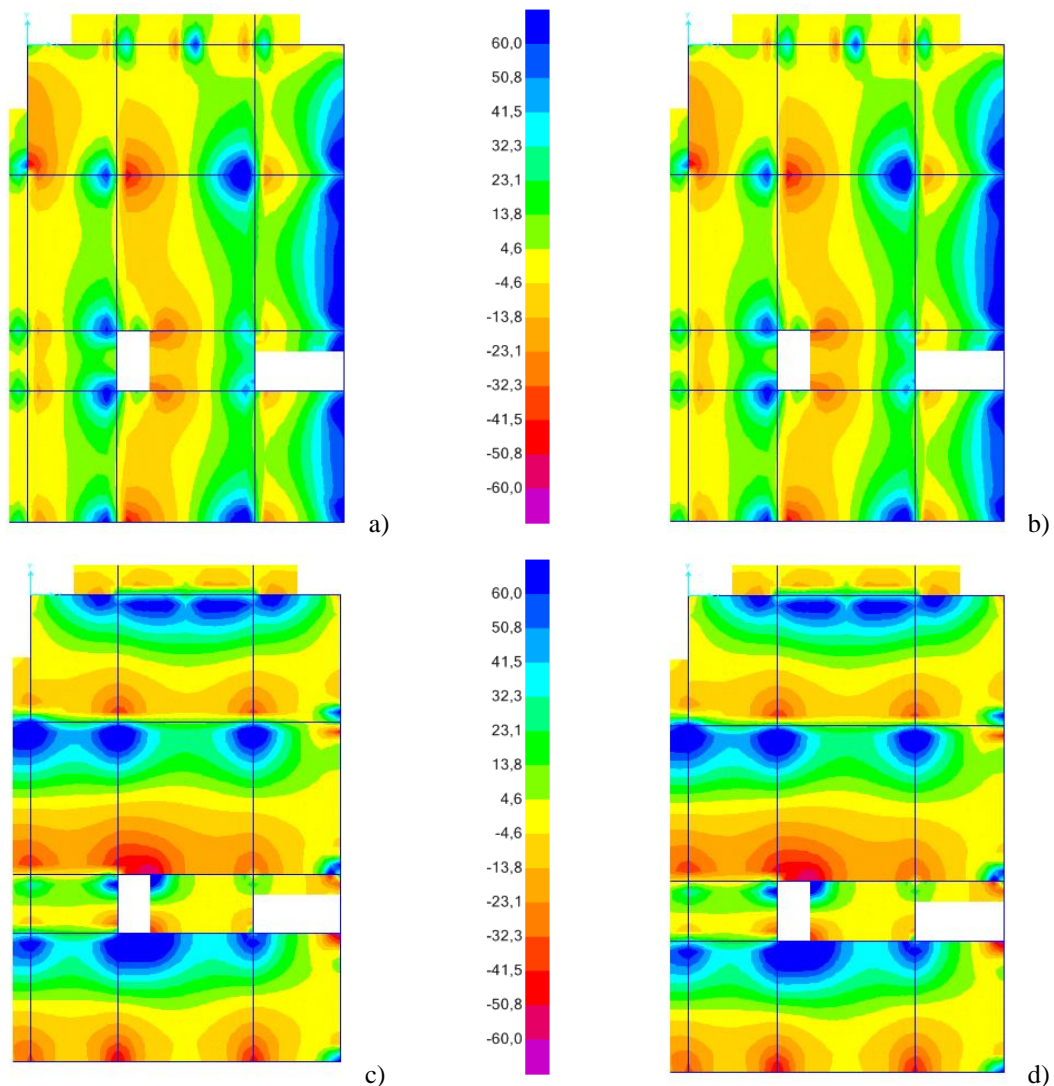


Figura 24 – Esforço transverso na laje no plano indicado para as normas a) EN 1991 para V_x , b) SIA 261 para V_x , c) EN 1991 para V_y , d) SIA 261 para V_y

Uma vez mais, é visível a semelhança entre as normas nos resultados finais. Os momentos fletores obtidos na laje (ver Figura 23) apresentam valores muito próximos, sendo os mesmos indistinguíveis com o auxílio da paleta de cores. O mesmo se passa com o esforço transverso obtido nas lajes (ver Figura 24), o que comprova a semelhança dos esforços numa análise global final.

