

Projeto de estruturas resistentes a sismos

1 Objetivo

- 1.1** Esta Norma fixa os requisitos exigíveis na verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil relativamente às ações de sismos, e os critérios de quantificação destas ações e das resistências a serem consideradas no projeto das estruturas de edificações, relativamente a estas ações, quaisquer que sejam sua classe e destino, salvo os casos previstos em Normas Brasileiras específicas. Estes requisitos específicos para as situações de estruturas submetidas às ações de sismos, complementam os requisitos gerais relativos a ações e segurança nas estruturas, estabelecidos na NBR 8681.
- 1.2** Os critérios de verificação da segurança e os de quantificação das ações dos sismos adotados nesta Norma são aplicáveis às estruturas e às peças estruturais construídas com quaisquer dos materiais usualmente empregados na construção civil.
- 1.3** Esta Norma não se aplica a estruturas especiais, tais como de elementos pré-moldados, pontes, viadutos, obras hidráulicas, arcos, silos, tanques, vasos, chaminés, torres, estruturas *off-shore* ou em que se utilizam técnicas construtivas não convencionais, tais como formas deslizantes, balanços sucessivos, lançamentos progressivos e concreto projetado. Nestes casos, os requisitos de projeto devem ser definidos por Normas Brasileiras específicas.

2 Referências Normativas

As Normas relacionadas a seguir contêm disposições que, ao serem citadas neste texto, constituem prescrições para esta Norma. A edição indicada estava em vigor no momento desta publicação. Como toda Norma está sujeita a revisão, recomenda-se àqueles que realizam acordos com base nesta que verifiquem a conveniência de se usar a edição mais recente das Normas citadas a seguir. A ABNT possui a informação das Normas em vigor em um dado momento.

ABNT NBR 6118:2003 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento

ABNT NBR 6122:1996 – Projeto e execução de fundações

ABNT NBR 6484:2001 – Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio

ABNT NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento

ABNT NBR 8800:1986 – Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites)

3 Definições

Para os efeitos desta Norma, aplicam-se as seguintes definições, em complementação àquelas estabelecidas na NBR 8681:

- 3.1 acelerograma:** histórico de acelerações expressas em função do tempo, compatível com o espectro de resposta de projeto, consideradas como aplicadas à base de uma estrutura.
- 3.2 ações sísmicas:** ações decorrentes da resposta de uma estrutura aos deslocamentos sísmicos no solo, que provocam na mesma esforços e deformações.
- 3.3 base:** nível em que se consideram como atuantes as ações sísmicas. Usualmente deverá coincidir com a superfície do terreno,
- 3.4 categoria de utilização:** classificação aplicada a uma estrutura, baseada em sua utilização, conforme definido na Tabela 7.1.
- 3.5 categoria sísmica:** classificação aplicada a uma estrutura, baseada em sua categoria de utilização e à zona sísmica à qual pertence, conforme definido no item 7.3.
- 3.6 classe do terreno:** classificação atribuída a um perfil de subsolo, baseada nos tipos de solos ou rochas presentes e de suas propriedades mecânicas, conforme definido no item 6.2.
- 3.7 deslocamento relativo de pavimento:** com relação a um pavimento, é a diferença entre os deslocamentos horizontais nas elevações correspondentes ao topo e ao piso do pavimento em questão, usualmente medidos nos seus respectivos centros de gravidade.
- 3.8 detalhamento usual:** nível de detalhamento de um elemento estrutural de acordo com os requisitos das Normas Brasileiras NBR 6118, para os elementos de concreto armado e protendido, NBR 8800, para os elementos de aço estrutural e NBR 6122, para as fundações.
- 3.9 detalhamento intermediário e especial:** níveis de detalhamento que garantem uma determinada capacidade de dissipação de energia da estrutura no regime inelástico. Os requisitos para os níveis de detalhamento intermediário e especial deverão ser definidos por Norma Brasileira específica.
- 3.10 diafragma:** parte horizontal de um sistema estrutural sismo-resistente, usualmente composto pelas lajes de um piso, que será projetado de forma a assegurar a transferência das forças sísmicas horizontais atuantes neste piso para os elementos verticais do sistema sismo-resistente.
- 3.11 efeito P-Δ:** efeito de segunda ordem nos momentos fletores, forças cortantes e forças normais dos elementos estruturais de uma edificação, conseqüentes das excentricidades adicionais das cargas verticais, devidas aos deslocamentos horizontais da estrutura, resultantes dos diversos carregamentos aplicados.

- 3.12 espectro de resposta de projeto:** ação sísmica básica de projeto definida nesta Norma, correspondente à resposta elástica de um sistema de um grau de liberdade com uma fração de amortecimento crítico igual a 5%, para um histórico de acelerações horizontais impostas à sua base.
- 3.13 elevação:** parte de uma estrutura, usualmente composta por lajes e vigas, correspondente a um dos pisos desta estrutura.
- 3.14 fator de importância de utilização:** fator definido para cada estrutura, estabelecido em função da sua categoria de utilização, conforme definido na Tabela 7.1.
- 3.15 forças sísmicas:** forças convencionalmente definidas nesta Norma, decorrentes das ações sísmicas, a serem usadas no projeto das estruturas e de seus componentes.
- 3.16 pavimento:** parte de uma estrutura entre duas elevações sucessivas.
- 3.17 pêndulo invertido:** sistema estrutural em que uma parte significativa de sua massa está concentrada no topo e tem essencialmente comportamento de um sistema de um grau de liberdade na direção horizontal.
- 3.18 pórtico momento-resistente:** sistema estrutural que corresponde a todos os pórticos de concreto e os pórticos de aço em que os elementos e juntas são capazes de resistir a forças por flexão, além de forças normais ao longo do eixo de seus elementos.
- 3.19 prédio:** edificação que possui um sistema estrutural definido, usualmente fechado por paredes e teto, cuja utilização pretendida inclui o abrigo a seres humanos.
- 3.20 sistema dual:** sistema composto, em que a resistência sísmica é fornecida por um pórtico momento-resistente e por outro tipo de sistema (paredes de concreto ou pórticos de aço contraventados em treliça).
- 3.21 sistema sismo-resistente:** parte do sistema estrutural que inclui os elementos que estão sendo considerados como resistentes às forças sísmicas definidas de acordo com esta Norma.
- 3.22 zona sísmica:** regiões geográficas do território brasileiro com sismicidade semelhante, dentro das faixas definidas no item 6.1, e em que para cada uma delas se aplicam diferentes critérios para a análise e projeto anti-sísmico.

4 Simbologia

a_g – aceleração característica de projeto, correspondente à aceleração sísmica horizontal máxima normalizada em relação aos terrenos da Classe B (“rocha”).

a_{gs0} – aceleração espectral para o período de 0,0s, já considerado o efeito da amplificação sísmica no solo, conforme definido no item 6.3.

a_{gs1} – aceleração espectral para o período de 1,0s, já considerado o efeito da amplificação sísmica no solo, conforme definido no item 6.3.

a_p – fator de amplificação do componente, conforme definido no item 12.2.

A_x – fator de amplificação torsional, conforme definido no item 9.4.2.

C_d – coeficiente de amplificação de deslocamentos, conforme definido no item 8.2.2.

C_s – coeficiente de resposta sísmica, conforme definido no item 9.1.

C_T – coeficiente de período da estrutura, conforme definido no item 9.2.

C_{up} – coeficiente de limitação do período, conforme definido no item 9.2.

C_{vx} – coeficiente de distribuição vertical, conforme definido no item 9.3.

E_{mh} – efeito do sismo horizontal incluindo a sobre-resistência, conforme definido no item 8.4.

E_v – efeito do sismo vertical, conforme definido no item 8.4.

