

Estudo comparativo da NBR 8681 e Eurocode 1990 relativo às combinações de carga normal, especial ou de construção e excepcional

Comparative study between NBR 8681 and Eurocode 1990 related to normal, special or constructive and exceptional load combinations

Carlos Petrus Barbosa Leal (1); Thalita Emanuela Matos Frota Lemos Duarte (2); Maria de Lourdes Teixeira Moreira (3)

(1) Eng. Civil, Esp., UFPI - petrus_cbl@hotmail.com

(2) Eng. Civil, Esp., UFPI - thalita-duarte@hotmail.com

(3) Eng. Civil, Professora Doutora, UFPI – mmoreira@ufpi.edu.br

Centro de Tecnologia, Departamento de Estruturas

Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Av. Universitária, s/n - Ininga, Teresina - PI, 64049-550

Resumo

O presente trabalho comparou os tipos de combinações e os seus coeficientes para os Estados Limites Últimos (ELU) presentes na norma brasileira, NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento, com os apresentados pela norma europeia, EN 1990:2009– Bases para o projeto de estruturas. Para tanto escolheu-se uma edificação de múltiplos pavimentos para servir como estudo de caso, obtendo-se os esforços de cálculo atuantes utilizando os métodos das duas normas citadas. Ao final, foram comparados os critérios de combinação, as combinações críticas e os esforços calculados, de acordo com as duas normas, para os elementos representativos da estrutura. Concluiu-se que a norma europeia apresenta maior quantidade de combinações de ações e é mais conservadora em relação à minoração do efeito da ação variável secundária. Já a norma brasileira possui menos equações de combinações para o ELU, mas permite que essas equações sejam utilizadas considerando tanto as ações permanentes quanto as variáveis de forma agrupada ou separada. Para o edifício estudado, o EN 1990:2009 mostrou-se mais ou tão conservador quanto a NBR 8681:2003, pois resultou em esforços de cálculo iguais ou superiores aos obtidos seguindo-se a metodologia da norma brasileira.

Palavra-Chave: Segurança nas estruturas; combinações de ação; Estados Limites Últimos.

Abstract

The present work compared the types and the ultimate limit state combination factors listed in the Brazilian code, NBR 8681:2003 – Actions and safety of structures – Procedure with the ones on the European code, EN 1990:2009 – Basis of structural design. For this purpose a multiple storey building was chosen as a case study, obtaining the design forces using both codes. By the end, the combination criteria, critical combinations and calculated forces using Brazilian and European codes were compared. It was concluded the European code presents greater amount of load factors and is more conservative in relation to reducing the effects of the secondary variable action. In despite the fact that the Brazilian code lists less combinations for ULS, it allows those equations to be used by considering both permanent and variable loads in grouped or separated form, respectively. For the studied building, the EN 1990:2009 was more or as conservative as the Brazilian code.

Keywords: structural safety; load combinations; ultimate limit states.

1 Introdução

Até meados do século XX, as construções eram feitas baseando-se apenas na experiência e na perícia do construtor. As técnicas de construção avançavam ou eram modificadas a cada caso de sucesso ou de falha de uma construção. Com o avanço da tecnologia do aço e do concreto e o aumento no número de construções, tornou-se necessário o surgimento de diretrizes a fim de minimizar o aparecimento de falhas causadas pelo mau funcionamento das estruturas. Como resultado, os códigos e normas técnicas começaram a ser desenvolvidos e, até 1920, já estavam disponíveis diretrizes para o dimensionamento da maioria dos tipos de construção (CASTRO, 1997).

As normas voltadas para a construção civil têm como objetivo garantir a padronização, eficiência e, principalmente, segurança das estruturas, sem deixar de lado a economia. Fusco (1976) define que “uma estrutura pode ser considerada segura quando existe uma certa garantia de que durante sua vida útil não serão atingidos estados de desempenho patológicos”.

As combinações de ações e a determinação da situação crítica de projeto são etapas indispensáveis e de suma importância no dimensionamento de qualquer estrutura. Dependendo da complexidade da estrutura e da quantidade de ações atuantes é necessário restringir os casos a serem considerados ficando a decisão a cargo do projetista. Por isso, para um dimensionamento eficiente, o conhecimento dos casos de combinações e de suas particularidades é tão importante.

Este trabalho teve como objetivo comparar os métodos de combinação de ações para as combinações normal, especial ou de construção e excepcional apresentados pela norma brasileira, a NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento (ABNT, 2003) com as combinações para situações de projeto: persistentes ou transitórias, acidentais e sísmicas apresentadas pela norma europeia, EN 1990– Bases para o projeto de estruturas (CEN, 2009).

Especificamente, teve-se como meta destacar as principais diferenças entre as duas normas em relação aos tipos de combinações para os estados limites últimos e seus coeficientes de ponderação e minoração de cargas.

Por muito tempo as normas se utilizaram do método das tensões admissíveis para estabelecer critérios de verificação da segurança nas estruturas. Neste método, as tensões de ruptura dos materiais são minoradas por um coeficiente de segurança interno, dando origem às tensões admissíveis, e as maiores tensões de utilização não devem ultrapassar este valor. As críticas mais relevantes a este método estão no fato de que o coeficiente não define a segurança da estrutura. No entanto, com o avanço nos estudos percebeu-se que métodos estatísticos e conceitos probabilísticos são mais adequados para estas verificações, pois tanto a resistência de um dado elemento estrutural quanto a carga que nele atua são variáveis aleatórias.

