

ANÁLISE DE PADRÕES PARA ESTUDO DE ALTERNÂNCIA DE CARGAS

Filipe Faria Fornazari (UEPG) E-mail: filipe.3f@hotmail.com

Gabriela Mazureki Campos (UEPG) E-mail: gabrielamazureki@gmail.com

Nelson Luiz Madalozzo (UEPG) E-mail: nmadalozzo@uol.com.br

Silvio Alexandre da Luz (UEPG) E-mail: silvio_alexandre_sal@hotmail.com

Resumo: O estudo de alternância de cargas objetiva obter os valores de esforços mais desfavoráveis possíveis de ocorrer na estrutura, devido às várias possibilidades de aplicação da carga variável às quais pode ser submetida. Consiste em exigência, por vezes ignorada, da norma ABNT NBR 6118 para o desenvolvimento de projetos de estruturas em concreto armado. No entanto, não constam da Norma quaisquer orientações de como se realizar tal estudo, bem como há uma sensível ausência de literatura nacional que verse a respeito. O objetivo desta pesquisa consiste, portanto, na proposição de padrões possíveis de serem seguidos quando da necessidade desse estudo. Tal pesquisa é desenvolvida através da análise de vigas extraídas de um lançamento estrutural concebido para validar o estudo com uma situação plenamente observável na prática. A análise consiste na obtenção dos diagramas de momento fletor para todas as configurações de carregamento a que algumas dessas vigas possam ser submetidas, na identificação de quais configurações contribuem com valores críticos de momento e na comparação dos padrões obtidos com considerações da literatura internacional sobre o tema. Os resultados confirmaram as proposições de duas Normas europeias sobre o tema, a BS 8110 e a EC 2.

Palavras-chave: Alternância de Cargas, Normas, Estruturas de Concreto Armado.

Analysis of patterns to the study of alternating loads

Abstract: The study of alternating loads aims to get the most unfavorable values of effort that may occur in the structure, due to the several possibilities of live load application it may be subjected to. Consists of demand sometimes ignored of ABNT NBR 6118 for design of reinforced concrete structures. However, the Standard doesn't explain how to conduct this study, as well as there is a noticeable absence of Brazilian literature about the subject. The objective of this research is, therefore, to propose patterns to be followed when this study is necessary. This search is conducted by analyzing beams extracted from an idealized structure designed to validate the study as a situation fully observable in practice. The analysis consists in obtaining the bending moment diagrams for all load configurations that some of these beams can be subjected to, in order to identify which configurations contribute with critical values of bending moment and to compare the patterns obtained with considerations of international literature. The results confirmed the propositions of two European standards on the topic, BS 8110 and EC 2.

Keywords: Alternating Loads, Standards, Reinforced Concrete Structures.

1. INTRODUÇÃO

A consideração da alternância de cargas em estruturas de concreto armado é exigida pela NBR 6118/2007 para os casos em que a carga variável que as solicitem seja superior a 20% da carga total. Tal determinação implica em que os diagramas de esforços cortantes e de momentos fletores a serem considerados para dimensionamento não correspondam à situação em que a viga está sob carregamento pleno, mas sim à composição dos piores esforços resultantes das várias situações de carregamento a que a peça estrutural possa estar submetida.

Não obstante a Norma determine o estudo de alternância de cargas, ela não provê qualquer orientação adicional de como deve ser efetuado esse estudo, deixando-o a total critério do projetista. Uma interpretação primária desse fato poderia entender ser necessário calcular todas as configurações possíveis de carregamento para qualquer peça estrutural, o que poderia se tornar impossível ou inviável em alguns casos. Frise-se aqui que tais configurações de carregamento não se tratam das combinações de ações de diferentes tipos, das quais trata a

seção 11 da NBR 6118/2007, mas sim das situações em que uma peça estrutural pode ter trechos variáveis de sua extensão carregados ou descarregados em momentos diferentes.

Constatada uma sensível ausência de literatura nacional que verse sobre o tema, o objetivo deste estudo consiste em propor padrões à realização da análise de alternância de cargas, a qual é por vezes ignorada por projetistas estruturais, ainda que a necessidade de sua aplicação seja frequente, devido ao rigor do critério adotado pela Norma. Para convalidar este estudo como situação observável na prática, a análise se desenvolve sobre uma estrutura hipotética de um depósito, permitindo observar a aplicação direta dos padrões obtidos como resultado deste estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O item da NBR 6118/2007 em que é exigida a consideração da alternância de cargas em estruturas de concreto armado é o 14.6.7.3, o qual afirma que “para estruturas de edifícios em que a carga variável seja no máximo igual a 20% da carga total, a análise estrutural pode ser realizada sem a consideração de alternância de cargas.”, evidenciando que aquelas que possuem carga variável superior a esse limite devem ter alternância de cargas considerada. Para tanto, a sobrecarga deve ser disposta nos painéis de lajes e nos vãos das vigas segundo os arranjos que originem os valores mais desfavoráveis de esforços na estrutura (COVAS & MELCHIOR, 2009). Quanto à organização desses arranjos, ou à existência de padrões para obtenção de tais valores, há uma sensível ausência de informações sobre o tema na literatura nacional, sendo necessário buscá-las na literatura internacional.