F_a – fator de amplificação sísmica no solo, para o período de 0,0s, conforme definido no item 6.3.

F_p – força sísmica horizontal aplicada a um componente não estrutural, conforme definido no item 12.2.

F_{px} – é a força mínima horizontal a ser aplicada ao diafragma na elevação x , conforme definido no item 8.8.

F_v – fator de amplificação sísmica no solo, para o período de 1,0s, conforme definido no item 6.3.

G – efeitos da carga permanente, conforme definido no item 8.4.

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ (aceleração da gravidade)

h_i ou h_x – altura entre a base e as elevações i ou x , conforme definido no item 9.3.

I – fator de importância de utilização, conforme definido na Tabela 7.1.

I_p – fator de importância de utilização de componentes não estruturais, conforme definido no item 12.1.

k – expoente de distribuição, relacionado ao período natural da estrutura, conforme definido no item 9.3.

M_f – momento inerente de torção nos pisos, causado pela excentricidade dos centros de massa com relação aos centros de rigidez, conforme definido no item 9.4.2.

M_{ta} – momento torsional accidental nos pisos, conforme definido no item 9.4.2.

N – número de golpes obtido no ensaio SPT, realizado de acordo com a Norma NBR 6484.

\overline{N} – média nos 30m superiores do terreno, do número de golpes obtido no ensaio SPT.

P_x – força normal em serviço atuando no pavimento x , conforme definido no item 9.6.

Q_E – efeitos das forças sísmicas horizontais, conforme definido no item 8.4.

R – coeficiente de modificação de resposta, conforme definido no item 8.2.2.

R_p – coeficiente de modificação de resposta do componente não estrutural, conforme definido no item 12.2.

S_a – aceleração horizontal espectral, função do período próprio T , correspondente à resposta elástica de um sistema de um grau de liberdade com uma fração de amortecimento crítico ξ , conforme definido no item 10.3.

T – período próprio fundamental de uma estrutura, determinado de acordo com o item 9.2.

T_a – período natural aproximado da estrutura, conforme definido no item 9.2.

v_s – velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no terreno.

$\overline{v_s}$ – média nos 30m superiores do terreno, da velocidade de propagação de ondas de cisalhamento.

V – força horizontal total sísmica na base da estrutura, conforme definido no item 9.1.

V_f – força horizontal total sísmica na base da estrutura, determinada pelo método espectral, conforme definido no item 10.4, ou por análise com históricos de acelerações no tempo, conforme definido no item 11.3.

V_x – força cortante sísmica atuante no pavimento x , conforme definido no item 9.6.

W – peso total de uma estrutura, conforme definido no item 9.1.

W_p – peso operacional de um componente não estrutural, conforme definido no item 12.2.

w_i ou w_x – parte da carga gravitacional total que corresponde às elevações i ou x , conforme definido no item 9.3.

Δ_x – deslocamento relativo de pavimento na elevação x , conforme definido no item 9.5.

δ_x – deslocamento absoluto horizontal na elevação x , conforme definido no item 9.5.

γ_{exc} – coeficiente de ponderação de cargas, aplicado a ações excepcionais.

γ_g – coeficiente de ponderação de cargas, aplicado a ações permanentes.

γ_q – coeficiente de ponderação de cargas, aplicado a ações variáveis.

γ_e – coeficiente de ponderação de cargas, aplicado a efeitos de recalques de apoio e da retração dos materiais.

θ – coeficiente de estabilidade da estrutura para o efeito P -delta, conforme definido no item 9.6.

Ω_D – coeficiente de sobre-resistência, conforme definido no item 8.2.

5 Requisitos gerais de segurança

5.1 Estados limites

Todas as estruturas devem ser projetadas e construídas para resistir aos efeitos das ações sísmicas, conforme os requisitos estabelecidos nesta Norma. No projeto das estruturas deverão ser considerados os estados limites últimos, conforme definido na NBR 8681. Deverão também ser verificados estados limites de serviço caracterizados por deslocamentos excessivos, principalmente como parâmetro de limitação dos danos causados pelos sismos às edificações. As cargas sísmicas aqui definidas consideram a capacidade de dissipação de energia no regime inelástico das estruturas, o que conduz aos requisitos específicos aqui definidos para o projeto, o detalhamento e a construção.

5.2 Classificação das ações sísmicas

De acordo com o item 4.2.1.3 da NBR 8681, as ações sísmicas serão consideradas como ações excepcionais.

5.3 Valores característicos das ações sísmicas

Os valores a serem definidos como característicos nominais para as ações sísmicas são aqueles que têm 10% de probabilidade de serem ultrapassados no sentido desfavorável, durante um período de 50 anos, o que corresponde a um período de retorno de 475 anos.

5.4 Combinações de cargas

Conforme definido na NBR 8681, para efeito das combinações últimas excepcionais de carga definidas em seu item 5.1.3.3, os coeficientes de ponderação a considerar são:

γ_g – de acordo com os valores definidos nas Tabelas 1 e 2 da NBR 8681 para ações permanentes na combinação última excepcional; especificamente para edificações onde as cargas acidentais não superem 5 kN/m^2 , quando o efeito das ações permanentes é desfavorável, deve ser considerado $\gamma_g = 1,2$;

$\gamma_e = 0,0$ de acordo com a Tabela 3 da NBR 8681 para efeitos de recalques de apoio e da retração dos materiais na combinação última excepcional;

$\gamma_q = 1,0$ de acordo com as Tabelas 4 e 5 da NBR 8681 para ações variáveis na combinação última excepcional;

$\gamma_{exc} = 1,0$ de acordo com o item 5.1.4.3 da NBR 8681 para ações excepcionais na combinação última excepcional.

6. Definição dos valores característicos das ações sísmicas

6.1 Zoneamento sísmico brasileiro

Para efeito da definição das ações sísmicas a serem consideradas no projeto, o zoneamento sísmico definido na Figura 6.1 deverá ser considerado. Cinco zonas sísmicas são definidas nesta figura, considerando a variação de a_g , aceleração sísmica horizontal máxima para terrenos da Classe B (“Rocha”, conforme definido no item 6.2), nas faixas definidas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Definição das zonas sísmicas

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

Para estruturas localizadas nas zonas sísmicas 1 a 3, os valores a serem considerados para a_g podem ser obtidos por interpolação nas curvas da Figura 6.1. Um estudo sismológico e geológico específico para a definição de a_g poderá ser opcionalmente efetuado para o projeto de qualquer estrutura.

6.2 Definição da classe do terreno

O terreno de fundação deverá ser categorizado em uma das classes definidas na Tabela 6.2, associadas aos valores numéricos dos parâmetros médios avaliados nos 30m superiores do terreno. Onde a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento $\overline{v_s}$ não for conhecida, será permitida a classificação do terreno a partir do número médio de golpes no ensaio SPT \overline{N} , conforme explicitado na Tabela 6.2.