6.5.5 – Considerações finais

Como seria de esperar, os esforços obtidos segundo ambas as normas são semelhantes, o que fica a dever-se ao facto da sobrecarga de utilização aplicada à laje de comércio ser a mesma.

Em suma, os resultados obtidos aplicando a norma SIA 261 convergem para os mesmos valores obtidos pela norma EN 1991, o que evidencia uma abordagem análoga entre ambas as normas do ponto de vista global das ações de projeto, e isso é refletido no mesmo comportamento estrutural do edifício, obtendo-se portanto elementos de secção idênticas ou muito próximas (ver Anexo B).

Capítulo 7 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1 – Conclusões

No presente trabalho foram comparados o antigo regulamento que vigorou em Portugal, RSAEEP, as normas europeias EN 1990 e EN 1991, que substituíram o anterior regulamento, e as normas suíças SIA 260 e SIA 261 em vigor. A análise comparativa efetuada consistiu na quantificação e combinação das diferentes ações a considerar no dimensionamento estrutural como sejam a ação da sobrecarga de utilização, a ação da neve e a ação do vento.

Relativamente ao ELU, e às ações variáveis em particular, as normas RSAEEP e EN 1990 tomam as ações concomitantes majoradas por um coeficiente parcial de segurança, o que não acontece com a SIA 260. Esta diferença é de alguma forma compensada pela utilização de valores de combinação, associados a coeficientes ψ_0 , superiores por parte da norma suíça com o fim de proporcionar uma margem de segurança estrutural globalmente semelhante. Ainda, a EN 1990 é a única norma que abre explicitamente a possibilidade de o coeficiente parcial de segurança para a ação variável de base poder ser diferente do coeficiente parcial de segurança utilizado para as restantes ações variáveis concomitantes, o que confere uma maior autonomia ao projetista.

No que concerne às regras de combinação das ações em ELS, apontam-se duas diferenças entre o RSAEEP e as normas EN 1990 e SIA 260 que apresentam, de resto, formulações coincidentes. O RSAEEP reduz a ação permanente ao mantê-la em termos de valores médios nos três tipos de combinações, enquanto as restantes normas se referem ao correspondente valor característico. Ainda, relativamente à combinação característica (ou rara) de ações, o RSAEEP considera um aumento do tempo de atuação das ações acompanhantes tomando o valor frequente das mesmas, ψ_1 , enquanto as restantes normas tomam o correspondente valor de combinação (ψ_0). Assim, O RSAEEP adota um valor global da combinação característica de ações potencialmente inferior quando comparado com as restantes normas.

Em relação às sobrecargas de utilização, conclui-se que as normas preconizam globalmente valores idênticos, existindo apenas uma pequena diferença na sobrecarga a ser considerada nas coberturas não acessíveis onde o RSAEEP considera $0,3 \text{ kN/m}^2$ em contraponto com o valor de $0,4 \text{ kN/m}^2$ imposto pelas normas EN 1991 e SIA 261.

Os valores de referência da ação da neve instituídos na SIA 261 são aproximadamente o dobro em relação à EN 1991, o que indica que o fator de localização geográfica respeitante à altitude de referência é um parâmetro determinante, uma vez que os restantes parâmetros são idênticos aos da EN 1991. Isto poderá significar que existe uma maior preocupação com a ação da neve na cobertura pela norma suíça em relação ao regulamento europeu, resultado de condicionantes climáticas locais não contempladas na norma europeia. O RSAEEP apresenta valores da carga da neve na cobertura aproximadamente três vezes superiores quando comparados com os da EN 1991, o que indica que o RSAEEP preconiza uma excessiva sobrevalorização da ação, motivado pela forma linear como o RSAEEP quantifica a carga de neve ao nível do solo, enquanto na EN 1991 existem coeficientes que ditam uma variação parabólica, ajustando assim os valores da ação da neve em função da altitude e da zona do projeto. Pela SIA 261, existe um coeficiente h_0 que traduz simultaneamente a altitude e o risco de queda de neve por zonas. Dessa forma, uma comparação direta torna-se complexa uma vez que não foi possível determinar quais os critérios para a construção do zonamento territorial.

