

Aplicação dos critérios e métodos da NBR 15421:2023 – Projeto de estruturas resistentes a sismos

SELMA H. S. DA NÓBREGA – PROF. TITULAR – <https://orcid.org/0000-0002-0279-273X> (selma.nobrega@ufrn.br) | **UFRN**
PETRUS G. B. DA NÓBREGA – PROF. TITULAR – <https://orcid.org/0000-0002-8597-0158> (petrus.nobrega@ufrn.br) | **UFRN**
SERGIO H. de C. SANTOS – PROF. TITULAR – <https://orcid.org/0000-0002-2930-9314> (sergiohampshire@poli.ufrj.br) | **UFRJ**

RESUMO

NO INÍCIO DOS ANOS 2000 A COMUNIDADE TÉCNICA BRASILEIRA LOGROU PUBLICAR DIVERSAS NORMAS RELATIVAS AO PROJETO DE ESTRUTURAS, ALGUMAS INÉDITAS, DESTACANDO-SE A NBR 6118, A NBR 14432, A NBR 15200 E A NBR 15421. ESSES DOCUMENTOS VIABILIZARAM PELA PRIMEIRA VEZ, EM 2008, O RECONHECIMENTO PELA ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION) DA NBR 6118 COMO DOCUMENTO DE VALIDADE INTERNACIONAL. ANALOGAMENTE, EM MAIS UMA INICIATIVA DE MODERNIZAÇÃO, VÁRIAS DESSAS NORMAS FORAM REVISADAS A PARTIR DE 2020, DENTRE ELAS A NBR 15421, PROJETO DE ESTRUTURAS RESISTENTES A SISMOS. ESTE ARTIGO APRESENTA AS SUAS PRINCIPAIS ALTERAÇÕES E SEUS CRITÉRIOS NA FORMA DE UM ROTEIRO DE PROJETO APLICADO A UM EXEMPLO DIDÁTICO, CUJO OBJETIVO É FAZER O LEITOR FAMILIARIZAR-SE COM SEUS TERMOS, VARIÁVEIS E PROCEDIMENTOS.

PALAVRAS-CHAVE: SISMO, CONCRETO, DINÂMICA, NORMALIZAÇÃO.

1. INTRODUÇÃO

A primeira edição da norma brasileira de projeto de estruturas resistentes a sismos, ABNT NBR 15421, foi publicada em 2006. Essa temática, considerada complexa e associada apenas a projetos específicos (ainda) no início dos anos 2000, tem-se difundido progressiva e significativamente em trabalhos acadêmicos ou mesmo nos projetos contemporâneos.

Ademais, desde então, citações acerca da NBR 15421 ou sobre a ação sísmica foram feitas em várias outras normas de relevância: NBR 6118:2007 e 2014, NBR 9062:2017, NBR 6120:2019 e NBR 7187:2021, referências essas que tratam, respectivamente, do pro-

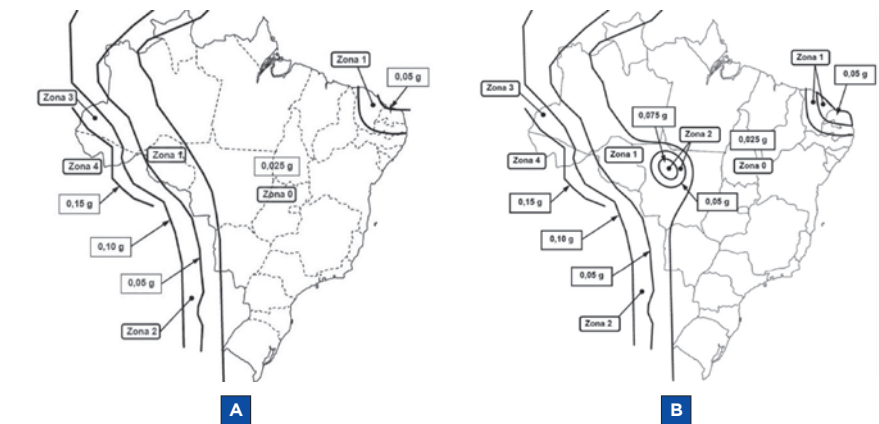


FIGURA 1

MAPA DE ACELERAÇÃO SÍSMICA HORIZONTAL CARACTERÍSTICA DA NBR 15421:2006 (A) E DA NBR 15421:2023 (B)

jeto de estruturas de concreto, de concreto pré-moldado, das ações para o cálculo de estruturas de edificações, e do projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto.