Tal foi encontrado no conteúdo de duas Normas europeias: a BS 8110 (*British Standard 8110*) e aquela que a substituiu, a EN 1992, ou EC2, designada *Eurocode 2: Design of concrete structures*. Segundo Reynolds; Steedman e Threlfall (2008), em ambas as Normas, os máximos momentos positivos a serem considerados para dimensionamento são obtidos a partir de apenas duas situações de carregamento: uma com carga variável em todos os vãos ímpares e outro com carga variável em todos os vãos pares. Quanto à determinação dos máximos momentos fletores negativos, segundo Reynolds; Steedman e Threlfall (2008),

[...] ambas BS 8110 e EC 2 consideram uma incidência menos severa de carga variável ao determinar os momentos máximos negativos nos apoios. De acordo com a BS 8110, o único caso que necessita ser considerado é aquele em que todos os vãos são carregados. De acordo com a EC 2, todos os casos com dois vãos adjacentes carregados devem ser considerados [...]

Quando da determinação dos máximos momentos fletores negativos, a EC 2 prevê ainda a consideração opcional de mais uma situação de carregamento, em que os vãos adjacentes ao par carregado estão descarregados e os adjacentes a estes estão carregados. Cita-se também que, não obstante os padrões da Norma continental EC 2 sejam mais detalhados do que os da BS 8110, o *UK National Annex*, anexo específico da EC2 para os países do Reino Unido, permite que estes utilizem os arranjos da antiga Norma britânica como alternativa aos do documento base.

Todas essas considerações das Normas europeias citadas, quanto à determinação dos momentos fletores máximos, estão resumidas na figura 1.

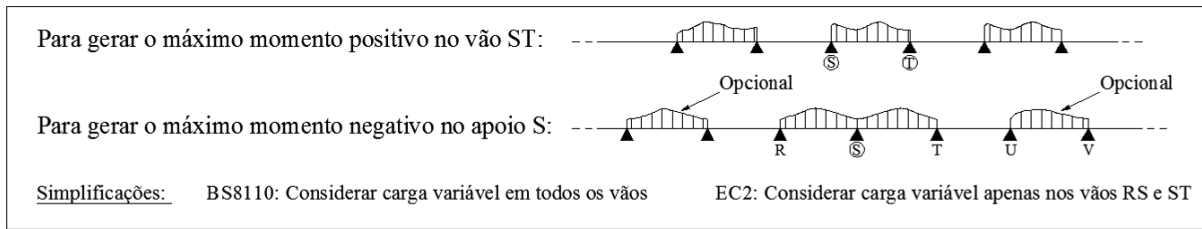


Figura 1 – padrões de cargas variáveis segundo as normas BS 8110 e EC2. Adaptado de Reynolds; Steedman e Threlfall, 2008.

3. METODOLOGIA

3.1 Contextualização do Estudo

A fim de demonstrar a aplicação direta do estudo realizado, objetivou-se que este fosse desenvolvido a partir de uma estrutura plenamente praticável. Assim, para se obter os padrões à análise de alternâncias de carga, realizou-se o estudo sobre a estrutura hipotética de um depósito, a qual é representada na figura 2.