Numa análise global às ações do vento, é de sublinhar o tratamento dado pela EN 1991 à ação do vento obtendo valores de pressões que se situam tipicamente entre os da SIA 261 e os do RSAEEP, o que indicia a preocupação da norma europeia no que se refere ao aproveitamento dos materiais, evitando assim o sobredimensionamento e a não economia. Veio portanto, em relação ao antigo regulamento português RSAEEP, ajustar os valores de pressão do vento nas superfícies para valores próximos dos valores reais, que estavam a ser subdimensionados nas fachadas de incidência direta do vento e, em relação às restantes fachadas (de sucção), apresentavam valores acima dos valores obtidos nas restantes normas. Quanto à norma suíça, esta apresenta valores de pressão do vento em superfícies submetidas a sucção ainda mais baixos, o que indica uma abordagem menos preocupada em relação à norma europeia, mas que poderá indicar um maior controlo sobre as pressões dinâmicas no país por si regidos, uma vez que quando o vento entra na combinação de ação como ação acompanhante, este só é multiplicado pelo coeficiente ψ_0 e, como se disse, não é afetado simultaneamente de um coeficiente de segurança como é o caso nas restantes normas aqui analisadas.

Como conclusão final é possível afirmar que a implementação das normas europeias veio beneficiar o uso de novas ferramentas de dimensionamento, apurando o valor das ações, supostamente fazendo-as convergir para o seu real valor. Proporcionou, ainda, o

desenvolvimento económico europeu com a implantação de uma norma única de dimensionamento que potencia a mobilidade europeia dos técnicos de engenharia.

Numa análise global, conclui-se ainda que os valores das ações, bem assim como os critérios de combinação de ações, especificados pelas diferentes normas, não são suficientemente distintos para determinar diferenças expressivas nos esforços de dimensionamento, o que evidencia o facto da crescente e inevitável aproximação das normas suíças ao quadro normativo europeu.

7.2 – Desenvolvimentos futuros

Como estudo posterior é proposto uma continuidade da comparação das normas EN 1991 e SIA 261 para avaliar a possível analogia quanto aos seguintes aspetos:

- Quantificação dos efeitos locais da ação da neve na cobertura, tais como o deslocamento da neve junto a saliências e obstáculos, neve saliente da cobertura e a determinação do efeito da carga de neve em guarda-neves e outros obstáculos;
- Determinar o efeito do vento em coberturas isoladas e avaliar as divergências entre as duas normas (EN 1991 e SIA 261), assim como analisar os efeitos locais do vento em elementos esbeltos aplicando forças em vez de pressões;
- Comparar as normas EN 1991 e SIA 261 em relação à quantificação das ações em estruturas expostas ao fogo;
- Relatar as principais diferenças em relação a variação da temperatura nos edifícios.

Seria ainda interessante fazer-se uma comparação entre os futuros Anexos Nacionais suíços da norma EN 1991, que até a data deste trabalho não se encontram disponíveis, e os Anexos Nacionais portugueses de forma a perceber as especificidades introduzidas em território helvético. Por outro lado, a sua comparação com a atual norma SIA 261 permitiria também compreender a evolução normativa naquele país.

Fora do âmbito do presente trabalho, tem ainda interesse uma análise e respetiva comparação da ação sísmica entre os dois países, no contexto da normalização europeia e

suíça, a fim de determinar os métodos e o grau de importância da mesma no dimensionamento estrutural.