Logo após a Segunda Guerra Mundial, começaram a surgir na URSS e no leste europeu métodos de cálculo em estados limites com fatores múltiplos de ações, que eram baseados em teoria de probabilidade. No Ocidente, estas teorias também tiveram seus defensores e, em 1955, Pugsley apresentou à Instituição Britânica de Engenheiros Estruturais recomendações que incluíam uma série de coeficientes de ponderação das ações e combinações de ação que foram obtidos por consenso de um conjunto de peritos.

O uso de probabilidade foi feito de maneira indireta e subjetiva. Seu trabalho foi o precursor da primeira geração de normas de cálculo em estados limites (CASTRO, 1997). O método dos estados limites é considerado semiprobabilístico: as cargas atuantes são majoradas e as resistências minoradas por coeficientes estabelecidos por meio de estudos e ensaios. Tanto a NBR 8681 quanto o EN 1990 dividem os estados limites em últimos e de serviço. Os primeiros são o foco deste trabalho e, quando atingidos, determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção (NBR 8681, 2003). As duas normas classificam as ações quanto à sua natureza como diretas ou indiretas; quanto à sua variabilidade no tempo como permanentes, variáveis ou excepcionais. A norma brasileira as classifica quanto à sua variação no espaço como fixas ou móveis (estas últimas são chamadas de livres na norma europeia) e quanto à resposta estrutural, como estáticas ou dinâmicas. É importante destacar que existe uma diferença nos conceitos de ações acidentais fornecidos pelas duas normas. Para o EN 1990, ações acidentais são aquelas de curta duração, mas com intensidade significativa, que correspondem a condições excepcionais, aplicáveis à estrutura ou à sua exposição, como por exemplo incêndios, explosões, impactos ou consequências de rupturas localizadas. Já para a NBR 8681 essa definição é dada às ações excepcionais e as ações acidentais são definidas como ações variáveis em decorrência da utilização da construção.

Os tipos de carregamento apresentados na norma brasileira, normal, especial e excepcional, correspondem, respectivamente, às situações de projeto persistentes, transitórias e acidentais apresentadas na norma europeia. Vale destacar que a NBR 8681 apresenta adicionalmente o carregamento de construção, enquanto a EN 1990 apresenta a situação de projeto sísmica: ambas consideradas apenas em situações particulares. As situações de carregamento que podem ocorrer durante a construção estão consideradas, dentro da norma europeia, nas situações de projeto transitórias. Já as situações de projeto em caso de ação sísmica estão consideradas, dentro da norma brasileira, nos casos excepcionais de carregamento.

Os tipos de carregamentos dão nome às três combinações existentes na NBR 8681 para verificação do estado limite último: normal, especial ou de construção e excepcional. A norma europeia também apresenta três tipos de combinações para o estado limite último: combinações de ações para situações de projeto persistentes e transitórias (combinações fundamentais), combinações de ações para situações de projeto acidentais e combinações de ações para situações de projeto sísmicas.

Para as combinações fundamentais, o EN 1990 apresenta tanto uma equação geral, que considera o estado limite EQU, quanto equações específicas para casos em que se considerem os estados limites últimos STR ou GEO. Estes estados limites levam em consideração a ruptura ou deformação excessiva da estrutura considerando como fator determinante, respectivamente, a resistência dos materiais e a resistência do solo. Já o estado limite EQU leva em consideração a perda de equilíbrio estático do conjunto ou de parte da estrutura, influenciada pela alteração no valor ou na distribuição de ações de mesma origem que sejam significativas, mas não pela resistência dos materiais ou do solo. Além desses três tipos de estados limites últimos já citados, o EN 1990 prevê mais um: o FAT, referente à fadiga, que não será abordado neste trabalho. O EN 1997:2007 – Projeto geotécnico (CEN, 2007) – introduz ainda mais dois estados limites últimos, UPL (perda de equilíbrio da estrutura ou do solo devido a subpressão da água) e HYD

(percolação e erosão interna causados por gradientes hidráulicos). A Figura 1 ajuda a entender melhor os estados limites últimos previstos no EN 1990.

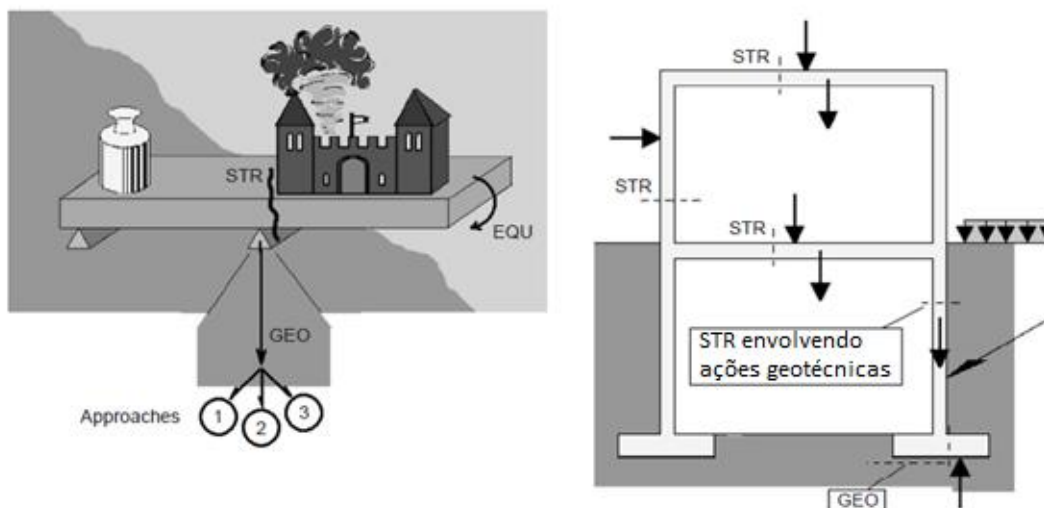


Figura 1 - Exemplos dos estados limites últimos EQU, STR e GEO. (GULVANEISSIAN, 2002)

O estado limite último a ser estudado depende da forma de introduzir segurança na avaliação de ações geotécnicas e não geotécnicas e em resistências geotécnicas. Para os estados limites últimos GEO ou STR que envolvam ações geotécnicas, o EN 1990 define três abordagens e define valores dos coeficientes de ponderação para cada abordagem. A escolha de cada abordagem é definida pelo Anexo Nacional de cada país (GULVANEISSIAN, 2002).