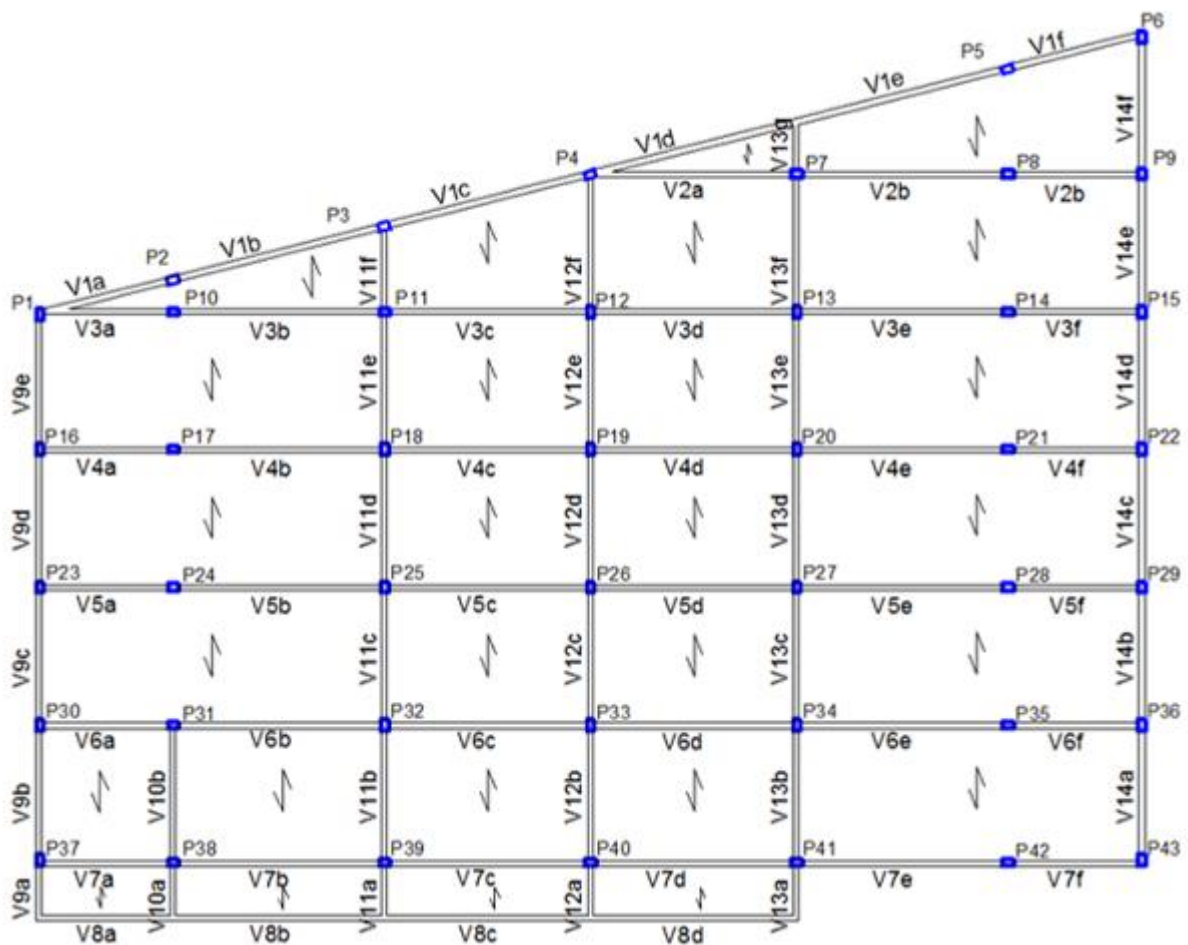


Figura 2 – estrutura hipotética do depósito. Os autores, 2013.

As lajes dessa estrutura foram consideradas do tipo treliçada unidirecional, para favorecer o estudo da alternância de cargas com foco nas vigas da estrutura. O lançamento estrutural foi pensado para um depósito de supermercado localizado no pavimento superior a um estacionamento, o que gerou vigas com grandes sobrecargas e vãos da ordem de 5,0 ou 7,5

metros. Objetivou-se também, na concepção da estrutura, a criação de algumas vigas em condições diferentes das demais, o que foi obtido com o desenho do depósito esconso aos fundos e da destinação dos panos de laje a diferentes utilizações.

Desse modo, os panos de laje foram divididos em três grupos segundo sua destinação: LAJE1, que contém os panos de laje que sustentam um hipotético corredor e cuja sobrecarga de Norma é de 3 kN/m^2 ; LAJE2, com panos que sustentam escritórios e banheiros cuja sobrecarga de Norma é de 2 kN/m^2 ; e LAJE3, com os panos de laje que sustentam o depósito e para os quais se atribuiu sobrecarga tão alta quanto se julgou condizente com a solução estrutural adotada. A distribuição desses grupos na estrutura pode ser observada na figura 3.

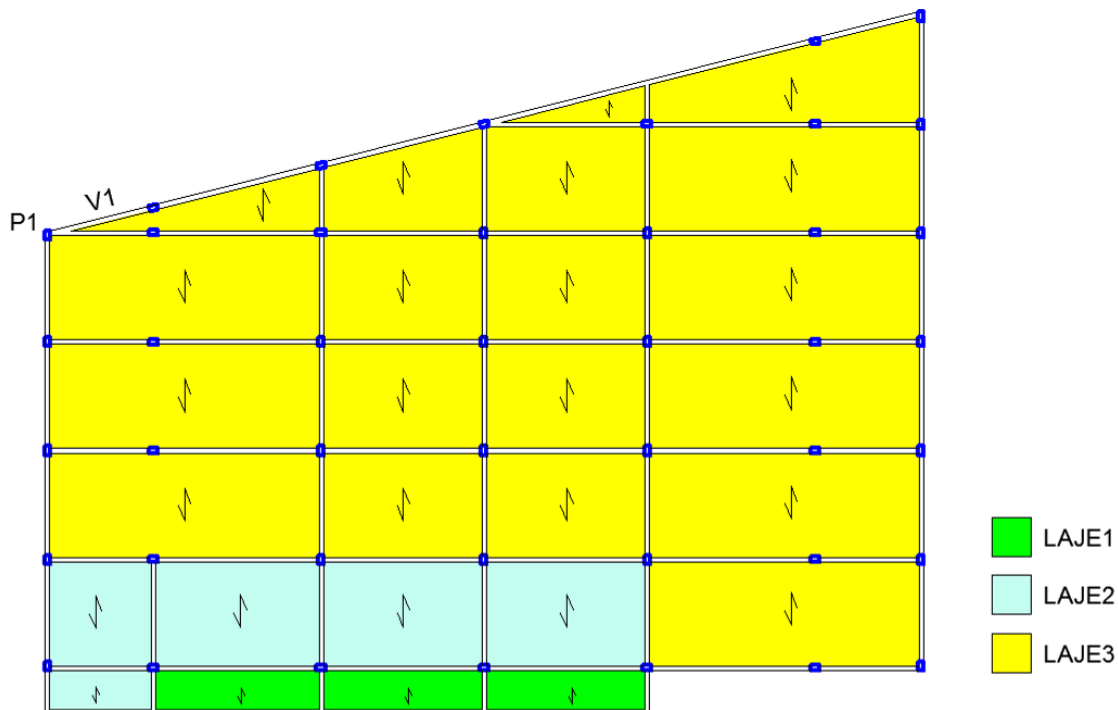


Figura 3 – grupos de lajes. Os autores, 2013.

Observa-se que as vigas que recebem cargas variáveis significativas são as transversais à direção das vigotas das lajes treliçadas (vigas de 1 a 8), de modo que sobre essas se realizou o estudo, enquanto as demais apenas foram representadas para garantir o caráter prático da estrutura concebida, uma vez que tais vigas teriam função de conferir estabilidade global em uma estrutura real.