Segundo Nóbrega *et al.* (2022), dois motivos contribuem para um menor conhecimento e difusão da NBR 15421: (1) seus objetivos, dado que ela própria estabelece a sua não aplicação a diversas estruturas especiais (tais como obras hidráulicas, arcos, silos, tanques, chaminés, torres, estruturas *off-shore*, ou que se utilizam de técnicas construtivas não convencionais); e (2) a auto dispensa de seus requisitos para as estruturas localizadas na zona sísmica “0”, a qual corresponde a cerca de 80% do território nacional.

Não obstante, o meio técnico considerou em 2022 ser oportuna a revisão desta referência. De fato, após 16 (dezesseis)

anos em vigor, já existia um conjunto de estudos e percepções técnicas que norteariam os trabalhos da Comissão de Estudos para a revisão dessa norma.

Um documento base com as principais propostas facilitou e agilizou a discussão e a compreensão das alterações. Em verdade, não havia mudanças significativas nas metodologias e nas formulações vigentes; o foco inicial era rever o texto existente, dando-lhe nova redação, quando necessário, a fim de esclarecer dúvidas de interpretação.

Atualmente o texto da NBR 15421 já foi aprovado em Consulta Nacional e publicado oficialmente como 2ª edição, cuja data de referência está estabelecida como 23/05/2023. Doravante, neste artigo, este texto será designado como NBR 15421:2023.

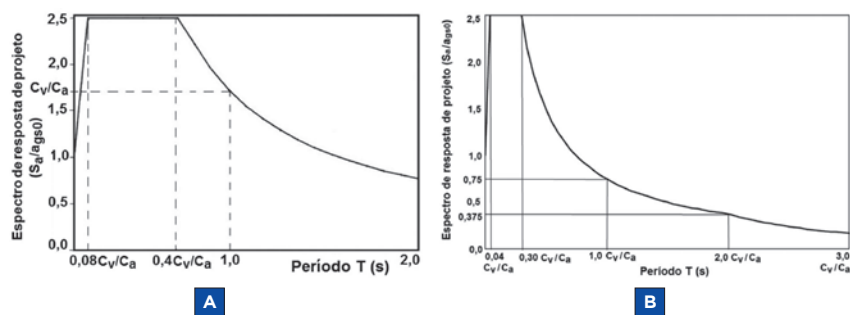


FIGURA 2
ESPECTRO DE RESPOSTA DA NBR 15421:2006 (A) E DA NBR 15421:2023 (B)

As duas principais modificações da NBR 15421:2023 foram: (1) correções no mapa de perigo sísmico; e (2) ajustes no formato do espectro de resposta de projeto. Nos últimos anos vários estudos e iniciativas buscaram caracterizar um novo mapa sísmico para o Brasil. Nóbrega *et al.* (2019) apresentam uma retrospectiva acerca do tema, sendo o trabalho de Alves (2020) aquele que forneceu a base teórica para as correções efetivamente implementadas. Igualmente fundamentou o novo espectro de resposta.

As Figuras 1 e 2 ilustram tais alterações. Em relação ao mapa, tem-se o deslocamento da fronteira entre as zonas “0” e “1” (à esquerda) mais para dentro do MT, com a geração de novas

zonas “2”, e a uniformização do RN e parte do CE como zona “1” com aceleração constante 0,05 g. O formato do espectro de resposta foi modificado, com o patamar máximo ocorrendo já para um valor de período (T) ligeiramente menor e a curva decrescendo um pouco mais acentuadamente após esse patamar de máxima aceleração.

Neste artigo pretende-se apresentar um roteiro completo de projeto associado a um exemplo de cálculo, discutindo-se as fases de definição dos parâmetros e critérios estabelecidos pela nova edição da NBR 15421, bem como a análise estrutural pelos métodos por ela prescritos. Desta maneira, o leitor pode se familiarizar com os termos, variáveis e procedimentos da norma.

2. ESTRUTURA A SER ANALISADA

Considere-se um edifício comercial (de escritórios) em concreto armado convencional (estrutura formada por pórticos de vigas e pilares, e lajes maciças), concreto classe C30, composto de três lajes de piso e uma laje de cobertura. Sendo a altura de cada pavimento igual a 2,90 m, a altura total corresponde a 11,6 m. A Figura 3 ilustra a forma do pavimento tipo e a maquete volumétrica do edifício.