O EN 1990 define combinações de ações como o “conjunto de valores de cálculo utilizados na verificação da confiabilidade estrutural relativamente a um dado estado limite sob a influência simultânea de diferentes ações” (CEN, 2009). As equações para cada tipo de combinação existente nas duas normas estão listadas abaixo.

NBR 8681:

- Combinação última normal

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k} \right] \quad (\text{Equação 1})$$

- Combinação especial ou de construção

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k} \right] \quad (\text{Equação 2})$$

- Combinação última excepcional

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + \gamma_q \cdot \sum_{j=1}^n \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

F_d : valores de cálculo das ações; γ_{gi} : coeficiente de ponderação para as ações permanentes; $F_{gi,k}$: valor característico das ações permanentes; γ_q : coeficiente de ponderação para as ações variáveis; $F_{q1,k}$: valor característico da ação variável considerada como principal; $\psi_{0j} \cdot F_{qj,k}$: valor reduzido das ações variáveis secundárias; $\psi_{0j,ef}$: fator de combinação efetivo de cada uma das demais ações variáveis; que podem agir concomitantemente com a ação principal $F_{q1,k}$, durante a situação transitória; $F_{q,exc}$: valor da ação transitória excepcional.

Eurocode 1990:

- Combinações para situações de projeto persistentes ou transitórias (fundamentais)

Equação geral:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (\text{Equação 4})$$

Equação em alternativa para os estados limites STR e GEO, a menos favorável das duas expressões abaixo:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (\text{Equação 5})$$

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (\text{Equação 6})$$

- Combinações para situações de projeto acidentais

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (\text{Equação 7})$$

- Combinações para situações de projeto sísmicas

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

E_d : valores de cálculo do efeitos das ações; $\gamma_{G,j}$: coeficiente parcial relativo à ação permanente j; $G_{k,j}$: valor característico da ação permanente j; γ_P : coeficiente parcial relativo às ações de protensão; P : valor característico de uma ação de protensão; $\gamma_{Q,1}$: coeficiente relativo à ação variável principal; $Q_{k,1}$: valor característico da ação variável principal; $\gamma_{Q,i}$: coeficiente relativo à ação variável i; ψ_0 : coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável; $Q_{k,i}$: valor característico de uma ação variável secundária; A_d : valor de cálculo de uma ação acidental (conforme definição da norma europeia); $\psi_{1,1}$: coeficiente para a determinação do valor frequente da ação variável principal; $\psi_{2,1}$: coeficiente para a determinação do valor quase-permanente da ação variável principal; A_{Ed} : valor de

cálculo de uma ação sísmica; ξ : coeficiente de redução para ações permanente desfavoráveis.

Os valores de cálculo das ações, que aparecem nas combinações, são obtidos utilizando-se o valor característico ou outro valor representativo em combinação com os coeficientes parciais e outros coeficientes (CEN, 2009). Os valores representativos das ações podem ser valores característicos, valores característicos nominais, valores reduzidos de combinação, valores convencionais excepcionais, valores reduzidos de utilização e valores raros de utilização (ABNT, 2003). A norma europeia divide os valores característicos das ações permanentes em inferior e superior. O primeiro é utilizado quando essas ações são favoráveis à combinação e o segundo quando elas são desfavoráveis. Não existe na norma uma definição clara de como se obtém cada um desses valores.

Os coeficientes para os estados limites últimos levam em consideração algumas incertezas, inerentes ao método semiprobabilístico, como: a possibilidade de variabilidade dos valores das ações em relação aos seus valores representativos; incertezas inerentes ao modelo de cálculo e/ou método construtivo utilizados; e a probabilidade de ocorrência simultânea dos valores característicos de ações variáveis de naturezas diferentes. As duas primeiras incertezas são levadas em consideração pelo coeficiente de ponderação, γ_f na norma brasileira e γ_F na norma europeia. Já a última incerteza é levada em conta pelo coeficiente de combinação ψ_0 . A norma brasileira apresenta um maior detalhamento para os valores do coeficiente de ponderação. Além de dividir nos casos de efeito favorável e desfavorável, ela apresenta diferentes valores para este coeficiente quando as ações são consideradas em conjunto ou separadamente e de acordo com a sua origem e porte da estrutura na qual atuam.

Ambas as normas apresentam valores diferentes de coeficiente de ponderação para considerar casos nos quais as ações permanentes são favoráveis ou desfavoráveis e permitem a desconsideração das ações variáveis quando elas forem favoráveis à combinação, ou seja, nesses casos γ_q é igual a zero. Além disso é importante destacar que a norma europeia permite que, quando a variação da intensidade de uma ação permanente afetar de forma considerável os resultados da verificação, as componentes favoráveis e desfavoráveis dessa ação sejam consideradas de forma separada. Já a norma brasileira não permite que a ação permanente seja considerada de forma decomposta. A NBR 8681 cita no seu item 5.1.4.1 que “para uma dada ação permanente, todas as suas parcelas são ponderadas pelo mesmo coeficiente γ_g , não se admitindo que algumas de suas partes possam ser majoradas e outras minoradas” (ABNT, 2003).