As classes de rocha, A ou B, não podem ser consideradas se houver uma camada superficial de solo superior a 3m. Para solos estratificados, os valores médios $\overline{v_s}$ e \overline{N} são obtidos em função destes mesmos valores v_{si} e N_i nas diversas camadas i , através das expressões abaixo, em que d_i é a espessura de cada uma das camadas do subsolo:

$$\overline{v_s} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad \overline{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}}$$

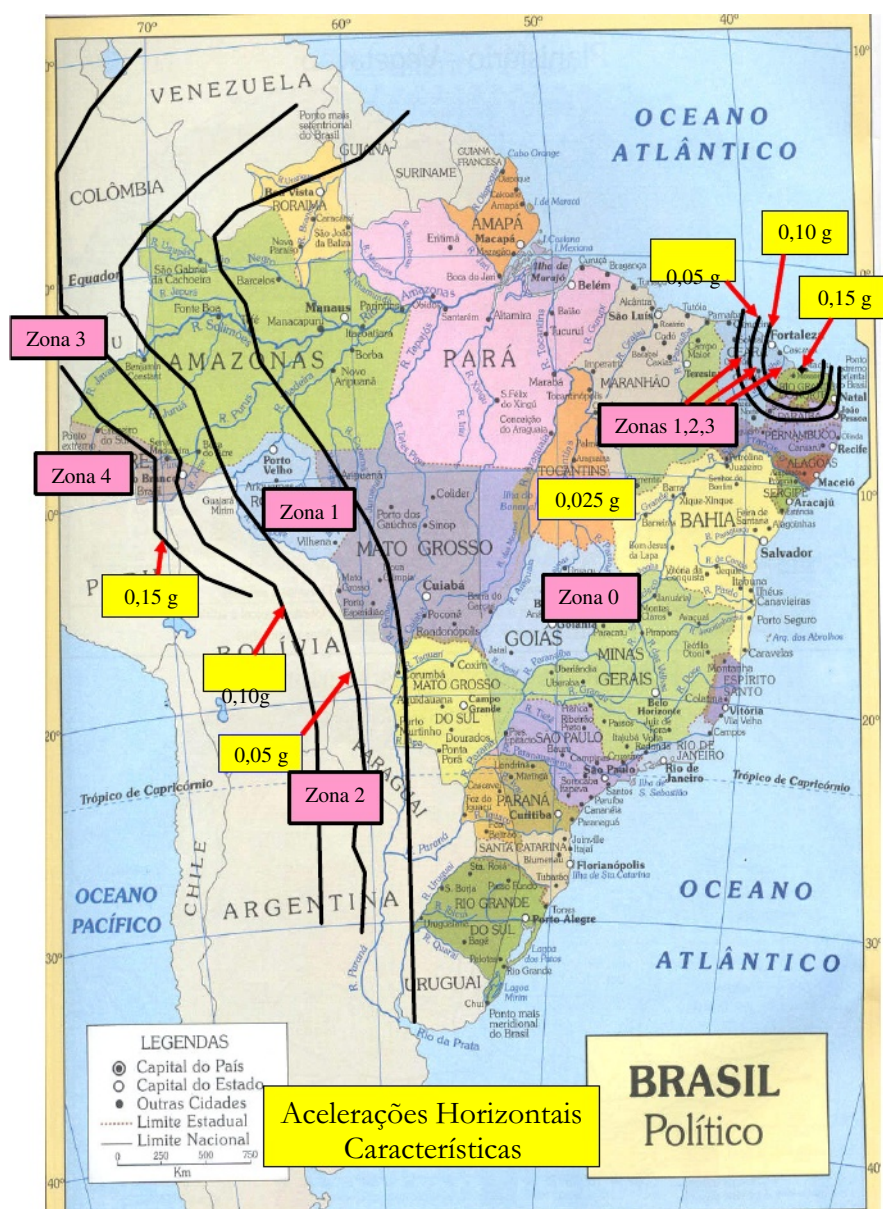


Figura 6.1 – Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para terrenos da classe B (“Rocha”)

Tabela 6.2 – Definição da classe do terreno

Classe do terreno	Designação da Classe do terreno	Propriedades médias para os 30m superiores do terreno	
		$\bar{\nu}_s$, velocidade média de propagação de ondas de cisalhamento	\bar{N} , número médio de golpes no ensaio SPT
A	Rocha sã	$\bar{\nu}_s \geq 1500$ m/s	(não aplicável)
B	Rocha	$1500 \text{ m/s} \geq \bar{\nu}_s \geq 760$ m/s	(não aplicável)
C	Rocha alterada ou solo muito rígido	$760 \text{ m/s} \geq \bar{\nu}_s \geq 370$ m/s	$\bar{N} \geq 50$
D	Solo rígido	$370 \text{ m/s} \geq \bar{\nu}_s \geq 180$ m/s	$50 \geq \bar{N} \geq 15$
E	Solo mole	$\bar{\nu}_s \leq 180$ m/s	$\bar{N} \leq 15$
	-	Qualquer perfil incluindo camada com mais de 3m de argila mole	
F	-	Solo exigindo avaliação específica, como: 1. Solos vulneráveis à ação sísmica, como solos liquefazíveis, argilas muito sensíveis e solos colapsíveis fracamente cimentados; 2. Turfa ou argilas muito orgânicas; 3. Argilas muito plásticas; 4. Estratos muito espessos ($\geq 35\text{m}$) de argila mole ou média.	

6.3 Definição do espectro de resposta de projeto

O espectro de resposta de projeto, $S_d(T)$, para acelerações horizontais, correspondente à resposta elástica de um sistema de um grau de liberdade com uma fração de amortecimento crítico igual a 5%, é definido a partir da aceleração sísmica horizontal máxima a_g e da classe do terreno, utilizando as seguintes grandezas:

$$a_{gs0} = F_a \cdot a_g \quad a_{gs1} = F_v \cdot a_g$$

a_{gs0} e a_{gs1} são as acelerações espectrais, conforme definido a seguir, para os períodos de 0,0s e 1,0s respectivamente, já considerado o efeito da amplificação sísmica no solo. F_a e F_v são os fatores de amplificação sísmica no solo, para os períodos de 0,0s e 1,0s, respectivamente, definidos na Tabela 6.3 em função da aceleração característica de projeto a_g e da classe do terreno. T é o período próprio (em s), associado a cada um dos modos de vibração da estrutura. O espectro de resposta de projeto é considerado como aplicado à base da estrutura.

Tabela 6.3 – Definição dos fatores F_a e F_v de amplificação sísmica no solo

Classe do terreno	Fator F_a		Fator F_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

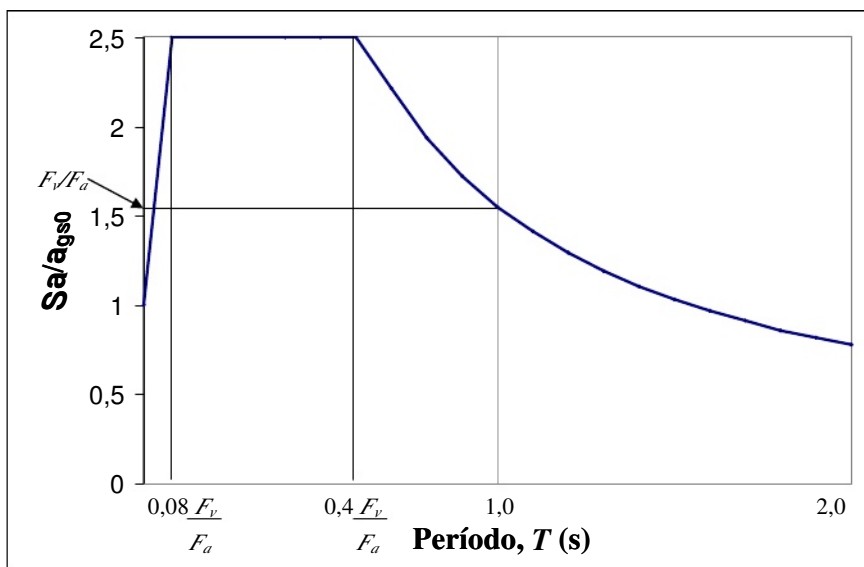
Para valores de $0,10g \leq a_g \leq 0,15g$ os valores de F_a e F_v poderão ser obtidos por interpolação linear. Para a classe do terreno F, um estudo específico de amplificação no solo deverá ser desenvolvido.