Nas lajes de piso, a ação permanente (além do peso próprio) e a ação variável de utilização foram determinadas como 2 kN/m² e 2,5 kN/m², respectivamente. Também foram lançadas alvenarias sobre as lajes e vigas (onde existentes).

Admite-se a edificação na cidade de Sinop (MT), região central-norte do estado, conforme a Figura 4 ilustra. O ensaio de SPT detectou que o solo do terreno é uma argila siltosa média (nas camadas superiores) e uma areia siltosa pouco compacta (nas camadas próximas ao limite de sondagem), cujo número médio de golpes no ensaio resultou por volta de 10 (dez) a 15 (quinze).

3. PARÂMETROS DA NBR 15421:2023 PARA A ANÁLISE SÍSMICA

3.1 Determinação da zona sísmica e da aceleração sísmica horizontal característica

A tabela 1 da NBR 15421:2023, ilustrada

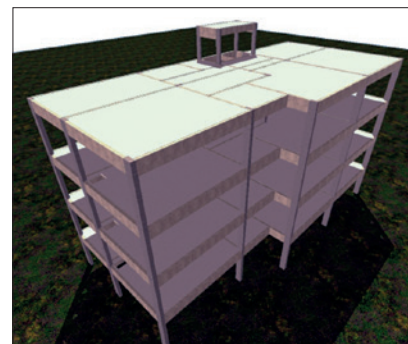
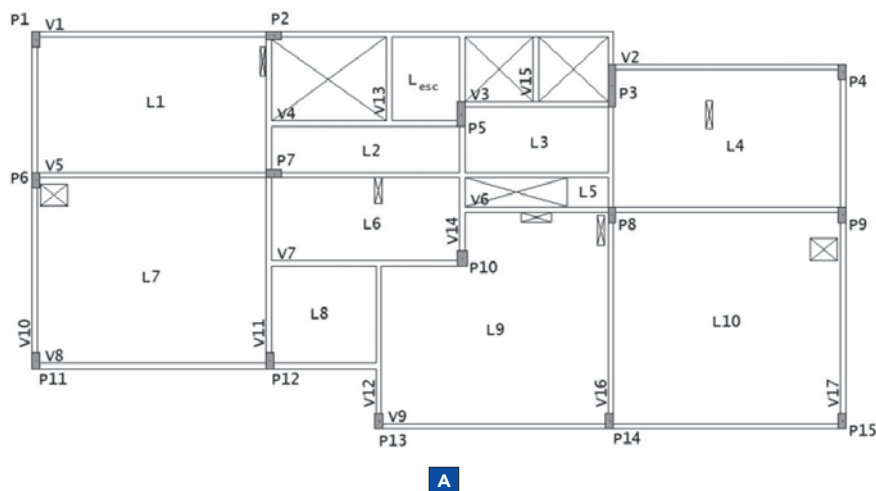


FIGURA 3
PLANTA DE FORMA DO PAVIMENTO TIPO (A) E MAQUETE 3D DO EDIFÍCIO (B)



FIGURA 4

MAPA DO ESTADO DE MT COM A INDICAÇÃO DA CIDADE DE SINOP

na Figura 5, estabelece cinco zonas sísmicas (0, 1, 2, 3 e 4), cada uma delas associada a uma faixa de acelerações horizontais características (tais zonas também podem ser percebidas no mapa sísmico, Figura 1).

Verificando-se o mapa de acelerações (Figura 1b), pode-se inferir que a cidade de Sinop está dentro do círculo externo, fronteira da zona 2, mas não dentro do círculo menor (cuja aceleração é constante e igual a 0,075 g). Assim, admitir-se-á que a edificação está na zona sísmica 2, com uma aceleração $a_g = 0,06 \text{ g} = 0,6 \text{ m/s}^2$ (obtida aproximadamente por interpolação).