Quanto aos valores do coeficiente de combinação ψ_0 , há bastante semelhança entre as duas normas. Ambas apresentam os mesmos valores de coeficiente de combinação para as ações do vento e da temperatura e apresentam valores distintos para as sobrecargas de acordo com a utilização da estrutura. As diferenças são que a norma europeia é mais conservadora quando se trata das sobrecargas de ocupação, ou seja, apresenta valores maiores para o coeficiente, e não apresenta valores de ψ_0 para cargas dinâmicas, enquanto a norma brasileira não apresenta valores de ψ_0 para a ação da neve.

O coeficiente de redução para ações permanentes desfavoráveis (ξ) aparece apenas na equação (6) e permite a redução no valor do efeito de cargas permanentes que sejam

desfavoráveis à combinação. Ele pode ser considerado um coeficiente de combinação (GULVANEISSIAN, 2005) e não existe um coeficiente equivalente a este na norma brasileira.

É possível notar que a combinação última normal, equação (1), e a combinação fundamental, na sua equação principal, equação (4), são equivalentes. Há a ponderação de todas as ações pelo coeficiente de ponderação correspondente, as ações permanentes e a ação variável principal são consideradas em sua totalidade e as ações variáveis secundárias aparecem com seus valores reduzidos.

Nas combinações presentes na norma brasileira há apenas um caso no qual uma ação tem seu valor de cálculo igual ao seu valor característico, que é no caso da ação excepcional para a combinação excepcional. Nas combinações para situações de projeto acidentais e para situações de projeto sísmicas, presentes na norma europeia, nenhuma das ações consideradas apresenta valor de cálculo obtido com a utilização do coeficiente de ponderação.

Na equação (5) não há ação variável principal. Todas as ações variáveis presentes na combinação aparecem em seu valor reduzido de combinação, por meio da multiplicação pelo fator de combinação ψ_0 [9].

Não há combinação equivalente na norma brasileira para as equações (5) e (6). Elas são utilizadas para a verificação dos estados limites STR em casos que não envolvem ações geotécnicas e STR e GEO em casos que envolvam ações geotécnicas, respectivamente (BOND, 2006). Gulvanessian e Holicky (2005) diferenciam da seguinte forma: a equação (5) é utilizada quando a proporção entre as ações variáveis e as ações totais é baixa e a equação (6) é utilizada quando essa mesma proporção é alta. Normalmente esta razão é baixa quando se utiliza um material pesado como o concreto e alta quando se utiliza um material leve como o aço (GULVANEISSIAN, 2005). Outro parâmetro para saber quando utilizar a equação (5) ou (6) é: quando o valor das ações permanentes não ultrapassar 4,5 vezes o valor das ações variáveis, normalmente se utiliza a equação (6), exceto para cargas de armazenamento, casos nos quais sempre é utilizada a equação (5) (BOND, 2006).

A equação (4) é sempre igual ou mais conservadora do que a mais desfavorável entre as equações (5) e (6), mas, para uma construção usual em estrutura de concreto, a equação (6) fornecerá sempre a combinação de ações mais econômica em termos de estrutura (BOND, 2006). Apesar da equação (4) ser a mais desfavorável economicamente entre as três, caso a estrutura seja dimensionada utilizando-se esta equação, não é necessário fazer verificações para diversos estados limites de serviço (GULVANEISSIAN, 2002). Em casos em que a verificação do equilíbrio estático também envolva a resistência de elementos estruturais, não há a necessidade de fazer duas verificações separadas, uma verificação combinada pode ser adotada, desde que permitida pelo Anexo Nacional (CEN, 2009). Os valores recomendados para os coeficientes de combinação utilizados nessa verificação combinada são diferentes dos valores recomendados para a verificação do estado limite EQU ou STR, quando feitas separadamente.

A equação (7), combinações para situações de projeto acidentais, considera que acidentes são eventos não intencionais de pequena duração e com pequena probabilidade de ocorrência, que um certo grau de dano é aceitável em um evento desse

tipo e que acidentes geralmente ocorrem quando a estrutura está em uso (GULVANESE, 2001).

As combinações para situações de projeto sísmicas possuem formulação bastante parecida com as combinações para situações de projeto acidentais, trocando a ação acidental (A_d) pela ação sísmica (A_{Ed}), mas considerando o valor quase-permanente para todas as ações variáveis que atuam na estrutura.

Outra diferença existente entre as normas quanto as combinações de ações é que o EN 1990 permite que as combinações sejam baseadas em não mais do que duas ações variáveis, dependendo da utilização, da forma e da localização de um edifício, buscando desta forma simplificar a análise estrutural (CEN, 2009). Mas caso o projetista entenda ser necessário, as combinações podem ser feitas considerando tantas ações variáveis quanto seja necessário. Não há na NBR 8681 nenhuma permissão semelhante, ela se limita a dizer que “a aplicação de ações variáveis ao longo da estrutura pode ser feita de acordo com regras simplificadas, estabelecidas em Normas que considerem determinados tipos particulares de construção” (ABNT, 2003).