O espectro de resposta de projeto, $S_a(T)$, é expresso graficamente na Figura 6.2 e definido numericamente em três faixas de períodos pelas expressões:

1. $S_a(T) = a_{gs0} \cdot (18,75 \cdot T \cdot F_a / F_v + 1,0)$ (para $0 \leq T \leq F_v / F_a \cdot 0,08 s$)
2. $S_a(T) = 2,5 \cdot a_{gs0}$ (para $F_v / F_a \cdot 0,08 s \leq T \leq F_v / F_a \cdot 0,4 s$)
3. $S_a(T) = a_{gs1} / T$ (para $T \geq F_v / F_a \cdot 0,4 s$)

Quando for necessário definir um espectro para acelerações verticais, as acelerações deste espectro poderão ser tomadas como 50% das acelerações correspondentes definidas nos espectros para acelerações horizontais.

Figura 6.2 – Variação do espectro de resposta de projeto (S_a/a_{gs0}) em função do período



7 Categorização das estruturas para a análise sísmica

7.1 Critérios para a categorização sísmica

Para cada estrutura será definida uma categoria sísmica, de acordo com o item 7.3. As categorias sísmicas são utilizadas nesta Norma para definir os sistemas estruturais permitidos, limitações nas irregularidades das estruturas, componentes da estrutura que devem ser projetados quanto à resistência sísmica e os tipos de análises sísmicas que devem ser realizadas.

7.2 Categorias de Utilização e fatores de importância de utilização

Para cada estrutura deverá ser definida uma categoria de utilização e um correspondente fator de importância de utilização (*I*), conforme definido na Tabela 7.1. Observar que as estruturas necessárias ao acesso às estruturas de categoria II ou III, também deverão ser categorizadas como tal. Caso uma estrutura contenha áreas de ocupação de mais de uma categoria, a categoria mais alta deverá ser considerada no seu projeto.

7.3 Definição da categoria sísmica

Para cada estrutura é definida uma categoria sísmica, a partir de sua zona sísmica e de sua categoria de utilização, conforme definido na Tabela 7.2.

7.3.1 Requisitos de análise para a categoria sísmica A

As estruturas de categoria sísmica A deverão apresentar sistemas estruturais resistentes a forças sísmicas horizontais em duas direções ortogonais, inclusive com um mecanismo de resistência a esforços de torção. As estruturas deverão resistir a cargas horizontais aplicadas simultaneamente a todos os pisos, em cada uma de duas direções ortogonais, com valor numérico igual a:

$$F_x = 0,01 w_x$$

Onde:

F_x – força sísmica de projeto correspondente ao piso x .

w_x – peso total da estrutura correspondente ao piso x , incluindo o peso operacional de todos os equipamentos fixados na estrutura. Nas áreas de armazenamento, este peso incluirá 25% da carga accidental.

7.3.2 Requisitos de análise para as categorias Sísmicas B e C

As estruturas de categoria sísmica B e C poderão ser analisadas pelo método das forças horizontais equivalentes, conforme definido no item 9, ou por um processo mais rigoroso, conforme definido nos itens 10 e 11.

Tabela 7.1 – Definição das categorias de utilização e dos fatores de importância de utilização (I)

Categorias de utilização	Natureza da ocupação	Fator /
I	Todas as estruturas não classificadas como de categoria II ou III	1,0
II	<p>Estruturas de importância substancial para a preservação da vida humana no caso de ruptura, incluindo, mas não estando limitadas às seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estruturas em haja reunião de mais de 300 pessoas em uma única área. • Estruturas para educação pré-escolar com capacidade superior a 150 ocupantes. • Estruturas para escolas primárias ou secundárias com mais de 250 ocupantes. • Estruturas para escolas superiores ou para educação de adultos com mais de 500 ocupantes. • Instituições de saúde para mais de 50 pacientes, mas sem instalações de tratamento de emergência ou para cirurgias. • Instituições penitenciárias. • Quaisquer outras estruturas com mais de 5000 ocupantes. • Instalações de geração de energia, de tratamento de água potável, de tratamento de esgotos e outras instalações de utilidade pública não classificadas como de categoria III. • Instalações contendo substâncias químicas ou tóxicas cujo extravasamento possa ser perigoso para a população, não classificadas como de categoria III. 	1,25
III	<p>Estruturas definidas como essenciais, incluindo, mas não estando limitadas, às seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instituições de saúde com instalações de tratamento de emergência ou para cirurgias. • Prédios de bombeiros, de instituições de salvamento e policiais e garagens para veículos de emergência. • Centros de coordenação, comunicação e operação de emergência e outras instalações necessárias para a resposta em emergência. • Instalações de geração de energia e outras instalações necessárias para a manutenção em funcionamento das estruturas classificadas como de categoria III. • Torres de controle de aeroportos, centros de controle de tráfego aéreo e hangares de aviões de emergência. • Estações de tratamento de água necessárias para a manutenção de fornecimento de água para o combate ao fogo. • Estruturas com funções críticas para a Defesa Nacional. • Instalações contendo substâncias químicas ou tóxicas consideradas como altamente perigosas, conforme classificação de autoridade governamental designada para tal. 	1,50

Tabela 7.2 – Definição da categoria sísmica

Zona sísmica	Categorias de utilização		
	I	II	III
Zonas 0 e 1	A	A	A
Zona 2	B	B	B
Zonas 3 e 4	C	C	C

8 Requisitos sísmicos para as estruturas de prédios

8.1 Critérios básicos

Os requisitos definidos neste item 8 são específicos para estruturas de prédios. Todo prédio deve possuir um sistema estrutural capaz de fornecer adequada rigidez, resistência e capacidade de dissipação de energia relativamente às ações sísmicas, no sentido vertical e em duas direções ortogonais horizontais, inclusive com um mecanismo de resistência a esforços de torção. As ações sísmicas horizontais aqui definidas poderão atuar em qualquer direção de

uma estrutura.

Um sistema contínuo de transferência de cargas deve ser projetado, com adequada rigidez e resistência, para garantir a transferência das forças sísmicas, desde os seus pontos de aplicação, até as fundações da estrutura. Deverão ser evitados sistemas com descontinuidades bruscas de rigidez ou de resistência em planta ou em elevação. Deve-se procurar obter uma distribuição uniforme e contínua de resistência, de rigidez e de ductilidade nas estruturas. Assimetrias significativas de massa e de rigidez deverão ser evitadas. São recomendados sistemas estruturais apresentando redundância, através de várias linhas de elementos sismo-resistentes verticais, conectados entre si por diafragmas horizontais de elevada ductilidade.

8.1.1 Ligações a suportes

Todas as partes da estrutura devem ser adequadamente conectadas ao sistema estrutural sismo-resistente principal. Todas as ligações entre elementos estruturais deverão ser capazes de transmitir uma força sísmica horizontal, no sentido mais desfavorável, produzida pela aceleração $a_{g,0}$, aceleração espectral para o período de 0,0s, definida no item 6.3.

8.2 Sistemas básicos sismo-resistentes

Os sistemas estruturais sismo-resistentes considerados nesta Norma são os listados na Tabela 8.1. Também estão definidos nesta tabela os coeficientes de modificação de resposta R , os coeficientes de sobre-resistência Ω_0 e os coeficientes de amplificação de deslocamentos C_d , a serem utilizados, de acordo com as prescrições desta Norma, para a determinação das forças de projeto nos elementos estruturais e dos deslocamentos da estrutura.

8.2.1 Sistemas duais

Nos sistemas definidos na Tabela 8.1 como duais, compostos por um pórtico momento-resistente e por outro tipo de sistema (paredes de concreto ou pórticos de aço contraventados em treliça), o pórtico momento-resistente deverá resistir a pelo menos 25% da força sísmica total. A divisão das forças sísmicas entre os elementos que compõem os sistemas duais, será de acordo com a sua rigidez relativa.