Observe-se que se fosse consultada a edição anterior da NBR 15421 (Figura 1a), a aceleração seria 0,025 g, bem menor. Mais ainda, como Sinop estaria na zona sísmica

Zona sísmica	Valores de a_g
Zona 0	$a_g = 0,025 \text{ g}$
Zona 1	$0,025 \text{ g} < a_g \leq 0,05 \text{ g}$
Zona 2	$0,05 \text{ g} < a_g \leq 0,10 \text{ g}$
Zona 3	$0,10 \text{ g} < a_g \leq 0,15 \text{ g}$
Zona 4	$a_g = 0,15 \text{ g}$

FIGURA 5

ZONAS SÍSMICAS DA
ABNT NBR 15421:2023

“0”, nenhum requisito de resistência sísmica seria exigido segundo a própria norma.

3.2. Classe do terreno e fatores de amplificação sísmica no solo

A tabela 2 da NBR 15421:2023 estabelece seis classes do terreno (A, B, C, D, E e F), cada uma delas associada a uma constituição pedológica (A = rocha sã, B = rocha, C = rocha alterada ou solo muito rígido,

D = solo rígido, E = solo mole e F = solos que exigem avaliação específica), fornecendo valores de velocidade média de propagação das ondas de cisalhamento e de número médio de golpes do ensaio SPT para essa classificação objetiva. Adicionalmente, a tabela 3 da norma, ilustrada na Figura 6, indica os fatores de amplificação sísmica no solo (C_a e C_v) em função da classe do terreno, os quais são imprescindíveis para a construção do espectro de resposta do projeto.

De acordo com o enunciado do problema (especialmente pela indicação do número de golpes do SPT), deduz-se que a classe do terreno é do tipo “E” (solo mole) e, para este terreno, dado que $a_g \leq 0,10 \cdot g$, $C_a = 2,5$ e $C_v = 3,5$.

3.3 Espectro de resposta de projeto

A Figura 2b anterior ilustra o espectro de resposta da NBR 15421:2023, cujas expressões matemáticas estão explicitadas na sua subseção 6.3, e reproduzidas na Figura 7.

Aplicando-as ao caso em questão, chega-se a (todas as expressões em m/s^2):

$$[1] \quad a_{gs0} = 2,5 \times (0,06 \cdot g) = 0,15 \cdot g = 1,5$$

$$[2] \quad a_{gs1} = 3,5 \times 0,75 \times (0,06 \cdot g) = 0,1575 \cdot g = 1,575$$

$$[3] \quad S_a(T) = 1,5 \times (37,5 \cdot T^{2,5/3,5} + 1,0) \quad (\text{para } 0 \leq T \leq 0,056 \text{ s})$$

$$[4] \quad S_a(T) = 2,5 \times (1,5) = 3,75 \quad (\text{para } 0,056 \text{ s} \leq T \leq 0,42 \text{ s})$$

$$[5] \quad S_a(T) = 1,575 / T \quad (\text{para } 0,42 \text{ s} \leq T \leq 2,8 \text{ s})$$

$$[6] \quad S_a(T) = 2 \times \left(\frac{3,5}{2,5} \right) \cdot \left(\frac{1,575}{T^2} \right) \quad (\text{para } T \geq 2,8 \text{ s})$$

A Figura 8 ilustra o espectro de res-

Classe do terreno	C_a		C_v	
	$a_g \leq 0,10g$	$a_g = 0,15g$	$a_g \leq 0,10g$	$a_g = 0,15g$
A	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,7	1,7
D	1,6	1,5	2,4	2,2
E	2,5	2,1	3,5	3,4

FIGURA 6

FATORES DE AMPLIFICAÇÃO SÍSMICA NO SOLO DA NBR 15421:2023

$$a_{gs0} = C_a \cdot a_g$$

$$a_{gs1} = C_v \cdot 0,75 \cdot a_g$$

$$S_a(T) = a_{gs0} (37,5 \cdot T \cdot C_a / C_v + 1,0) \quad (\text{para } 0 \leq T \leq 0,04 \cdot C_v / C_a)$$

$$S_a(T) = 2,5 \cdot a_{gs0} \quad (\text{para } 0,04 \cdot C_v / C_a \leq T \leq 0,3 \cdot C_v / C_a)$$

$$S_a(T) = (a_{gs1} / T) \quad (\text{para } 0,3 \cdot C_v / C_a \leq T \leq 2,0 \cdot C_v / C_a)$$

$$S_a(T) = 2 \cdot C_v / C_a \cdot (a_{gs1} / T^2) \quad (\text{para } T \geq 2,0 \cdot C_v / C_a)$$