SANTOS e VITO (2016) realizaram um estudo comparativo entre as diretrizes de dimensionamento de estruturas articuladas em aço presentes nas normas brasileira, europeia e americana. Em relação à etapa de combinações de cargas, concluíram que a norma europeia é a mais conservadora quando se trata de combinações de cargas.

2 Metodologia

Foi elaborada a planta de um edifício-tipo comercial, com características como modulação e vãos moderados, de modo que a estrutura tivesse um comportamento previsível para permitir a realização da análise estrutural e determinação dos esforços críticos nos principais elementos. Foi utilizada versão educacional do software SAP 2000 para análise estrutural e combinações de esforços presentes na NBR 8681 e no EN 1990, inseridas de forma manual no programa. Após análise estrutural, foram escolhidas vigas secundárias, vigas principais, pilares e diagonais de contraventamento mais carregados para serem utilizados nas combinações de esforços. Estes elementos estão destacados nas Figuras 2 e 4.

O edifício utilizado para estudo de caso trata-se de um edifício comercial em estrutura mista de aço-concreto para uso de loja no térreo e depósito nos pavimentos superiores, localizado em zona urbana. As vigas secundárias e principais serão rotuladas. Os pilares também serão rotulados na sua base para não transmitir momentos para as fundações. Esse tipo de consideração será validado pelo uso das diagonais de contraventamento e travamentos horizontais.

As dimensões do edifício estão apresentadas nas Figuras 2 e 3. Os carregamentos atuantes considerados na estrutura foram: peso próprio da estrutura e elementos construtivos; sobrecarga para depósito com estoque de 3,5 m de altura, determinada de acordo com a norma NBR 6120 (ABNT, 2019); e vento calculado de acordo com a norma NBR 6123 (ABNT, 1988). O valor utilizado para o peso próprio dos elementos estruturais foi o obtido por meio de um pré-dimensionamento e as etapas para a sua determinação não serão abordadas neste trabalho, assim como as etapas para a determinação dos carregamentos devidos ao vento.

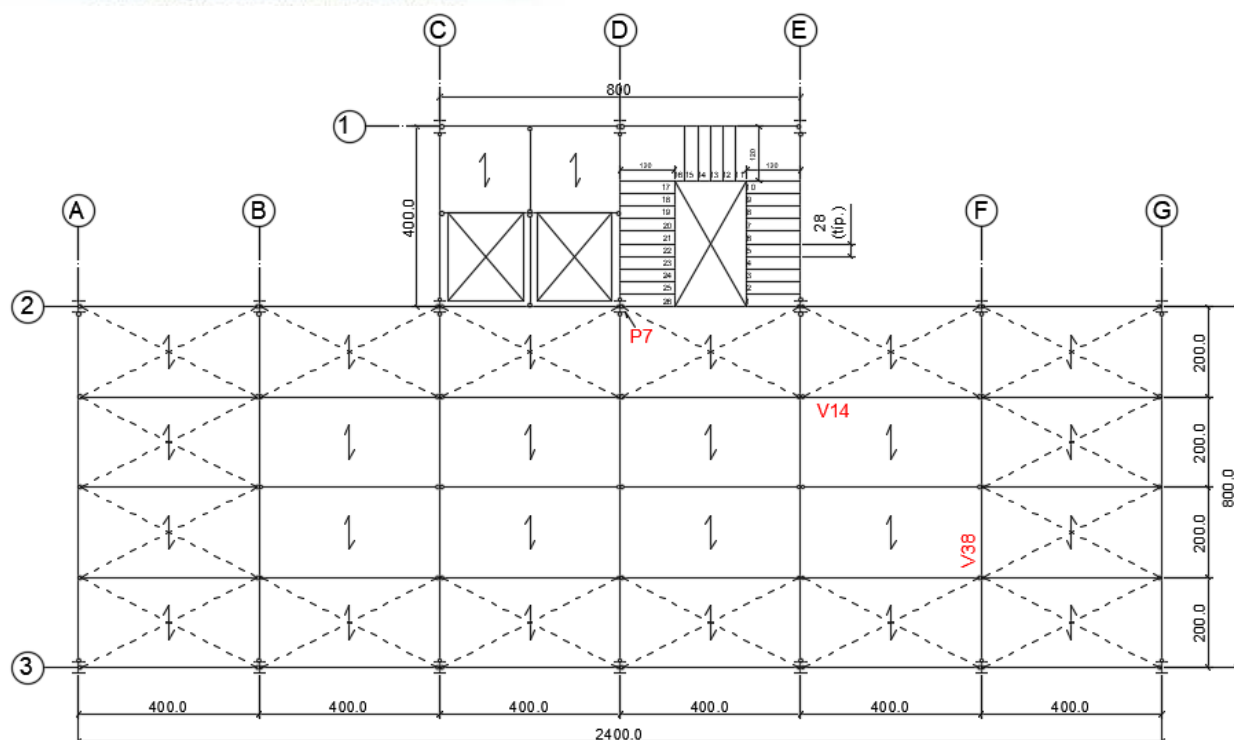


Figura 2 - Planta unifilar do pavimento tipo destacando viga secundária (V14), principal (V38) e pilares (P7) escolhidos para a comparação.