Referências bibliográficas

- [1] Comité Europeu de Normalização. (2009). *Eurocódigo - Bases para o projeto de estruturas*. (Instituto Português da Qualidade, Trad.) Bruxelas.
- [2] Comité Europeu de Normalização. (2009). *Eurocódigo 1 - Ações em estruturas Parte 1-1: Ações gerais: Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios*. (Instituto Português da Qualidade, Trad.) Bruxelas.
- Comité Europeu de Normalização. (2009). *Eurocódigo 1 - Ações em estruturas Parte 1-3: Ações gerais: Ações da neve*. (Instituto Português da Qualidade, Trad.) Bruxelas.
- Comité Europeu de Normalização. (2010). *Eurocódigo 1 - Ações em estruturas Parte 1-4: Ações gerais: Ações do vento*. (Instituto Português da Qualidade, Trad.) Bruxelas.
- [3] Comissão de Instituição e Revisão dos Regulamentos, C. S. (1983). *Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes*. Lisboa.
- [4] Société suisse des ingénieurs et des architectes. (2003). *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses (SIA 260)*. Zurich: SIA.
- [5] Société suisse des ingénieurs et des architectes. (2003). *Actions sur les structures porteuses (SIA 261)*. Zurich: SIA.
- [6] Gulvanessian, H., Calgaro, J.-A., & Holický, M. (2002). *Designers' guide to EN 1990: Eurocode: Basis of structural design*. London: Thomas Telford.
- [7] Société suisse des ingénieurs et des architectes. (2004). *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses: Actions sur les structures porteuses: Exemples de dimensionnement selon les normes SIA 260 et 261*. Zurich: Truninguer Druck AG.
- [8] International Organisation for Standardisation. (1998). *ISO 4355: Bases for Design of Structures - Determination of Snow Loads on Roofs*. Geneva.
- [9] Simões, P., Fernandes, C., & Varum, H. (2007). *Análise Comparativa da Quantificação da Acção da Neve de acordo com o RSA, a norma espanhola NBE e o ECI*. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Aveiro.
- [10] Gulvanessian, H., Formichi, P., & Calgaro, J.-A. (2008). *Designers' guide to eurocode I: Actions on buildings EN 1991-1-1 and -1-3 to -1-7*. London: Thomas Telford.
- [11] Société suisse des ingénieurs et des architectes. (2003). *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses: Actions sur les structures porteuses: Introduction aux normes SIA 260 et 261*. Zurich: Truninguer AG.

- [12] Neves, L. C., & Barbosa, A. R. (2010). *Segurança Estrutural*. Universidade Nova de Lisboa, Departamento Engenharia civil.
- [13] Computers and Structures, Inc. (1995). SAP 2000 v15. Berkeley, California 94704, USA.
- [14] Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (2002). Varões de aço A500 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. *Documentação Normativa*. Lisboa: LNEC.
- [15] Autodesk, Inc. (Dezembro de 1982). AUTOCAD 2013. Califórnia, USA.

ANEXO A

(Arquitetura do edifício)

Neste anexo, apresentam-se o corte e as plantas arquiteturais em Autocad® [15], que serviram de base para a modelação tridimensional do edifício (caso de estudo).