FIGURA 7

EXPRESSÕES PARA CONSTRUÇÃO DO ESPECTRO DE RESPOSTA DE PROJETO

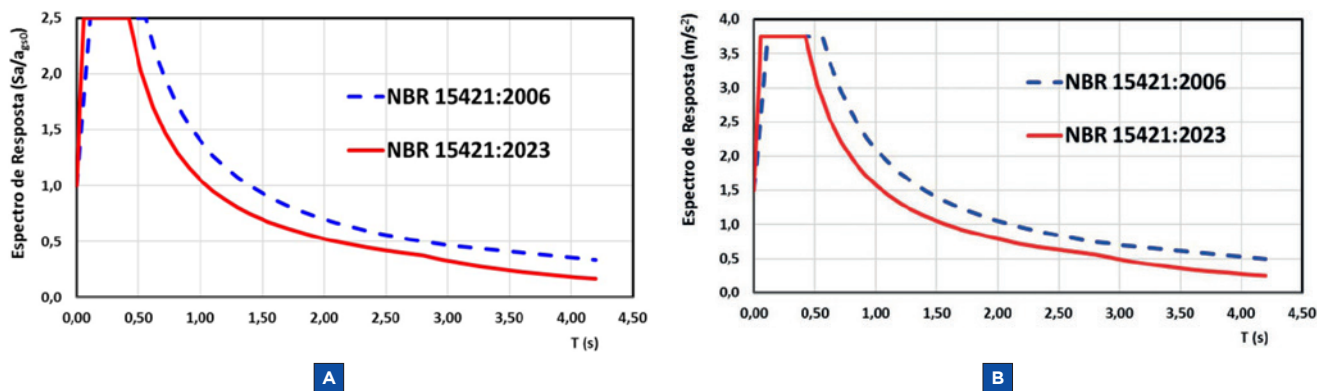


FIGURA 8

ESPECTROS DE RESPOSTA DE PROJETO ADIMENSIONAL (A) E EM m/s^2 (B)

posta (curvas vermelhas), sendo a primeira imagem (Figura 8a), o espectro adimensional, conforme indicado na Figura 2b; e na Figura 8b tem-se o gráfico já na unidade de m/s^2 . Obviamente, as curvas são equivalentes.

Perceba-se que na Figura 8a a reta inclinada parte de $S_a = 1,0 a_{gs0}$ (igual a $1,5 m/s^2$), e o patamar de valor máximo corresponde a $S_a = 2,5 a_{gs0}$ (igual a $3,75 m/s^2$).

Na Figura 8, além dos espectros da NBR 15421:2023, tem-se também os espectros que seriam obtidos pelas expressões da NBR 15421:2006 (curvas azuis tracejadas), para a mesma aceleração do terreno $a_g = 0,06 g$. Como já dito no item 3.1, se fosse utilizado o mapa sísmico anterior, a aceleração para a cidade de Sinop seria $a_g = 0,025 g$, o que provocaria uma mudança muito mais significativa nos espectros (dado que a aceleração é outra). Todavia, no presente item, o foco foi abordar a alteração no espectro de ambas as normas considerando uma mesma base de aceleração (no caso $0,06 g$).

3.4 Parâmetros e métodos para a análise sísmica

A NBR 15421 contém várias tabelas onde é necessário definirem-se alguns parâmetros para dar prosseguimento à análise. Na sequência, indicam-se tais variáveis, justificando-as ou explicando-as se necessário ou oportuno.

a) Categoria de utilização. Pela tabela 4 da NBR 15421:2023, tem-se três categorias de utilização (I, II e III),

função da natureza da ocupação. Considerando o edifício como comercial, sua categoria de utilização é a “I”. Esta categorização é idêntica à existente na norma de 2006.

b) Fator de importância de utilização.