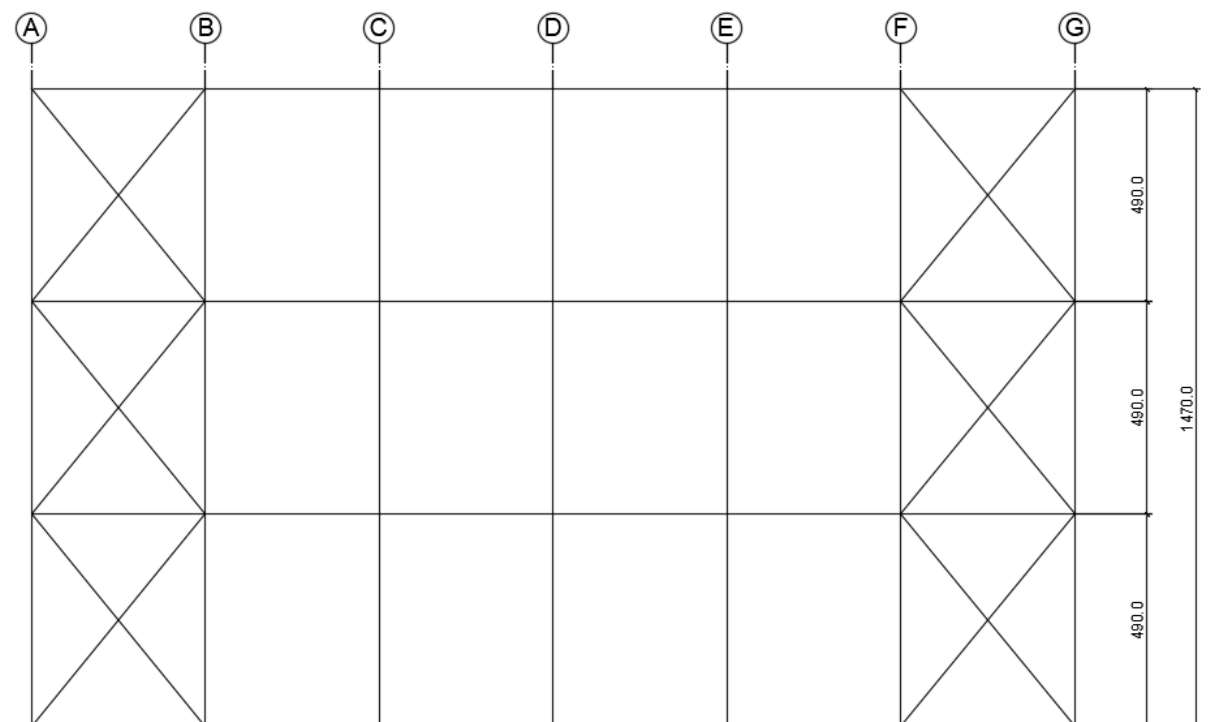


Figura 3 - Diagrama unifilar da elevação longitudinal

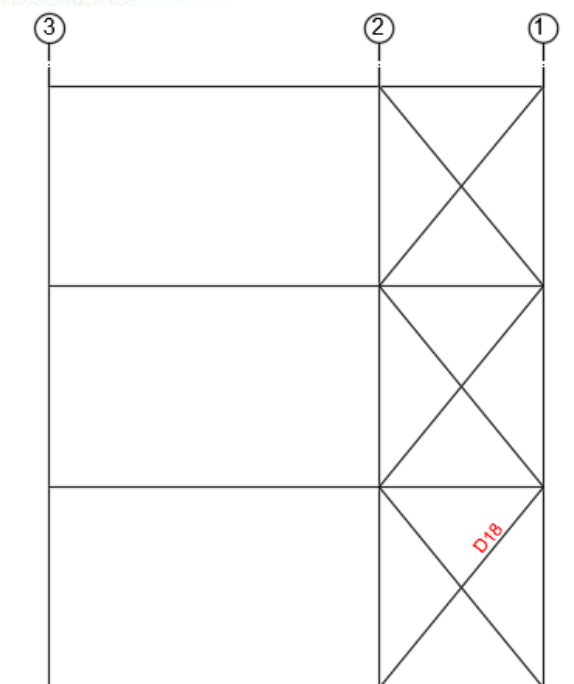


Figura 4 - Pórtico localizado no eixo E da estrutura. Diagonal de contraventamento (D18) escolhida para comparação das combinações em destaque.

Os valores das cargas consideradas nas combinações estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Carregamentos atuantes na estrutura.

Tipo de carregamento	Valor da carga (kN/m²)
Peso próprio da laje <i>steel deck</i> do piso (h=14,0 cm)	2,5
Revestimento	1
Instalações + forro	0,5
Sobrecarga do pavimento tipo	10,5
Peso próprio da laje <i>steel deck</i> da cobertura (h=10,0 cm)	1,85
Cobertura metálica (telha + estrutura)	0,3
Sobrecarga da cobertura	1,5

Com a utilização do software SAP 2000 na versão educacional, foram lançados os elementos estruturais obtidos no pré-dimensionamento, foram feitas as combinações utilizadas para as comparações e foram obtidos os esforços atuantes nas vigas, pilares e tirantes da estrutura. Ao todo foram feitas 06 (seis) combinações de cargas, 04 (quatro) seguindo a norma brasileira e 02 (duas) seguindo a norma europeia. Utilizou-se a combinação última normal, equação (1), para as combinações feitas de acordo com a NBR 8681, diferenciando apenas qual a ação variável a ser considerada como principal, vento ou sobrecarga, e se as ações permanentes e variáveis estavam sendo consideradas em conjunto ou separadamente. Para as combinações feitas de acordo com o EN 1990, considerou-se o estado limite último STR para as situações de projeto persistentes ou transitórias, utilizando-se tanto a equação geral, equação (4), para se

considerar a verificação combinada dos estados limites EQU e STR, quanto a equação alternativa (5), por não haver ações geotécnicas e pelo fato de existirem cargas de armazenamento. As combinações consideradas estão listadas na Tabela 2.