Tabela 8.1 – Coeficientes de projeto para os diversos sistemas básicos sismo – resistentes

Sistema básico sismo-resistente	Coeficiente de modificação da resposta R	Coeficiente de sobre – resistência Ω_0	Coeficiente de amplificação de deslocamentos C_d
Paredes de concreto com detalhamento especial	5	2,5	5
Paredes de concreto com detalhamento usual	4	2,5	4
Pórticos de concreto com detalhamento especial	8	3	5,5
Pórticos de concreto com detalhamento intermediário	5	3	4,5
Pórticos de concreto com detalhamento usual	3	3	2,5
Pórticos de aço momento-resistentes com detalhamento especial	8	3	5,5
Pórticos de aço momento-resistentes com detalhamento intermediário	4,5	3	4
Pórticos de aço momento-resistentes com detalhamento usual	3,5	3	3
Pórticos de aço contraventados em treliça, com detalhamento especial	6	2	5
Pórticos de aço contraventados em treliça, com detalhamento usual	3,25	2	3,25
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento especial e paredes de concreto com detalhamento especial	7	2,5	5,5
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento especial e paredes de concreto com detalhamento usual	6	2,5	5
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento especial e pórticos de aço contraventados em treliça com detalhamento especial	7	2,5	5,5
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento intermediário e paredes de concreto com detalhamento especial	6,5	2,5	5
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento intermediário e paredes de concreto com detalhamento usual	5,5	2,5	4,5
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento usual e paredes de concreto com detalhamento usual	4,5	2,5	4
Estruturas do tipo pêndulo invertido e sistemas de colunas em balanço	2,5	2	2,5

8.2.2 Combinação de sistemas resistentes

Em duas direções ortogonais não há restrição à utilização de diferentes sistemas resistentes, devendo ser aplicados a cada direção os respectivos coeficientes R , Ω_0 e C_d definidos na Tabela 8.1.

Além dos sistemas duais explicitamente definidos na Tabela 8.1, a resistência de diferentes sistemas resistentes pode ser combinada em cada uma das direções ortogonais da estrutura. Neste caso, em cada uma das direções horizontais devem ser considerados os valores mais desfavoráveis para os coeficientes R , Ω_0 e C_d correspondentes aos sistemas utilizados.

Quando houver modificação de tipo de sistema na vertical, em um mesmo sistema resistente, não se pode aplicar valores menos desfavoráveis para estes coeficientes, em um pavimento, do que os usados nos pavimentos superiores. Não é necessário se aplicar esta limitação para subestruturas apoiadas em uma estrutura principal, cujo peso não ultrapasse 10% do peso total desta estrutura.

8.2.3 Estruturas do tipo pêndulo invertido

As estruturas do tipo pêndulo invertido poderão ser analisadas pelo método das forças horizontais equivalentes, definido no item 9, devendo ser considerada uma variação linear do momento fletor, desde o seu valor máximo determinado na base, até a metade deste valor no topo da estrutura.

8.3 Configuração estrutural

As estruturas de categoria sísmica B e C serão classificadas como regulares ou irregulares, de acordo com os critérios definidos neste item. Esta classificação é baseada na configuração estrutural no plano e na vertical.

8.3.1 Deformabilidade dos diafragmas

Os diafragmas podem ser considerados como flexíveis se a máxima deflexão horizontal transversal a um eixo da estrutura paralelo ao eixo do diafragma, medida com relação à média dos deslocamentos relativos de pavimento dos pontos extremos deste eixo, é mais do que o dobro desta média dos deslocamentos relativos dos pontos extremos. Os carregamentos a serem utilizados nesta avaliação são os definidos no item 9.

Diafragmas de concreto que tenham uma relação entre vão e profundidade menor do que 3,0 e não apresentem as irregularidades estruturais no plano definidas na Tabela 8.2, podem ser classificados como rígidos.

8.3.2 Irregularidades no plano

As estruturas apresentando uma ou mais das irregularidades listadas na Tabela 8.2 devem ser projetadas como tendo irregularidade estrutural no plano. Estas estruturas têm requisitos específicos de projeto, que são definidos nos itens referenciados na tabela. Os requisitos associados à irregularidade do Tipo 1 não precisam ser considerados para prédios de até dois pavimentos.

Tabela 8.2 – Irregularidades Estruturais no Plano

Tipo de irregularidade	Descrição da irregularidade	Item de referência
1	Irregularidade torsional, definida quando em uma elevação, o deslocamento relativo de pavimento em uma extremidade da estrutura, avaliado incluindo a torção accidental, medido transversalmente a um eixo, é maior do que 1,2 vezes a média dos deslocamentos relativos de pavimento nas duas extremidades da estrutura, ao longo do eixo considerado. Os requisitos associados à irregularidade transversal não se aplicam se o diafragma é classificado como flexível, de acordo com o item 8.3.1.	8.10 9.4.2 9.5
2	Descontinuidades na trajetória de resistência sísmica no plano, como sistemas resistentes verticais consecutivos com eixos fora do mesmo plano.	8.3.4 8.7.3 8.8
3	Os elementos dos sistemas sismo-resistentes verticais não são paralelos ou simétricos com relação aos eixos ortogonais principais do sistema sismo-resistente.	8.5 8.7.3

8.3.3 Irregularidades na vertical

As estruturas apresentando uma ou mais das irregularidades listadas na Tabela 8.3 devem ser projetadas como tendo irregularidade estrutural na vertical. Estas estruturas têm requisitos

As estruturas de projeto que não se enquadram em nenhuma das irregularidades listadas na Tabela 8.3, não poderão ter mais de dois pavimentos, nem mais de 9m. Esta limitação não precisa ser considerada se as forças sísmicas forem multiplicadas pelo fator Ω_0 definido na Tabela 8.1.

Tabela 8.3 – Irregularidades Estruturais na Vertical

Tipo de irregularidade	Descrição da irregularidade	Itens de referência
4	Descontinuidades na trajetória de resistência sísmica na vertical, como sistemas resistentes verticais consecutivos no mesmo plano, mas com eixos afastados de uma distância maior de que seu comprimento ou quando a resistência entre elementos consecutivos é maior no elemento superior.	8.3.4
5	Caracterização de um “pavimento extremamente fraco”, como aquele em que a sua resistência lateral é inferior a 65% da resistência do pavimento imediatamente superior. A resistência lateral é computada como a resistência total de todos os elementos sismo-resistentes presentes na direção em consideração	8.3.3

8.3.4 Elementos suportando pórticos e paredes descontinuas

Colunas, vigas, lajes e treliças suportando pórticos e paredes sismo-resistentes apresentando irregularidades dos Tipos 2 ou 4, conforme definido nas Tabelas 8.2 e 8.3, respectivamente,

deverão ser projetadas considerando os efeitos sísmicos na direção vertical (E_v) e os decorrentes do sismo horizontal com o efeito da sobre-resistência (E_{mh}), conforme definido no item 8.4.

8.4 Efeitos do sismo vertical e do sismo horizontal com sobre-resistência

Os efeitos do sismo na direção vertical deverão ser considerados em seu sentido mais desfavorável e determinados de acordo com a expressão abaixo:

$$E_v = 0,5 \cdot a_{gs0} \cdot G$$

E_v e G são, respectivamente, os efeitos do sismo vertical e das cargas gravitacionais, respectivamente.