Considerando a seção transversal de $(20 \times 80) \text{ cm}$, o que resulta em peso próprio de 4 kN/m , e uma carga permanente de alvenaria para as vigas que delimitam os escritórios, banheiro e corredor, além de valores arbitrados para outras cargas referentes às lajes, permanentes ou variáveis, obtiveram-se as configurações de carregamento pleno para as oito vigas, bem como as oito configurações “descarregadas”, ou seja, sem sofrer a ação da carga variável, as quais estão representadas na figura 4 da página seguinte. Para obter tais representações gráficas dos carregamentos, bem como os diagramas de esforços que geram, utilizou-se o software livre Trame 4.0.

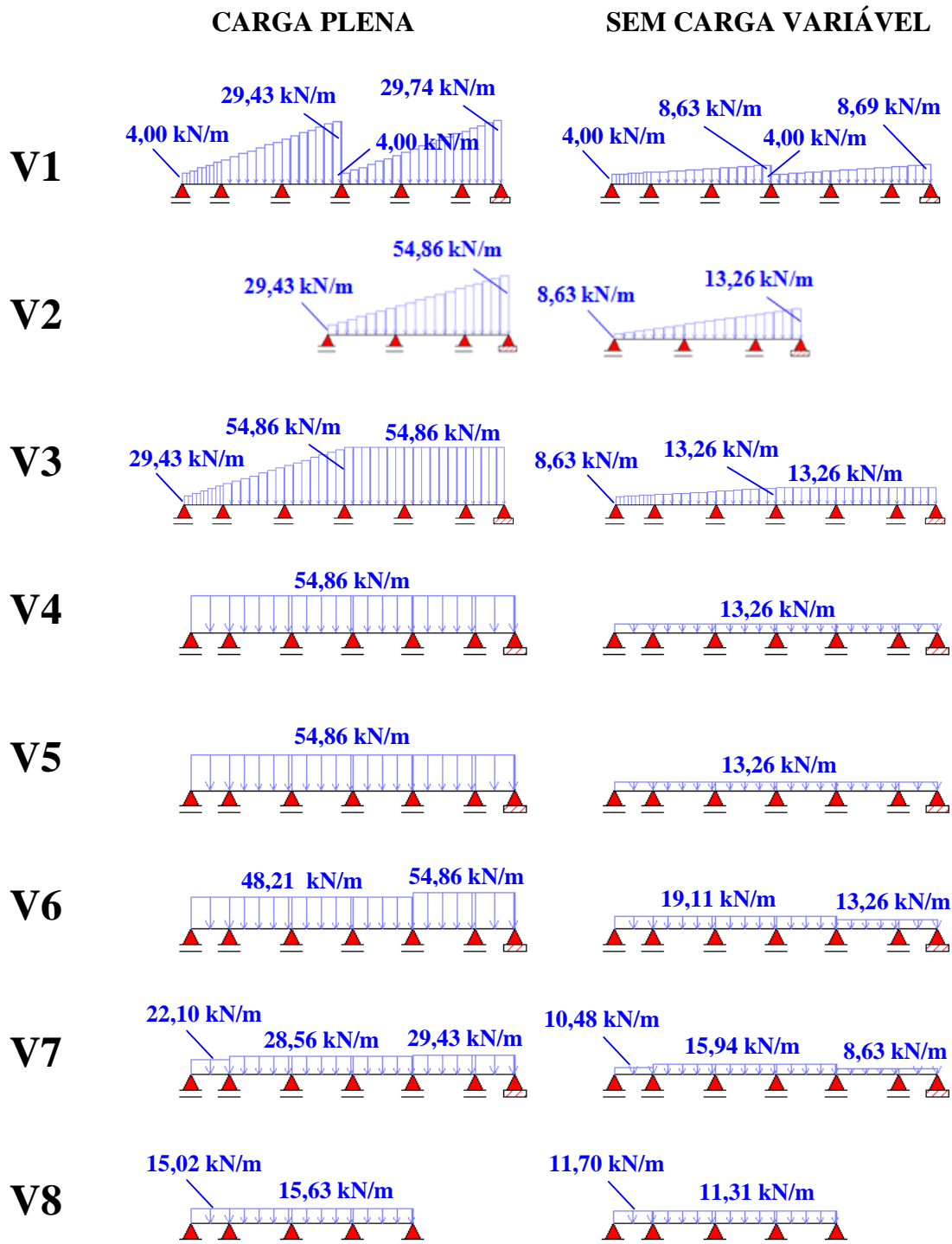


Figura 4 – configurações de carregamento. Os autores, 2013.

3.2 Critérios para o estudo de alternância de cargas

Como primeiro critério a ser determinado no estudo de alternância de cargas, definiu-se, em concordância com as Normas europeias citadas na Revisão Bibliográfica, que os trechos de viga que podem estar simultaneamente carregados ou descarregados são limitados à extensão total dos tramos da própria viga. Ou seja, não se considerou que um tramo de uma viga possa sofrer variação da sobrecarga em um trecho parcial de sua extensão, mas apenas em sua totalidade. Na estrutura estudada, isso significa considerar que o depósito tem seus panos de laje carregados independentemente.