Nas combinações 1 e 2 considerou-se tanto as ações permanentes quanto as variáveis em conjunto. Já nas combinações 3 e 4 todas as ações foram consideradas separadamente, por isso foram utilizados três coeficientes diferentes para ponderação das ações permanentes. A combinação 5 representa a verificação combinada dos estados limites EQU e STR e a combinação 6 a verificação isolada do STR. Nas combinações 1, 3 e 5 a sobrecarga de utilização foi tomada como ação variável principal e nas combinações 2, 4 e 6, o vento foi a principal.

Tabela 2 – Combinações de Ações utilizadas.

Combinações baseadas na NBR 8681	Equação
Combinação 1	$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot SC + 1,5 \cdot 0,6 \cdot V$
Combinação 2	$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot V + 1,5 \cdot 0,7 \cdot SC$
Combinação 3	$1,25 \cdot (PP + COB) + 1,35 \cdot FOR + 1,4 \cdot (LAJE + REV + ALV) + 1,5 \cdot SC + 1,4 \cdot 0,6 \cdot V$
Combinação 4	$1,25 \cdot (PP + COB) + 1,35 \cdot FOR + 1,4 \cdot (LAJE + REV + ALV) + 1,4 \cdot V + 1,5 \cdot 0,7 \cdot SC$
Combinações baseadas no EN 1990	Equação
Combinação 5	$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot SC + 1,5 \cdot 0,6 \cdot V$
Combinação 6	$1,35 \cdot G + 1,5 \cdot V + 1,5 \cdot 1,0 \cdot SC$

Onde:

G: Peso próprio de todos os elementos; PP: Peso próprio da estrutura metálica; COB: Peso próprio da cobertura metálica; FOR: Peso próprio do forro e instalações; LAJE: Peso próprio da Laje; REV: Revestimento; ALV: Alvenaria; SC: Sobrecarga de utilização; V: Vento.

3 Resultados e Discussões

Observa-se que as combinações 1 e 5 são equivalentes, apresentando os mesmos coeficientes de ponderação e combinação, pois na combinação 1 as ações permanentes foram consideradas em conjunto e o coeficiente de combinação da ação variável secundária é o mesmo. No entanto, as combinações 2 e 6 não são equivalentes, distinguindo-se pelo coeficiente de combinação para a ação variável secundária. Como já citado, os coeficientes ψ_0 , presentes no Quadro A1.1 do EN 1990 (CEN, 2009), se mostraram mais conservadores que os apresentados na Tabela 6 da NBR 8681 (ABNT, 2003). Na norma europeia são apresentadas 08 (oito) categorias de utilização, enquanto na norma brasileira são apresentados apenas 03 (três) tipos, com valores inferiores ou iguais aos da equivalente europeia. Na prática, não há minoração da sobrecarga (ação variável secundária) na combinação 6 por se tratar de carga de armazenamento.

Não há na norma europeia combinações equivalentes às combinações 3 e 4. Nelas as cargas permanentes foram consideradas separadamente, atribuindo-se para cada ação um coeficiente de ponderação de acordo com o tipo de ação permanente, o que não é permitido pelo EN 1990.

Após análise estrutural para as seis combinações descritas na Tabela 2 foram obtidos os resultados listados na Tabela 3. Foram compilados os resultados para viga secundária, viga principal, pilar e tirante de contraventamento destacados nas Figuras 2 e 4. Para esforço normal, o sinal negativo representa tração e o positivo compressão. É importante ressaltar que para as vigas secundárias, os valores de momento fletor e esforço cortante serão numericamente iguais por se tratar de viga simplesmente apoiada com vão de 4 m. Como esperado, as combinações 1 e 5 apresentaram os mesmos valores de esforços solicitantes, pois apresentam os mesmos coeficientes de ponderação e de combinação. Comparando as combinações 2 e 6, observa-se que a 6 apresenta maiores valores de esforços, exceto para a diagonal comprimida, que apresentou valor bem próximo, apenas 0,46% abaixo do valor apresentado na combinação 2. Isso ocorre porque estes elementos são solicitados apenas pelas cargas de vento, que possuem o mesmo coeficiente γ_q nas duas combinações.

Tabela 3 – Esforços nos elementos estruturais representativos.

Combinação	Vigas Secundárias		Vigas Principais		Pilares	Diagonais
	M_{Sd} (kN.m)	V_{Sd} (kN)	M_{Sd} (kN.m)	V_{Sd} (kN)	N_{Sd} (kN)	N_{Sd} (kN)
Combinações baseadas na NBR 8681						
Combinação 1	85,07	85,07	687,55	258,7	920,17	-70,47
Combinação 2	66,17	66,17	536,35	202	754,38	-119,47
Combinação 3	85,74	85,74	692,35	260,44	925,91	-65,56
Combinação 4	66,84	66,84	541,15	203,74	762,38	-111,33
Combinações baseadas no EN 1990						
Combinação 5	85,07	85,07	687,55	258,7	920,17	-70,47
Combinação 6	85,07	85,07	687,55	258,7	920,17	-118,92

Dentre as combinações que apresentam a sobrecarga como ação variável principal (combinações 1, 3 e 5), não há diferenças significativas, apresentando diferença de 0,79% nos esforços das vigas secundárias, 0,68% nas vigas principais, 0,62% nos pilares. Para as combinações 2, 4 e 6 que apresentam o vento como ação variável principal, a combinação 6 foi a mais conservadora em relação à 2 e 4, estas últimas possuem valores próximos. As diferenças entre os valores resultantes da combinação 6 e os resultantes das combinações 2 e 4 foram da ordem de 27% nos esforços das vigas secundárias e primárias e 20% nos pilares.