Nas condições em que seja exigida nesta Norma a verificação na condição de sobre-resistência, os efeitos dos sismos na direção horizontal serão amplificados de acordo com a expressão:

$$E_{mh} = \Omega_0 \cdot Q_E$$

E_{mh} , Ω_0 e Q_E são, respectivamente, os efeitos do sismo horizontal incluindo a sobre-resistência, o coeficiente de sobre-resistência definido na Tabela 8.1, e os efeitos do sismo horizontal determinados de acordo com os procedimentos definidos nos itens 9, 10 ou 11.

8.5 Direção das forças sísmicas

Na análise de cada elemento pertencente ao sistema sismo-resistente, a direção de aplicação das forças sísmicas na estrutura deverá ser a que produz o efeito mais crítico no elemento em questão. Será permitido aplicar as forças separadamente em cada uma das direções ortogonais, sem considerar a superposição dos efeitos em duas direções.

As estruturas de categoria sísmica C que apresentarem irregularidades no plano do Tipo 3, conforme definido na Tabela 8.2, deverão ser verificadas, em cada uma das direções ortogonais, para uma combinação de 100% das cargas horizontais aplicadas em uma das direções com 30% das cargas aplicadas na direção perpendicular a esta.

Este último requisito também estará atendido se for realizada uma análise sísmica com históricos de acelerações no tempo, conforme definido no item 11, com a aplicação simultânea de acelerogramas horizontais independentes nas duas direções ortogonais.

8.6 Procedimentos de análise

Procedimentos simplificados de análise são definidos no item 7.3.1 para as estruturas de categoria sísmica A. As estruturas de categoria sísmica B e C poderão ser analisadas pelo processo simplificado definido no item 9. Qualquer estrutura poderá ser analisada por um processo mais rigoroso, conforme definido nos itens 10 e 11.

8.7 Critérios para a modelagem

8.7.1 Modelagem da fundação

É permitido considerar-se na análise sísmica, as estruturas como perfeitamente fixadas à fundação. Caso se deseje considerar os efeitos da flexibilidade da fundação, os requisitos

estabelecidos neste item deverão ser seguidos. Os efeitos favoráveis de interação dinâmica solo-estrutura poderão ser vir a ser considerados, desde que os procedimentos utilizados sejam adequadamente justificados na análise.

A flexibilidade das fundações poderá ser considerada através de um conjunto de molas e amortecedores relativos a cada um dos diversos graus de liberdade da fundação. Na definição das propriedades dos solos a serem utilizadas na determinação destes parâmetros, deverá ser considerado o nível de deformações específicas presentes no solo quando da ocorrência do sismo de projeto. Uma variação paramétrica de 50%, de acréscimo ou de decréscimo com relação às propriedades dos solos mais prováveis deverá ser considerada na análise dinâmica. Para efeito de verificação do tombamento das estruturas (excetuando-se as estruturas do tipo pêndulo invertido), será permitida uma redução de 25% com relação às forças determinadas de acordo com os procedimentos do item 9 (método das forças horizontais equivalentes) ou de 10% com relação às forças determinadas de acordo com o item 10 (método espectral).

8.7.2 Peso efetivo para a análise

Os pesos a serem considerados nas análises, deverão considerar as cargas permanentes atuantes, incluindo o peso operacional de todos os equipamentos fixados na estrutura. Nas áreas de armazenamento, dever-se-á incluir 25% da carga acidental.

8.7.3 Modelagem da estrutura

O modelo matemático da estrutura deverá considerar a rigidez de todos os elementos significativos para a distribuição de forças e deslocamentos na estrutura. O modelo deverá representar a distribuição espacial de massa e de rigidez em toda a estrutura.

Caso a estrutura apresente irregularidade estrutural no plano dos Tipos 1, 2 ou 3, conforme definido na Tabela 8.2, um modelo tri-dimensional deverá ser utilizado. Neste modelo, cada nó deverá possuir ao menos três graus de liberdade, duas translações em um plano horizontal e uma rotação em torno de um eixo vertical.

Quando os diafragmas não forem classificados como rígidos ou flexíveis, de acordo com o item 8.3.1, o modelo deve incluir elementos que representem a rigidez destes diafragmas.

No caso em que pórticos sismo-resistentes tenham ligações com elementos mais rígidos e não considerados no sistema estrutural sismo-resistente, os pórticos devem ser projetados de forma que a ação ou a ruptura destes elementos não prejudique sua capacidade resistente. A presença destes elementos deve ser considerada na avaliação das irregularidades da estrutura.

8.8 Requisitos para os diafragmas

Os diafragmas horizontais em cada elevação da estrutura devem formar um sistema resistente auto-equilibrado capaz de transferir as forças sísmicas horizontais, de seus pontos de aplicação na elevação, até os pontos em que elas são transmitidas aos sistemas resistentes

verticais. As forças a serem aplicadas em cada elevação nos diafragmas horizontais, são as forças obtidas na análise estrutural. No método das forças horizontais equivalentes, as forças horizontais totais em cada elevação são as forças F_x , definidas no item 9.3. Para a análise dos diafragmas, estas forças em cada elevação x não podem ser inferiores a:

$$F_{px} = \frac{\sum_{i=x}^n F_i}{\sum_{i=x}^n \omega_i} \omega_x$$

Onde:

F_{px} – é a força mínima a ser aplicada ao diafragma na elevação x ;

F_i – é a força horizontal aplicada na elevação i ; corresponde às forças F_x , conforme definido no item 9.3.

w_i ou w_x – parte da carga gravitacional total que corresponde às elevações i ou x ;

Caso haja irregularidades do Tipo 2, conforme definido na Tabela 8.2, os diafragmas deverão ser capazes também de transferir as forças aplicadas das extremidades inferiores dos elementos resistentes verticais acima da elevação, para as extremidades superiores dos elementos abaixo da mesma.
Devem receber especial atenção as regiões de transferência das forças dos diafragmas para os sistemas sismo-resistentes verticais. Nas estruturas de categoria sísmica C, estas regiões devem ser dimensionadas para o sismo horizontal incluindo sobre-resistência, conforme definido no item 8.4.

8.9 Fixação de paredes

As paredes de concreto ou de alvenaria devem ser construídas de forma que haja uma fixação direta das mesmas ao piso e ao teto da construção. As paredes e sua correspondente fixação à estrutura devem ser dimensionadas considerando uma força sísmica horizontal, no sentido transversal à parede, produzida por uma aceleração igual a:

$$a_{gl} = I \cdot a_{gs0}$$

Nesta expressão, I é o fator de importância de utilização definido na Tabela 7.1.

8.10 Limitações para deslocamentos absolutos e deslocamentos relativos de um pavimento

As estruturas e as partes de uma estrutura separadas por juntas de construção, deverão apresentar entre si distâncias que permitam que não haja contato entre as mesmas para os deslocamentos absolutos δ_x nas elevações, avaliados conforme definido no item 9.5.

Os deslocamentos relativos Δ_x de um pavimento x , avaliados conforme definido no item 9.5, são limitados aos valores máximos definidos na Tabela 8.4. A variável h_{xx} é a distância entre as duas elevações correspondentes ao pavimento em questão.

Para as estruturas em que haja efeitos de torção importantes, estes devem ser considerados na avaliação dos deslocamentos relativos Δ_x de pavimento. Caso haja irregularidade no plano do Tipo 1, conforme definido na Tabela 8.2, em estruturas de categoria sísmica C, os deslocamentos relativos devem ser calculados como a máxima diferença entre os deslocamentos medidos ao longo das linhas do contorno da estrutura nas duas elevações correspondentes ao pavimento em questão.