Em seguida, entendeu-se ser necessário obter os diagramas de esforços para todas as combinações possíveis de tramos carregados/descarregados para algumas vigas, convenientemente escolhidas, das quais seria possível extrapolar as conclusões observadas como padrões às demais. Para tanto, separaram-se as vigas da estrutura do depósito em dois grupos, dos quais se tomou uma viga representativa para cada: a viga 1, a qual representa as que possuem carregamento pleno assimétrico e desuniforme (vigas 1 a 3); e a viga 4, idêntica à 5, que representa aquelas que possuem carregamento pleno simétrico ou próximo disso (vigas 4 a 8).

Como essas vigas possuem seis tramos que podem se encontrar ora carregados ora descarregados, as possibilidades de carregamento são iguais a $2^6 = 64$ configurações. Para a viga 4, no entanto, é possível obter os diagramas para apenas 35 configurações e considerar os seus simétricos na composição do diagrama de piores esforços.

Para nomear tais configurações de carregamento, convencionou-se designá-las por sequências de caracteres em que cada um corresponde a um vão da viga, bem como à letra “D”, quando o tramo está descarregado, ou “C”, quando o tramo está carregado. Deste modo, a combinação CCCCCC corresponde ao carregamento pleno e a combinação CDCDCD indica que apenas os vãos ímpares estão carregados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise para a viga 4 (simétrica)

As 35 configurações calculadas para a viga 4, estão descritas no quadro 1.

QUADRO 1 – As 35 configurações de carregamento para a viga 4.

6 tramos carregados	CCCCCC
5 tramos carregados	DCCCC; CDCCCC; CCDC
4 tramos carregados	DDCCCC; CDDCCC; CCDDCC; DCDDCC; CDCDCC; DCCDC; DCCDC; CDCDC; DCCDC
3 tramos carregados	DDDCCC; CDDCCC; DCDDCC; CDCDDC; CCDCDD; DCCDDC; CDCCDD; DCDDCD; DCDCDC
2 tramos carregados	CCDDDD; DCCDD; DCCDD; CDCDD; DCDCDD; CDDDCD; CDDDCD; DCDDCD; CDDDC
1 tramo carregado	CDDDD; DCDD; DDCDD
0 tramos carregados	DDDD

Fonte: os autores.

Lançados os carregamentos do quadro anterior na interface do software livre Trame 4.0, é possível observar graficamente as 35 configurações de carregamento, como mostra a figura 5.

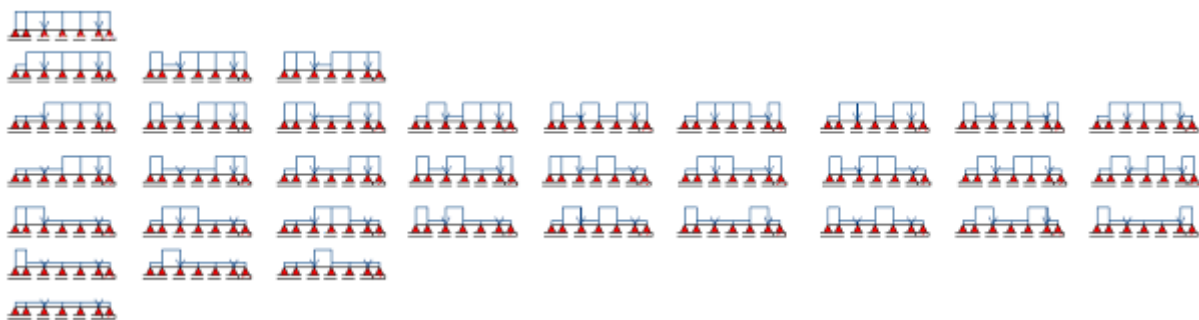


Figura 5 – combinações possíveis de carregamento para a viga 4. Os autores, 2013.

Os diagramas de momentos fletores resultantes dessas combinações foram sobrepostos e analisados de modo que se obtiveram os piores valores possíveis de ocorrer em todos os vãos ou apoios. Foram apenas quatro configurações que contribuíram com ao menos um valor entre os maiores: CDCDCC, CDCCDC, DCDCCD e DCDCDC, bem como suas situações simétricas (CCDCDC, DCCDCD e CDCDCD), não contidas entre as 35 anteriores. Os diagramas respectivos são apresentados no quadro 2 a seguir, em que se destacam também os pontos em que a combinação contribuiu com um valor crítico de momento.

QUADRO 2 – Diagramas das combinações que contribuíram à composição do diagrama de cálculo

Situação	Diagrama	Simétrica	Diagrama
CDCDCC		CCDCDC	
CDCCDC		idêntica	idêntico
DCDCCD		DCCDCD	
DCDCDC		CDCDCD	

Fonte: os autores.

Observe-se que todos os momentos positivos máximos foram gerados a partir das duas situações em que os vãos carregados e descarregados estão alternados (ora sendo os vãos ímpares carregados, ora os vãos pares), exatamente como disposto nas Normas BS 8110 e EC2. Devido à magnitude das sobrecargas da estrutura estudada, essas duas situações ainda forneceram valores críticos de momentos negativos nos vãos, a serem considerados no dimensionamento. Quanto aos momentos negativos nos apoios, seus valores críticos advieram das situações em que os dois vãos adjacentes aos apoios estavam carregados e os demais estavam descarregados e carregados alternadamente, como disposto na Norma EC2, ainda que como consideração opcional.