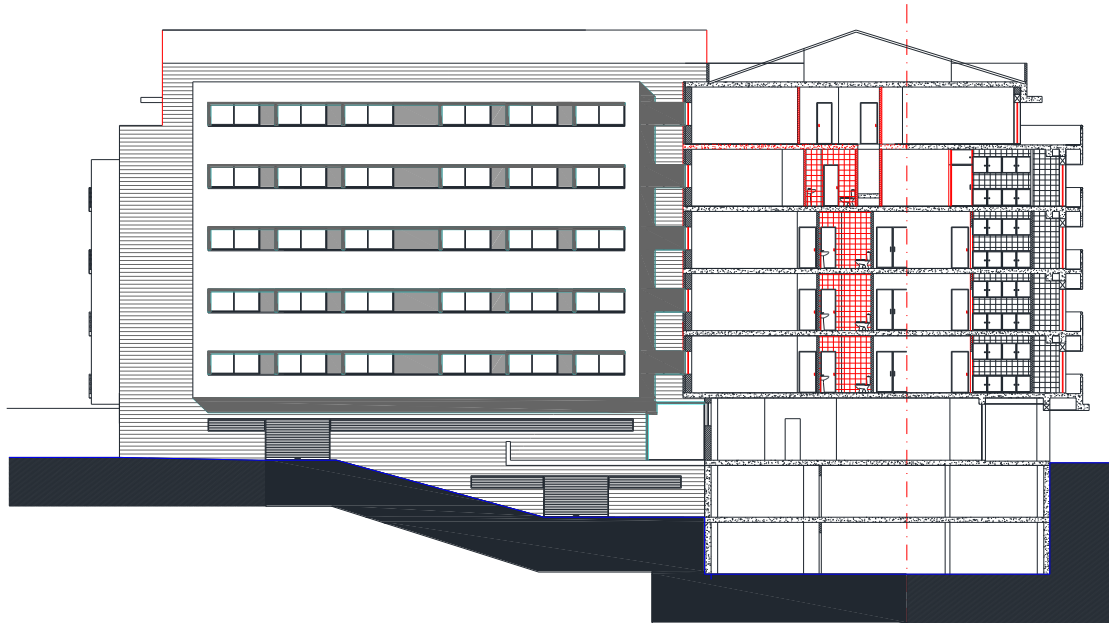


Figura A1 - Alçado poente - corte A-A'