Tabela 8.4 – Limitação para deslocamentos relativos de pavimento (Δ_x)

Categoria de utilização		
I	II	III
0,020 h_{xx}	0,015 h_{xx}	0,010 h_{xx}

9 Análise sísmica pelo método das forças horizontais equivalentes

9.1 Força horizontal total

A força horizontal total na base da estrutura, em uma dada direção, é determinada de acordo com a expressão:

$$V = C_s \cdot W$$

C_s é o coeficiente de resposta sísmica, conforme definido a seguir e W é o peso total da estrutura, determinado conforme estabelecido no item 8.7.2. O coeficiente de resposta sísmica é definido como:

$$C_s = \frac{2,5 \cdot a_{gs0}}{(R/I)}$$

A grandeza a_{gs0} , aceleração espectral para o período de 0,0s, já considerando o efeito da amplificação sísmica no solo, está definida no item 6.3. O fator de importância de utilização I está definido na Tabela 7.1 e o coeficiente de modificação de resposta R é definido na Tabela 8.1. O coeficiente de resposta sísmica não precisa ser maior que o valor abaixo:

$$C_s = \frac{a_{gs0}}{T(R/I)}$$

O período natural da estrutura T deve ser determinado de acordo com o item 9.2. O valor mínimo para C_s é dado por:

$$C_s = 0,01$$

É permitida a redução das forças sísmicas, considerando os efeitos da interação solo-estrutura, desde que os procedimentos utilizados sejam adequadamente justificados na análise.

9.2 Determinação do período

O período natural da estrutura T deve ser obtido por um processo de extração modal, que leve em conta as características mecânicas e de massa da estrutura. O período avaliado desta forma não poderá ser maior do que o produto do coeficiente de limitação do período C_{up} , definido na Tabela 9.1 em função da zona sísmica à qual a estrutura em questão pertence, vezes o período natural aproximado da estrutura T_a , obtido através da expressão abaixo:

$$T_a = C_T \cdot h_n^x$$

Nesta expressão, os coeficientes C_T (coeficiente de período da estrutura) e x são definidos por:

$C_T = 0,0724$ e $x = 0,8$ para estruturas em que as forças sísmicas horizontais são 100% resistidas por pórticos de aço momento-resistentes, não sendo estes ligados a sistemas mais rígidos que impeçam sua livre deformação quando submetidos à ação sísmica;

$C_T = 0,0466$ e $x = 0,9$ para estruturas em que as forças sísmicas horizontais são 100% resistidas por pórticos de concreto, não sendo estes ligados a sistemas mais rígidos que impeçam sua livre deformação quando submetidos à ação sísmica;

$C_T = 0,0731$ e $x = 0,75$ para estruturas em que as forças sísmicas horizontais são resistidas em parte por pórticos de aço contraventados com treliças;

$C_T = 0,0488$ e $x = 0,75$ para todas as outras estruturas;

h_n é a altura em metros da estrutura acima da base.

Tabela 9.1 – Coeficiente de limitação do período

Zona sísmica	Coeficiente de limitação do período (C_{up})
Zona 2	1,7
Zona 3	1,6
Zona 4	1,5

Como alternativa à determinação analítica de T , é permitido utilizar diretamente o período natural aproximado da estrutura T_a .

9.3 Distribuição vertical das forças sísmicas

A força horizontal total na base V é distribuída verticalmente entre as várias elevações da estrutura de forma que, em cada elevação x , seja aplicada uma força F_x definida de acordo

$$F_x = C_{vx} \cdot V$$

onde:

$$C_{vx} = \frac{w_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot h_i^k}$$

C_{vx} é o coeficiente de distribuição vertical;

w_i ou w_x – parte do peso efetivo total que corresponde às elevações i ou x ;

h_i ou h_x – altura entre a base e as elevações i ou x ;

k – expoente de distribuição, relacionado ao período natural da estrutura T :

- para estruturas com período inferior a 0,5s, $k = 1$;
- para estruturas com períodos entre 0,5s e 2,5s, $k = (T + 1,5)/2$;
- para estruturas com período superior a 2,5s, $k = 2$.

9.4 Distribuição das forças sísmicas horizontais e torção

9.4.1 Modelo de distribuição das forças sísmicas horizontais

As forças sísmicas horizontais F_x , correspondentes a cada elevação x , devem ser aplicadas a um modelo de distribuição destas forças entre os diversos elementos verticais sísmo-resistentes, que considere a rigidez relativa dos diversos elementos verticais e dos diafragmas horizontais. Este modelo poderá ser também utilizado para avaliar os efeitos de torção na estrutura.

9.4.2 Consideração da torção

O projeto deverá incluir um momento de torção nos pisos causado pela excentricidade dos centros de massa relativamente aos centros de rigidez (M_f - momento de torção inerente), acrescido de um momento torsional acidental (M_{ta}), determinado considerando-se um deslocamento do centro de massa em cada direção igual a 5% da dimensão da estrutura paralela ao eixo perpendicular à direção de aplicação das forças horizontais. Quando houver aplicação simultânea de forças horizontais nas duas direções, bastará considerar o momento acidental obtido na direção mais crítica.

Nos casos das estruturas de categoria sísmica C, onde exista irregularidade estrutural no plano do Tipo 1, conforme definido na Tabela 8.2, a soma dos momentos M_f e M_{ta} em cada elevação deve ser multiplicada pelo fator de amplificação torsional A_x , definido por:

$$A_x = \left(\frac{\delta_{\max}}{1,2\delta_{\text{avg}}} \right)^2$$

Nesta expressão, δ_{\max} é o deslocamento horizontal máximo em uma direção, na elevação x em questão e δ_{avg} é a média dos deslocamentos na mesma direção, nos pontos extremos da estrutura em um eixo transversal a esta direção. O fator A_x não precisa ser considerado com valor superior a 3,0.

9.5 Determinação dos deslocamentos relativos e absolutos

Os deslocamentos absolutos das elevações δ_x e os relativos Δ_x dos pavimentos devem ser determinados com base na aplicação das forças sísmicas de projeto ao modelo matemático da estrutura. Nesta avaliação, as propriedades de rigidez dos elementos de concreto devem levar em conta a redução de rigidez pela fissuração.

Os deslocamentos absolutos δ_x em uma elevação x , avaliados em seu centro de massa, devem ser determinados através da seguinte expressão:

$$\delta_x = \frac{C_d \cdot \delta_{xe}}{I}$$

C_d é o coeficiente de amplificação de deslocamentos, definido na Tabela 8.1, δ_{xe} é o deslocamento determinado em uma análise estática utilizando as forças sísmicas definidas no item 9.3 e I é o fator de importância de utilização definido na Tabela 7.1. A limitação de períodos estabelecida no item 9.2 não precisará ser obedecida nesta análise.

Os deslocamentos relativos dos pavimentos Δ_x são determinados como a diferença entre os deslocamentos absolutos nos centros de massa δ_x nas elevações acima e abaixo do pavimento em questão. Para as estruturas de categoria sísmica C, onde exista irregularidade estrutural no plano do Tipo 1, os deslocamentos relativos Δ_x devem ser avaliados como a maior diferença entre os deslocamentos ao longo do contorno, nas elevações superior e inferior correspondentes ao pavimento em questão. Nos pórticos momento-resistentes de aço, a contribuição das deformações nas zonas dos painéis deverá ser considerada na avaliação dos deslocamentos relativos dos pavimentos.

9.6 Efeito P-delta

O efeito de segunda ordem P-delta nos esforços estruturais e deslocamentos, não precisará ser considerado se o coeficiente de estabilidade θ , determinado pela expressão abaixo, for inferior a 0,10:

$$\theta = \frac{P_x \cdot \Delta_x}{V_x \cdot h_{xx} \cdot C_d}$$

Onde:

P_x – força normal em serviço atuando no pavimento x , obtida com fatores de ponderação de cargas tomados iguais a 1,00.

Δ_x - deslocamentos relativos de pavimento, determinados como definido no item 9.5.