Os valores de esforços obtidos para as combinações 5 (ou 1) e 6 foram os mesmos, exceto para os tirantes. Isso se deve ao fato de o valor do coeficiente de combinação da sobrecarga de utilização para carga de armazenamento na norma europeia ser 1, ou seja, não há minoração desta carga quando ela é considerada como ação variável secundária, e também porque os pilares são rotulados na base, logo, não apresentam momentos em sua base. Sendo assim, a ação do vento gera esforço unicamente nos tirantes, sendo que

na combinação 5 esta ação é considerando de forma minorada, mas na combinação 6 já não é.

Em todos os casos comparados, observa-se que os valores de tração das diagonais de travamento têm diferença diretamente proporcional aos coeficientes de combinação das cargas de vento, que é da ordem de 7,4% e por terem esforços internos diretamente proporcionais às cargas laterais.

4 Conclusões

A norma brasileira apresenta 03 (três) formulações para combinações em estado limite último: a normal, especial ou de construção e a excepcional. Já a norma europeia apresenta 05 (cinco) equações, sendo 03 (três) gerais, uma accidental e uma para ações sísmicas, fazendo com que o EN 1990 abranja mais situações de cálculo.

Entretanto, para as cargas permanentes, a norma europeia apresenta apenas um fator de ponderação γ_g de acordo com a combinação escolhida, enquanto a norma brasileira apresenta diversos valores, de acordo com a natureza do carregamento permanente, e ainda permitindo um coeficiente único para todas as cargas permanentes agrupadas. No EN 1990 há a possibilidade do uso de um fator redutor ξ para cargas permanentes desfavoráveis. A NBR 8681 não prevê nenhum coeficiente semelhante. Nas cargas variáveis, o Eurocode se mostra mais conservador que a NBR, apresentando coeficientes ψ_0 com maior valor e mais categorias de utilização.

A partir do estudo de caso, pode-se observar que as combinações de ELU normal com cargas permanentes agrupadas e não agrupadas da NBR 8681, representadas nas combinações 1 e 3, que tem a sobrecarga como ação variável principal e na 2 e 4, onde o vento é a ação principal, possuem diferença inferiores a 1% entre as formas agrupadas e não agrupadas, exceto nas diagonais. A diferença de esforços nestes elementos se deve ao coeficiente de combinação para as ações variáveis. Para as combinações de STR do EN 1990 obtiveram-se os mesmos esforços tanto considerando a sobrecarga de utilização quanto considerando o vento como ação variável principal, exceto para as diagonais, onde foi observada diferença de valores da ordem de 60%. Nesse trabalho não foram analisadas diferenças entre os momentos fletores dos pilares, pois como citado no item “Metodologia”, considerou-se para o dimensionamento pilares rotulados em sua base de forma a não transmitir momento fletor para as fundações.

Os valores as combinações 1 e 3 (NBR 8681) possuem semelhança e com a 5 (EN 1990). Nos casos das combinações 2 e 4 (NBR 8681) e 6 (EN 1990) há diferença significativa, da ordem de 27% entre as duas normas. Nos dois casos, as diagonais apresentam resultados afastados em cerca de 7%.

No caso estudado, tendo o vento como ação principal a norma europeia mostrou-se conservadora, apresentando maiores valores para os esforços nos principais elementos estruturais. Isso se deve ao fato do coeficiente de combinação para a sobrecarga de utilização em estudo (armazenamento) ser 1, não havendo assim minoração da carga. Já para as combinações que têm a sobrecarga como ação variável principal, a norma europeia se mostrou tão conservadora quanto a brasileira ao considerar as ações permanentes de forma agrupada.

5 Referências

CASTRO, L. A. de, **Análise da segurança no projeto de estruturas: método dos estados limites**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, SP, Brasil, 1997.

FUSCO, P. B., **Estruturas de concreto: Fundamentos do Projeto Estrutural**. Ed. Da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1976.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento - NBR 8681**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

Comitê Europeu de Normalização, **Bases para o projeto de estruturas – EN 1990**, Bruxelas, Bélgica, 2009.

Comitê Europeu de Normalização, **Projeto geotécnico – EN 1997**, Bruxelas, Bélgica, 2007.

GULVANESEAN, H., **Designer's Guide to EN 1990 Eurocode: Basis of Structural Design**. 1st ed. Londres, Thomas Telford, 2002.

GULVANESEAN, H.; HOLICKY, M., **Eurocodes: using reliability analysis to combine action effects**. Structures & Buildings, v. 158, n. SB4, 2005; p. 243-252.

BOND, A. J.; BROOKER, O.; HARRIS, A. J.; HARRISON, T.; MOSS, R. M.; NARAYANAN, R. S.; WEBSTER, R., **How to design concrete structures using Eurocode 2**. The Concrete Centre, 2006.

GULVANESEAN, H., **EN 1990 Eurocode – Basis of structural design**. Civil Engineering, v. 144, 2001; p. 8-13.

SANTOS, R. dos; VITO, M., **Estudo comparativo entre o dimensionamento de estruturas articuladas em aço para treliça em arco pela NBR 8800:2008, Eurocode 3 e Ansi/Aisc 360-05**. Projeto de Graduação, Universidade do Extremo Sul Catarinense/UNESC, Criciúma, SC, Brasil, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Ações para o cálculo de estruturas de edificações - NBR 6120**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Forças devidas ao vento em edificações - NBR 6123**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1988.