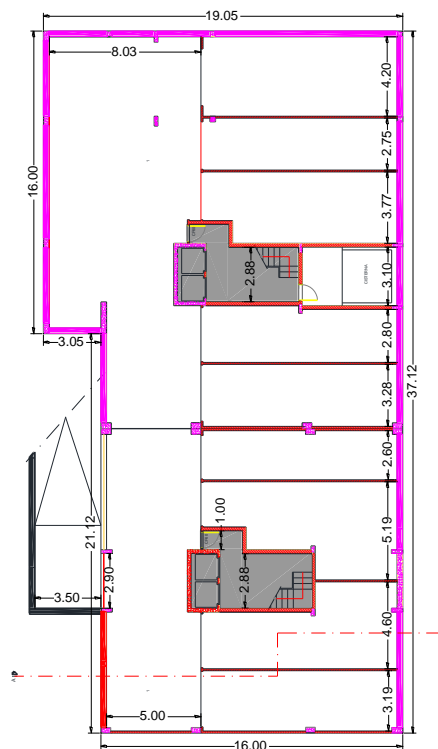


Figura A2 - Planta da subcave

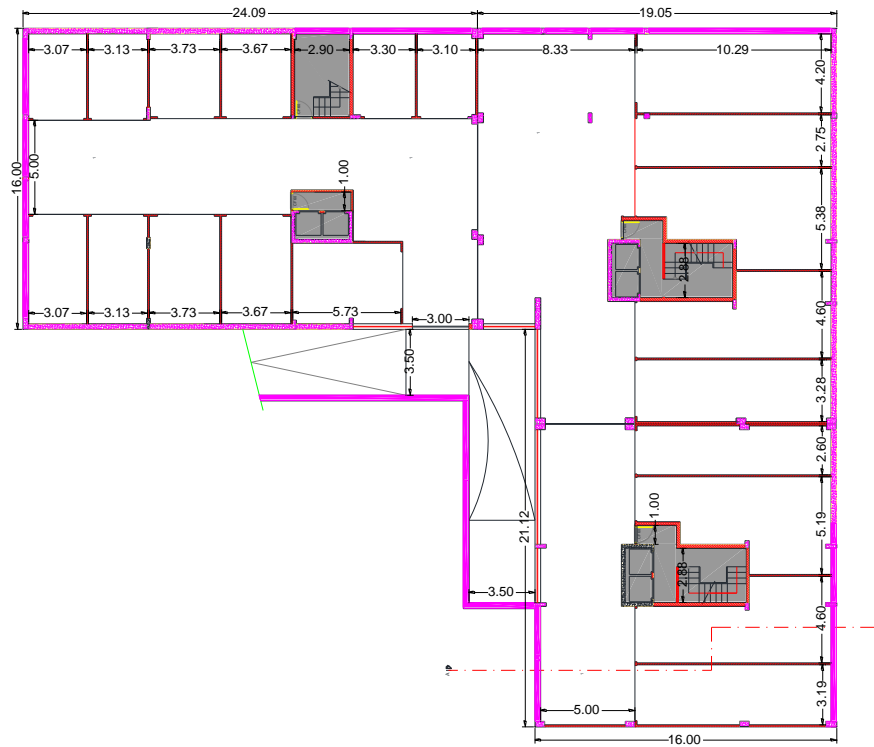


Figura A3 - Planta da cave

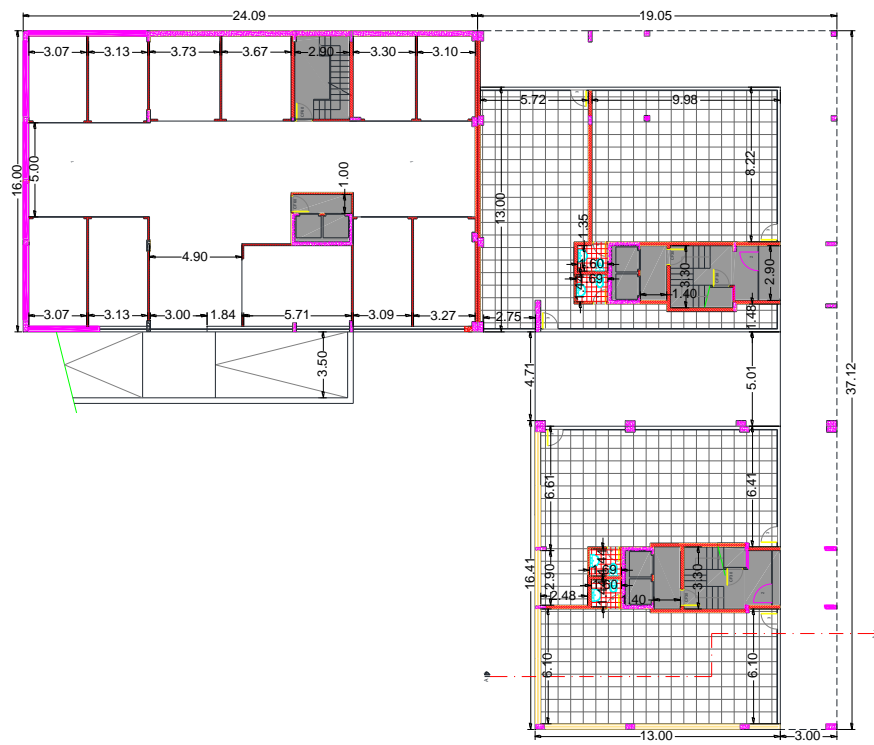


Figura A4 - Planta do rés-do-chão



Figura A5 - Planta do 1º andar



Figura A6 - Planta do 2º andar



Figura A7 - Planta do 3º andar



Figura A8 - Planta do 4º andar

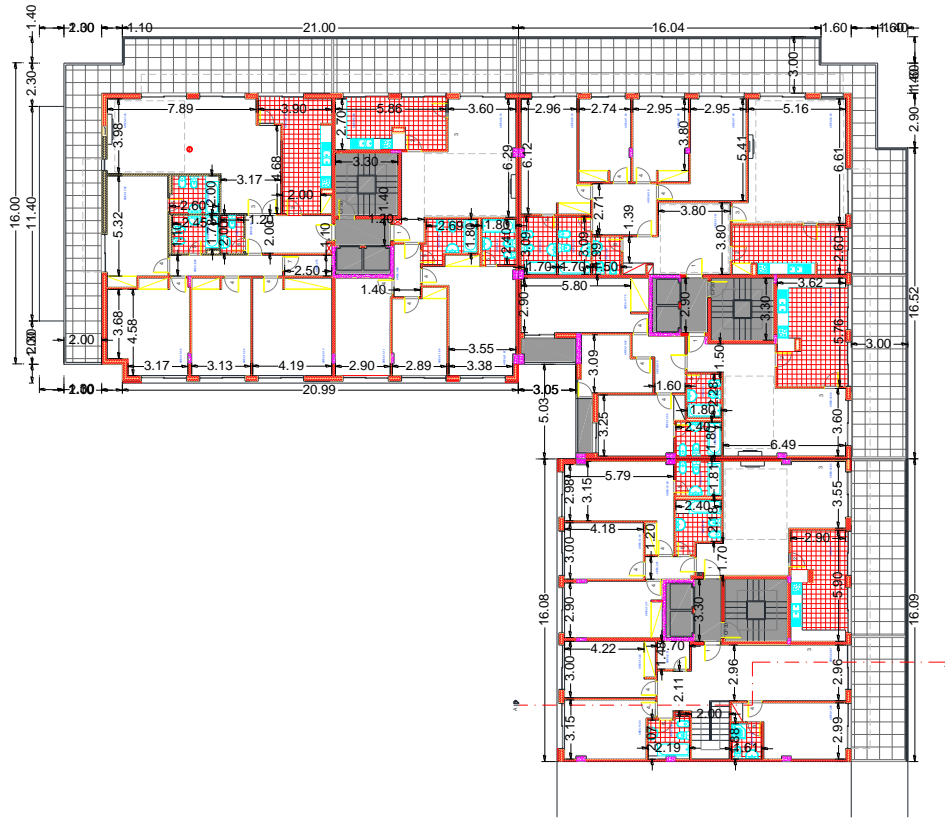


Figura A9 - Planta do 5º andar