Ao se fazer a composição dos resultados das sete configurações obtidas como padrão às vigas desse grupo, obtém-se um diagrama cuja envoltória caracteriza a condição de cálculo para a viga 4:

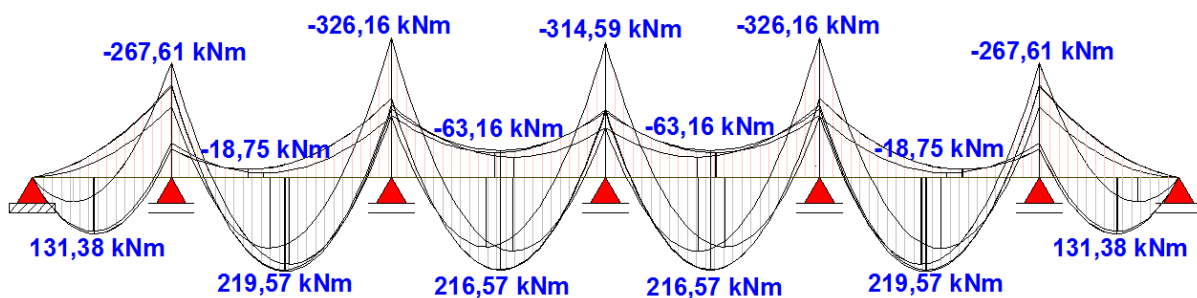


Figura 6 – composição dos diagramas com os valores críticos de dimensionamento à flexão. Os autores, 2013.

4.2 Análise para a viga 1 (assimétrica)

As 64 configurações calculadas para a viga 1, estão descritas no quadro 3.

QUADRO 3 – As 64 configurações de carregamento para a viga 1.

(continua)

	Carga plena:	CCCCC	Sem sobrecarga:	DDDDDD
Um ou dois tramos carregados				
CDDDDD				
DCDDDD	CCDDDD			
DDCDDD	CDCDDD	DCCDDD		
DDDCDD	CDDCDD	DCDCDD	DDCCDD	
DDDDCD	CDDDCD	DCDDCD	DDCDDC	DDDCDD
DDDDDC	CDDDDC	DCDDDC	DDCDDC	DDDCDD
Quatro ou cinco tramos carregados				
DCCCC				
CDCCCC	DDCCCC			
CCDCCC	DCDCCC	CDDCCC		
CCCDCC	DCCDCC	CDCDCC	CCDDCC	
CCCCDC	DCCCCD	CDCCDC	CCDCDC	CCCDDC
CCCCCD	DCCCCD	CDCCCD	CCDCCD	CCCDCD

QUADRO 3 – As 64 configurações de carregamento para a viga 1.

(conclusão)

Três tramos carregados					
CCCDD	CDCCDD	CDCDDC	DDDC	DCDDCC	DCDCCD
CCDCDD	CDDCCD	CDDDC	DDCDDC	DCCDDC	DCCCDD
CCDDCD	CDDCDC	CDCDCD	DDCCDC	DCCDCD	DCDCDC
CCDDDC			DDCCD		

Fonte: os autores.

Lançadas as configurações de carregamento na interface do Trame 4.0, é possível observar graficamente as configurações de carregamento organizadas conforme sua disposição no quadro anterior, excetuando as de carga plena e totalmente descarregada, como mostram as figura 7, 8 e 9.