A cada categoria de utilização, pela mesma tabela 4, tem-se o fator de importância de utilização (I). Para a categoria “I”, o fator $I = 1,0$. Tal fator é idêntico ao existente na norma de 2006.

c) Categoria sísmica. Pela tabela 5 da NBR 15421:2023, assim como na norma de 2006, tem-se três categorias sísmicas (A, B e C), dadas em função da zona sísmica onde está o edifício (zonas “0” e “1” = categoria “A”; zona “2” = categoria “B”; e zonas “3” e “4” = categoria “C”). Especificamente para a cidade de Sinop, segundo a NBR 15421:2006, a edificação estaria localizada na zona “0” e, portanto, associada à categoria “A”. A partir da NBR 15421:2023, como a zona sísmica admitida foi a “2”, a categoria sísmica da estrutura é a “B”.

d) Método de análise. A subseção 7.3.2 da NBR 15421:2023 estabelece que para as estruturas localizadas na zona sísmica “0”, nenhum requisito de resistência sísmica é exigido. As estruturas localizadas na zona “1” devem apresentar sistemas estruturais resistentes a forças sísmicas horizontais em duas direções ortogonais, inclusive com um mecanismo de resistência a esforços de torção. Por fim, devem

suportar forças horizontais calculadas por um procedimento bastante simples, que correspondem a 1% do peso efetivo da estrutura. A subseção 7.3.3 refere-se às estruturas das categorias sísmicas B e C, que podem ser analisadas pelo método das forças horizontais equivalentes (MFHE, descrito na Seção 9), ou por um processo mais rigoroso: o método espectral (ME, descrito na Seção 10) ou, ainda, a análise com históricos de acelerações no tempo (método da história no tempo, MHT, descrito na Seção 11). A norma de 2006 traz as mesmas informações, porém descritas nas subseções 7.3.1 e 7.3.2, respectivamente. Nesse contexto, especificamente para a cidade de Sinop, pela norma de 2006 nenhuma verificação às ações sísmicas seria exigida, ao passo que pela NBR 15421:2023, devem ser utilizados o MFHE ou o ME ou o MHT.

e) Coeficientes de projeto para o sistema sismorresistente. Pela tabela 6 da NBR 15421:2023 – similar à da norma de 2006, mas sem as alternativas incomuns para a realidade brasileira – faz-se necessário definir três coeficientes de projeto: o de modificação de resposta (R), o de sobrerresistência (Ω_0), e o de amplificação de deslocamentos (C_d). Admitindo, conforme o enunciado do problema, que o sistema resistente é formado por pórticos de concreto com detalhamento usual, tem-se $R = 3,0$, $\Omega_0 = 3,0$, e $C_d = 2,5$.

Estes coeficientes são utilizados para “ponderar” as respostas obtidas por uma análise elástica do problema, considerando que, na verdade, a ação sísmica solicita a estrutura de uma maneira diferente ao que se obtém nas análises computacionais convencionais. Assim, as respostas modais (obtidas pelo método espectral) relacionadas às forças, ou aos momentos ou às reações de apoio, devem ser multiplicadas pelo fator I/R igual, no presente caso, a $1,0 / 3,0 = 0,33$; ou seja, as respostas corrigidas são 33% das respostas elásticas. Já as respostas modais relacionadas aos deslocamentos absolutos e relativos devem ser multiplicadas pelo fator C_d/R igual a, neste caso, $2,5 / 3,0 = 0,83$; ou seja, as respostas corrigidas são 83% das respostas elásticas.

Por sua vez, o método das forças horizontais equivalentes é um processo estático elástico simplificado e conservador. A correção, neste caso, não ocorre nas respostas, mas na definição dos valores das forças por meio do coeficiente de resposta sísmica C_s , cujo denominador da expressão possui o fator R/I (neste caso, igual a $3,0 / 1,0 = 3,00$). Perceba-se que este valor no denominador é equivalente a multiplicar o resultado por I/R , como citado anteriormente.

4. ANÁLISE MODAL

A primeira etapa de uma análise dinâmica consiste no cálculo dos períodos (ou frequências) naturais e dos modos de vibração, o que pode ser chamado de “análise modal”. Segundo a subseção 8.7.2 da NBR 15421:2023 (“Critérios para a modelagem”), deve ser considerado o “peso efetivo” neste cálculo, o que é basicamente apenas o peso das cargas permanentes e 25% da carga variável de utilização nas áreas de armazenamento e de estacionamento.