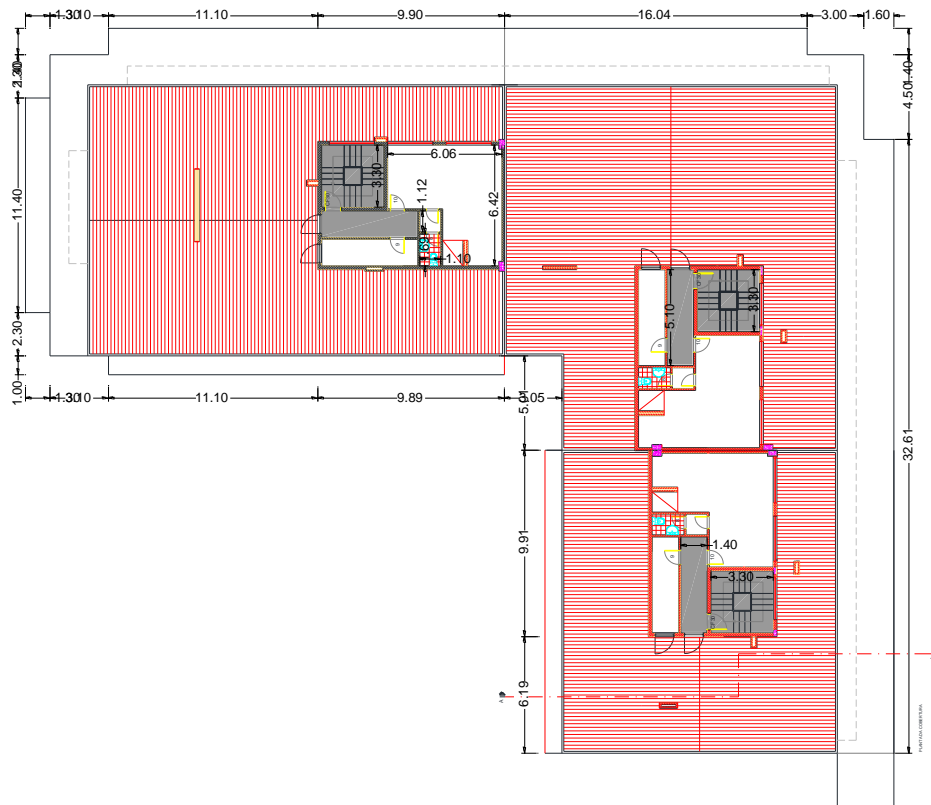


Figura A10 - Planta da cobertura

ANEXO B

(Secções base e secções otimizadas dos diferentes elementos)

Neste anexo são definidas as secções dos elementos nos diferentes pórticos do edifício. As caixas a cor laranja evidenciam a economia estrutural conseguida através da diminuição da secção na zona indicada. As figuras do lado esquerdo são referentes às normas EN, e as do lado direito ao conjunto normativo SIA.