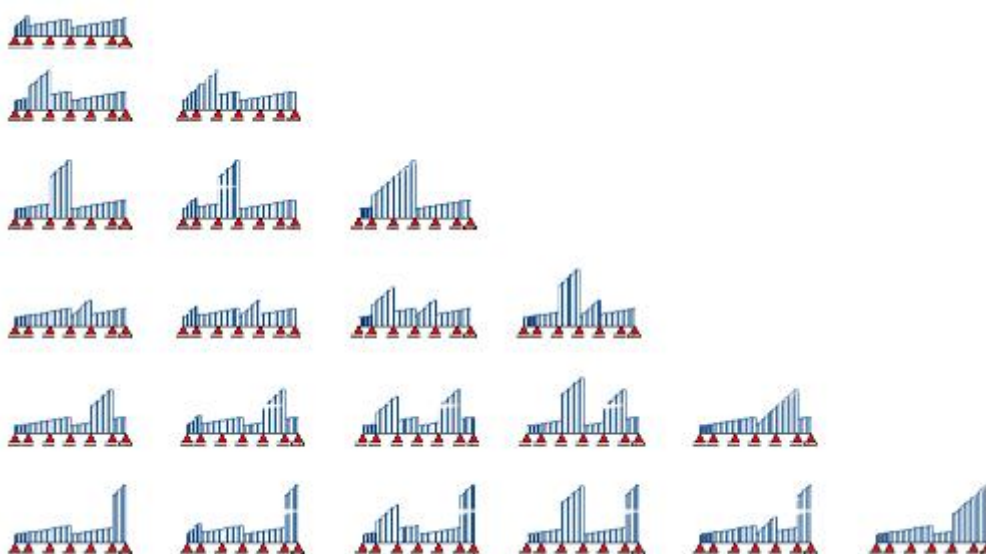


Figura 7 – configurações com um ou dois tramos carregados. Os autores, 2013

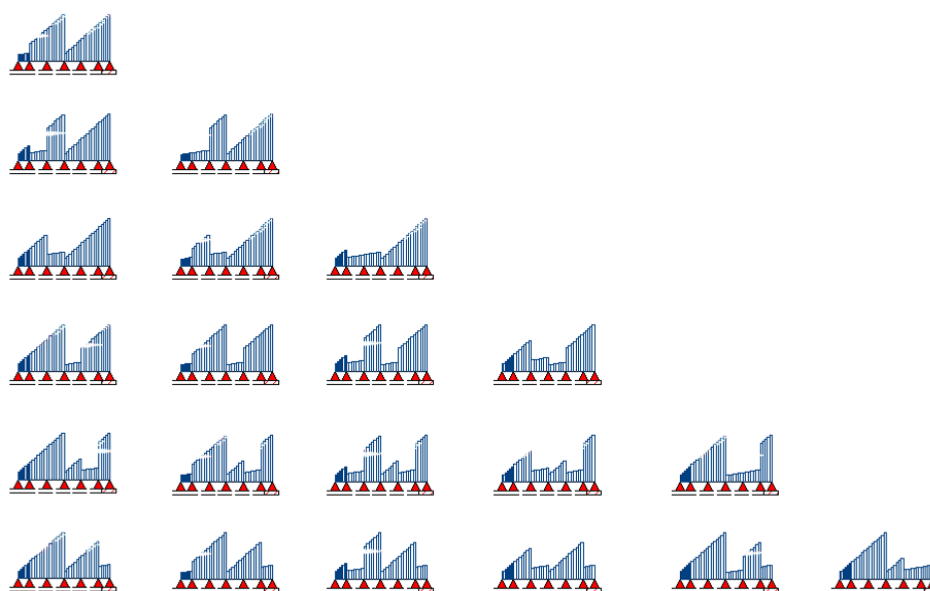


Figura 8 – configurações com quatro ou cinco tramos carregados. Os autores, 2013

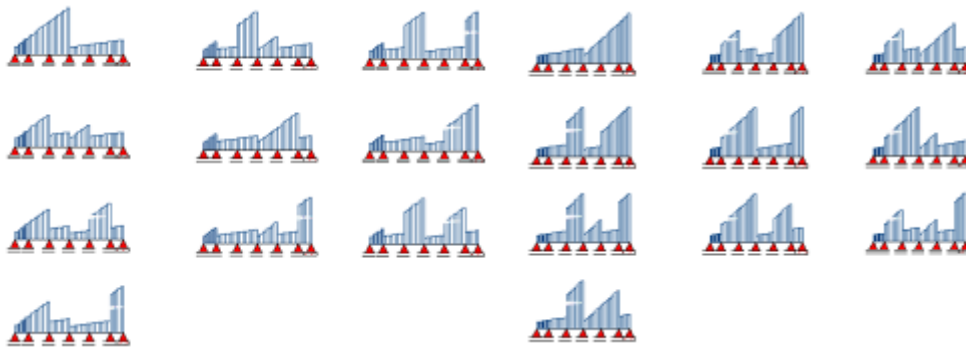


Figura 9 – configurações com três tramos carregados. Os autores, 2013

Analisados e comparados os diagramas de momento fletor das 64 configurações de carregamento, aquelas que contribuíram com ao menos um valor de momento crítico que compõe o diagrama de cálculo foram, ao contrário do que se esperava, face à característica de carregamento atípico e absolutamente assimétrico da viga 1, as mesmas sete que resultaram da análise da viga 4. São elas: CDCDCC, CDCDC, CCDCDC, DCCDCD, DCDCDD, CDCDCD e DCDCDC. Os diagramas dessas situações são contidos no quadro 4, em que também se destacam os pontos em que a combinação contribuiu com um valor crítico de momento.

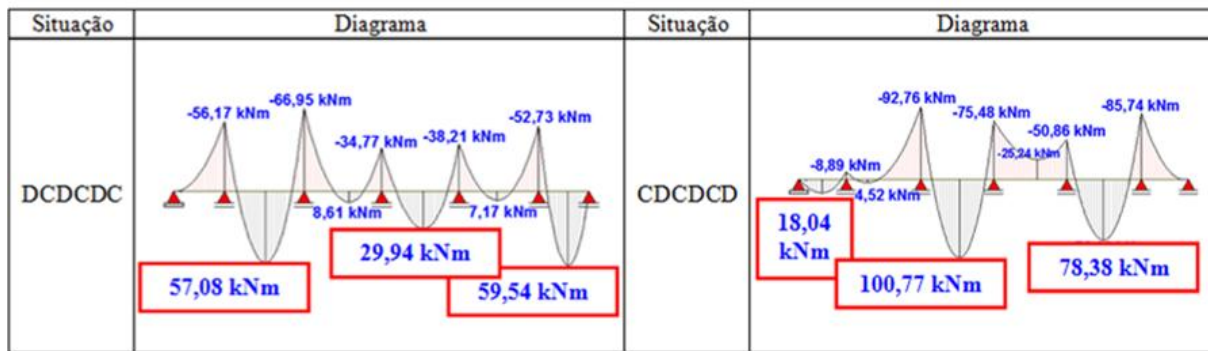
QUADRO 4 – Diagramas das combinações que contribuíram à composição do diagrama de cálculo

(continua)

Situação	Diagrama	Situação	Diagrama
CDCDCC		CCDCDC	
CDCDC		-	-
DCDCDD		DCCDCD	

QUADRO 4 – Diagramas das combinações que contribuíram à composição do diagrama de cálculo

(conclusão)



Fonte: os autores.