A subseção 8.7.3 da NBR 15421:2023, por sua vez, especifica que o modelo deve representar a distribuição espacial de massa e de rigidez em toda a estrutura, e que para as edificações de concreto os elementos podem ser admitidos como fissurados, aplicando-se os fatores de redução de rigidez especificados na ABNT NBR 6118. Como o presente exemplo se enquadra nessa previsão, será feita a análise considerando, ou não, tal redução de

TABELA 1

PERÍODOS E FREQUÊNCIAS NATURAIS

Modo	SEM fissuração		COM fissuração	
	Período (s)	Frequência (Hz)	Período (s)	Frequência (Hz)
1	0,905	1,105	1,107	0,903
2	0,617	1,620	0,779	1,284
3	0,535	1,868	0,680	1,471
4	0,309	3,239	0,370	2,701
5	0,207	4,838	0,253	3,948

rigidez. A Tabela 1 ilustra os resultados para os cinco primeiros modos de vibração, admitindo o módulo de elasticidade secante, sendo utilizado o sistema TQS v.23.8 para o cálculo numérico.

Ocorre, todavia, que o TQS é um software específico para o projeto de estruturas de concreto, permitindo a geração de um modelo computacional que contém as ligações viga x pilar “flexibilizadas”, diferentemente dos modelos derivados diretamente da Análise Matricial de Estruturas. Para avaliar a influência destas ligações, os resultados deste modelo são apresentados na Tabela 2, novamente considerando, ou não, a redução de rigidez.

Perceba-se que a influência das ligações flexibilizadas é ainda mais relevante que a redução de rigidez pela fissuração dos elementos: compare-se o resultado do caso “COM fissuração” da Tabela 1 com o caso “SEM fissuração” da Tabela 2. Algumas notas a respeito desses modelos podem ser encontrados em Nóbrega *et al.* (2022).

5. ANÁLISE PELO MÉTODO DAS FORÇAS HORIZONTAIS EQUIVALENTES

Este método inicia-se com o cálculo

da força horizontal total (H) a ser aplicada à estrutura, dada pela Equação 7, sendo C_s o coeficiente de resposta sísmica e W o peso efetivo da estrutura:

$$[7] \quad H = C_s \cdot W$$

Em função das ações permanentes existentes, tem-se 1.880 kN de peso efetivo para cada um dos pavimentos tipo e 1.050 kN para a cobertura; assim, $W = 6.690$ kN. O coeficiente C_s representa o percentual das cargas verticais que é “convertido” em forças horizontais equivalentes, sendo expresso pela Equação 8:

$$[8] \quad C_s = \frac{2,5 \cdot (a_{gs0}/g)}{(R/I)} = \frac{2,5 \cdot (1,5/10,0)}{(3,0/1,0)} = 0,125$$

C_s deve ser maior que o mínimo igual a 0,01 (neste caso, atendido) mas não precisa ser maior que o resultado da Equação 9, onde “T” é o período fundamental da estrutura.

$$[9] \quad C_s = \frac{(a_{gs1}/g)}{T \cdot (R/I)}$$

Se “T” for obtido por análise numérica, ele não pode ser maior que $C_{up} \cdot T_a$, dado pela Equação 10, com parâmetros definidos pela norma. Para este exemplo:

TABELA 2

PERÍODOS E FREQUÊNCIAS NATURAIS COM LIGAÇÕES FLEXIBILIZADAS

Modo	SEM fissuração		COM fissuração	
	Período (s)	Frequência (Hz)	Período (s)	Frequência (Hz)
1	1,189	0,841	1,352	0,740
2	0,783	1,277	0,914	1,094
3	0,632	1,583	0,756	1,322
4	0,390	2,565	0,440	2,274
5	0,253	3,945	0,292	3,430

$$[10] C_{up} \cdot T_a = C_{up} \cdot (C_T \cdot h_n^x) = 1,7 \times (0,0466 \times 11,6^{0,9}) = 0,719 \text{ s}$$

Assim, tomar-se-á o valor 0,719s dado pela Equação 10 como o período “T”, uma vez que todos os cálculos computacionais resultaram em períodos fundamentais maiores que este valor referencial (vide as Tabelas 1 e 2). Realizando as devidas substituições na Equação 9, tem-se:

$$[11] C_s = \frac{(1,575/10,0)}{0,719 \cdot (3,0/1,0)} = 0,073$$

Assim, adota-se $C_s = 0,073$ (7,3%), número menor que o obtido no primeiro cálculo (12,5%). Finalmente, a força horizontal a ser aplicada à estrutura resulta, pela Equação 7:

$$[12] H = 0,073 \times 6.690 = 488 \text{ kN}$$

Esta força horizontal deve ser distribuída ao longo dos quatro pavimentos do edifício e as expressões matemáticas pertinentes são indicadas na seção 9.3 da NBR 15421:2023. A cada elevação “x”, tem-se uma força F_x . A Tabela 3 resume os cálculos, destacado que o parâmetro “k”, expoente de distribuição, possui valor 1,11.