As Normas europeias não recomendam suas proposições a vigas com grandes variações na extensão dos vãos ou na ordem dos carregamentos de cada tramo. No entanto, observe-se que todos os valores críticos de momentos negativos seguiram a regra da EC2, advindo das situações em que os dois vãos adjacentes aos apoios estavam carregados e os demais estavam descarregados e carregados alternadamente, bem como os momentos positivos advieram das duas situações de carregamento alternado (CDCDCD e DCDCDC).

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE

Como a análise de ambas as vigas 1 e 4 resultaram nas sete configurações de carregamento que confirmam as proposições das Normas internacionais BS 8110 e a EC 2, a consideração dessas situações seria o padrão a ser extrapolado para ambos os grupos de vigas da estrutura hipotética do depósito. Ou seja, os diagramas de esforços a serem considerados no dimensionamento das vigas 1 a 7 do depósito são aqueles resultantes da composição dos diagramas de esforços para as sete situações de carregamento descritas.

Para viga 8, com quatro vãos, calcularam-se todas as suas 16 configurações possíveis de carregamento e sobrepueram-se seus diagramas, resultando num diagrama de valores críticos de momento, cujas configurações que lhes deram origem resultaram nas esperadas segundo as proposições das Normas, ou seja, CCDC, DCCD e CDCC para os máximos momentos negativos, e CDCD e DCDC, para os máximos momentos positivos. Tal confirma as proposições das normas europeias citadas como padrões possíveis de serem adotados no estudo de alternância de cargas de uma peça estrutural.

Note-se que esse padrão à análise de alternância de cargas conferido pelas Normas europeias permite prever quantas e quais configurações de carregamento precisariam ser calculadas para obter os piores valores de esforços possíveis para vigas com n vãos. Esse número é $(n + 1)$, uma vez que cada momento negativo crítico nos apoios centrais é gerado por uma configuração e todos os positivos críticos são gerados por duas configurações (as de carregamento alternado).

A fim de aprofundar a análise, lembrou-se, ainda, de que as Normas permitem simplificações na consideração dos máximos momentos negativos. A BS 8110 permite que os valores críticos dos momentos negativos sejam tomados diretamente da situação de carregamento pleno, enquanto a EC 2 permite que tais valores sejam tomados das configurações em que apenas os dois vãos adjacentes a cada apoio estejam carregados. Para analisar as consequências dessas considerações, recorreu-se à análise das vigas 1 e 4 e compararam-se os valores críticos de momento para as sete situações resultantes da análise com os valores obtidos com as simplificações das Normas. Os resultados estão expressos no Quadro 5.

QUADRO 5 – Comparação dos máximos momentos negativos segundo as simplificações propostas

		Apoio	2	3	4	5	6
Momentos fletores negativos (kNm)							
Viga 1	Sem simplificações		59,79	124,88	98,19	81,73	109,91
	Simplificado segundo a BS 8110		43,11	120,48	79,94	60,44	104,96
	Diferença percentual		27,90	3,52	18,59	26,05	4,50
	Simplificado segundo a EC 2		58,74	122,24	96,17	79,5	105,39
	Diferença percentual		1,76	2,11	2,06	2,73	4,11
Viga 4	Sem simplificações		267,61	326,16	314,59	326,16	267,61
	Simplificado segundo a BS 8110		227,06	277,90	246,78	277,90	227,06
	Diferença percentual		15,15	14,80	21,56	14,80	15,15
	Simplificado segundo a EC 2		257,17	317,09	307,00	317,09	257,17
	Diferença percentual		3,90	2,78	2,44	2,78	3,90

Fonte: os autores.

Observa-se que a simplificação permitida pela BS 8110 fornece valores de momentos negativos significativamente abaixo dos críticos, com diferenças superiores a 20% em alguns casos, de modo que sua consideração, em detrimento das sete situações obtidas, iria contra a segurança. Quanto à simplificação permitida pela EC 2, sua adoção conduz a valores abaixo dos críticos, mas com diferenças percentuais pouco significativas. Note-se, no entanto, que a adoção dessa simplificação não reduz o número de sete situações (no caso de vigas contínuas de seis tramos), mas apenas substitui quatro dessas configurações.

5. CONCLUSÃO

Obtiveram-se os padrões ao estudo de alternância de cargas, na forma das proposições das Normas internacionais BS 8110 e EC 2, confirmadas por sete configurações de carregamento que resultaram da análise de todas as 64 possibilidades de carregamento para vigas contínuas de seis tramos de diferentes carregamentos e extensões de vãos. Tais vigas foram extraídas de uma estrutura hipotética, mas plenamente praticável, o que demonstra como os padrões propostos são plenamente aplicáveis ao estudo de alternância de cargas em situações práticas. No entanto, permanece a ressalva de que sejam aplicados a vigas com carregamento simétrico ou não demasiadamente assimétrico, uma vez que são inesgotáveis as possibilidades de carregamento que se lhes podem atribuir.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. p. 84. Rio de Janeiro: 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. p. 3-4. Rio de Janeiro: 1980.

COVAS, N. & MELCHIOR, A. *TQS – Alternância de Cargas*. 2009. Disponível em < <http://www.tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/20-cargas-vento/213-alternancia-de-cargas?format=pdf>>. Acesso em: 10 julho 2013.

REYNOLDS, C. E.; STEEDMAN, J. C. & THRELFALL, A. J. *Reynolds's Reinforced Concrete Designer's Handbook*. p. 111-112. Abingdon: Taylor & Francis, 2008.