Importa ressaltar que na Tabela 1, $T = 0,905 \text{ s}$ é o período fundamental (ou $T = 1,107 \text{ s}$, se considerada a fissuração) relativo à flexão na direção horizontal (em planta), e todos os cálculos anteriores para a determinação das forças sísmicas estão corretos para esta direção. Analogamente, dever-se-ia repetir toda essa marcha de cálculo, agora tomando o período fundamental para a direção vertical (em planta). Isto não será feito por limitação de tamanho do presente artigo.

Perceba-se, por fim, que a força F_x re-

TABELA 3

DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DAS FORÇAS SÍSMICAS

Pavimento	h (m)	h _{acum} (m)	W _{pavto} (kN)	w _x · h _x ^k	C _{vx}	F _x (kN)
Tipo 1	2,9	2,9	1.880	6.129,42	0,10934	53,357
Tipo 2	2,9	5,8	1.880	13.230,09	0,23600	115,170
Tipo 3	2,9	8,7	1.880	20.750,29	0,37015	180,634
Cobertura	2,9	11,6	1.050	15.949,15	0,28451	138,839
SOMA			6.690	56058,95	1,00000	488,000

sultante em cada pavimento tipo cresce à medida de sua elevação. Na cobertura, F_x diminui porque aqui o peso efetivo é menor.

Dado que o MFHE é um método estático, é possível compará-lo com a ação do vento, usualmente considerada como estática. Para este edifício, a força total do vento nas direções horizontal e vertical (em planta) correspondem, respectivamente, a 46 kN e 128 kN, significativamente inferiores à ação sísmica determinada pelo MFHE. Em edifícios mais altos é possível que este resultado seja o inverso.

6. ANÁLISE PELO MÉTODO ESPECTRAL

Realizar uma análise espectral só é possível com o auxílio de programas computacionais que possuam um módulo específico para este fim. O espectro de resposta indicado na Figura 8b é o “input” para que os cálculos dos esforços e deslocamentos sejam considerados corretamente, não devendo ser esquecido que as respostas necessitam ser corrigidas pelos coeficientes adequados (discutidos no item 3.4e).

Os pilares e as vigas, se dimensionados apenas considerando as ações gravitacionais e de vento, usualmente

necessitam ser revistos e terem sua seção transversal aumentada quando sob a influência de ações sísmicas, sejam calculadas pelo MFHE ou pelo ME. O presente exemplo de cálculo não foge à regra, embora todos estes elementos mostrem-se viáveis ao dimensionamento a partir de certos ajustes.

Realizar uma comparação completa de resultados pelos diferentes métodos situa-se além dos objetivos deste artigo, e necessitaria de um espaço significativo que não está disponível.

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os principais pontos de alteração da NBR 15421:2023, discutindo-os e justificando-os no contexto de um exemplo de cálculo didático para que o leitor possa familiarizar-se mais facilmente com seus termos, variáveis e procedimentos. Embora os requisitos sísmicos sejam dispensáveis para as estruturas usuais localizadas na zona “0”, fração majoritária do Brasil, é importante o engenheiro de estruturas conhecer e dominar seus conceitos e prescrições, dado que podem ser aplicáveis a algum projeto de estruturas especiais ou de algum edifício localizado em zona sísmica. ☹

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alves, F. V. Estudo de sismicidade do Brasil para revisão da ABNT NBR 15421. 2020. 175 f. Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2020.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismo - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismo. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- [4] Nóbrega, P. G. B.; Santos, S. H. C.; Nóbrega, S. H. S.; Pereira, E. M. V. Conceitos a esclarecer da norma NBR 15421 – Projeto de estruturas resistentes a sismos. In: 63. Congresso Brasileiro do Concreto, 2022, Brasília. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/364337623>>
- [5] Nóbrega, P. G. B.; Souza, B. R. S.; Felipe, M. L. C.; Nóbrega, S. H. S. Sobre os mapas de perigo sísmico para o projeto de estruturas. In: 61. Congresso Brasileiro do Concreto, 2019, Fortaleza. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/336672092>>