V_x – força cortante sísmica atuante no pavimento x .

h_{xx} - distância entre as duas elevações correspondentes ao pavimento em questão.

C_d – coeficiente de amplificação de deslocamentos, definido na Tabela 8.1.

O valor do coeficiente de estabilidade θ não poderá exceder o valor máximo θ_{max} definido de acordo com a expressão:

$$\theta_{max} = \frac{0,5}{C_d} \leq 0,25$$

Quando o valor de θ estiver entre 0,1 e θ_{max} , os esforços nos elementos e os deslocamentos deverão ser multiplicados pelo fator $1,00/(1 - \theta)$.

10 Análise sísmica pelo método espectral

10.1 Número de modos a ser considerado

O número de modos a ser considerado na análise espectral deverá ser suficiente para capturar ao menos 90% da massa total em cada uma das direções ortogonais consideradas na análise.

10.2 Respostas modais para o projeto

O espectro de projeto definido no item 6.3 deverá ser considerado nas direções ortogonais analisadas.

Todas as respostas modais obtidas em termos de forças, momentos e reações de apoio devem ser multiplicadas pelo fator R .

Todas as respostas obtidas em termos de deslocamentos absolutos e relativos devem ser multiplicadas pelo fator C_d/R .

10.3 Combinação das respostas modais

As respostas elásticas finais poderão ser combinadas pela regra da raiz quadrada da soma dos quadrados das respostas obtidas em cada modo de vibração. No caso de proximidade entre as frequências dos modos de vibração (frequências próprias afastadas de menos de 10% do valor de uma das mesmas), deverá ser aplicada regra de combinação mais precisa, que considere os efeitos da proximidade entre os modos.

Com relação às respostas elásticas devidas aos sismos aplicados em diferentes direções ortogonais, as respostas finais também serão obtidas através da regra da raiz quadrada da soma dos quadrados das respostas obtidas em cada uma das direções.

10.4 Verificação das forças obtidas pelo processo espectral

A força horizontal total na base da estrutura V deverá ser determinada em cada uma das duas direções horizontais, pelo método das forças horizontais equivalentes, de acordo com o item 9.1. Caso a força horizontal total na base V_b determinada pelo processo espectral de acordo com o item 10.3, em uma direção, for inferior a $0,85 V$, todas as forças elásticas obtidas nesta direção devem ser multiplicadas por $0,85 V/V_b$. Esta correção não se aplicará para os deslocamentos absolutos e relativos.

10.5 Distribuição das forças sísmicas horizontais

As forças sísmicas horizontais F_x , correspondentes a cada elevação x , devem ser aplicadas a um modelo de distribuição destas forças conforme foi definido no item 9.4.1. Este modelo poderá ser também utilizado para avaliar os efeitos de torção na estrutura. A amplificação torsional, conforme definido no item 9.4.2, não precisará ser considerada, se o modelo de análise dinâmica já levar em conta os efeitos da torção acidental.

10.6 Redução das forças pelo efeito de interação solo-estrutura

É permitido considerar a redução das forças sísmicas pelos efeitos de interação dinâmica solo-estrutura, desde que os procedimentos utilizados sejam adequadamente justificados na análise.

11 Análise sísmica com históricos de acelerações no tempo

11.1 Requisitos da análise

A análise com históricos de acelerações no tempo deverá consistir da análise dinâmica de um modelo definido de acordo com os requisitos do item 8.7, submetido a históricos de acelerações no tempo (acelerogramas) aplicados à sua base, compatíveis com o espectro de projeto definido para a estrutura, de acordo com o item 6.3. Pelo menos três conjuntos de acelerogramas deverão ser considerados na análise.

11.2 Requisitos para os acelerogramas

As análises consistirão na aplicação simultânea de um conjunto de acelerogramas, independentes entre si, nas direções ortogonais relevantes para cada problema. Os acelerogramas poderão ser registros de eventos reais, compatíveis com as características sismológicas do local de estrutura, ou poderão ser acelerogramas gerados artificialmente. Os acelerogramas a serem aplicados deverão ser afetados de um fator de escala, de forma que os espectros de resposta na direção considerada, para o amortecimento de 5%, tenham valores médios não inferiores aos do espectro de projeto para uma faixa entre $0,2T$ e $1,5T$, sendo T o período fundamental da estrutura nesta direção.

11.3 Definição dos efeitos finais obtidos na análise

Para cada acelerograma analisado, as respostas obtidas em termos de forças, momentos e reações de apoio devem ser multiplicadas pelo fator W .

A força horizontal total na base da estrutura V deverá ser determinada pelo método das forças horizontais equivalentes, de acordo com o item 9.1, usando o valor de $C_s = 0,01$. Caso a força horizontal máxima na base V_s obtida com um determinado acelerograma, for inferior a V , todas as forças elásticas obtidas nesta direção, com este acelerograma, devem ser multiplicadas por WV_s .

Os efeitos finais obtidos na análise corresponderão à envoltória dos efeitos máximos obtidos com cada um dos conjuntos de acelerogramas considerados.

12 Requisitos sísmicos para componentes não estruturais de prédios

Todo componente arquitetônico, elétrico ou mecânico, permanentemente fixado a uma estrutura, deverá ser projetado de forma a resistir às forças sísmicas a ele aplicadas e de forma que estas forças sejam adequadamente transferidas para a estrutura principal.

12.1 Categoria sísmica e fator de importância

Os componentes não-estruturais serão classificados dentro da mesma categoria sísmica da estrutura principal à qual estão fixados. A cada componente será definido um fator de importância I_p . Será considerado o fator $I_p = 1,5$ nas seguintes situações:

- o componente desempenha função ligada à preservação da vida após o terremoto, incluindo os sistemas de proteção contra incêndio;
- o componente abriga substâncias químicas ou tóxicas potencialmente nocivas à população;
- o componente está ligado a uma instalação de categoria de utilização III e é necessária à operação desta instalação, ou sua ruptura pode impedir esta operação.

Os demais componentes terão o fator $I_p = 1,0$.

12.2 Forças sísmicas de projeto

Os componentes serão projetados para resistirem a forças, aplicadas a cada uma de duas direções horizontais ortogonais, iguais a:

$$F_p = \frac{a_p \cdot a_{gs0} \cdot W_p \cdot I_p}{R_p} \left(1 + 2 \cdot \frac{z}{h} \right)$$

F_p – força sísmica horizontal aplicada ao componente.

a_p – fator de amplificação do componente, conforme definido na Tabela 12.1.

a_{gs0} – aceleração espectral para o período de 0,0s, conforme definido no item 6.3.

W_p – peso operacional do componente.

I_p – fator de importância do componente, conforme definido no item 12.1.

R_p – coeficiente de modificação de resposta do componente, conforme definido na Tabela 12.1.

z/h – relação entre a altura em que o componente é fixado, em relação à base da estrutura e a altura total da estrutura. Esta relação deverá variar entre 0,0 e 1,0.

F_p deverá estar limitada entre os valores extremos definidos abaixo:

$$0,75 \cdot a_{gs0} \cdot I_p \cdot W_p \leq F_p \leq 4,0 \cdot a_{gs0} \cdot I_p \cdot W_p$$

Uma força vertical de $\pm 0,5 \cdot a_{gs0} \cdot W_p$ deverá ser aplicada simultaneamente às forças horizontais. O coeficiente de sobre-resistência Ω_0 não se aplicará neste caso.

Tabela 12.1 – Coeficientes para componentes não estruturais

Componente	Fator de amplificação do componente a_p	Coeficiente de modificação de resposta do componente R_p
Paredes internas não estruturais não reforçadas de alvenaria.	1,0	1,5
Outras paredes internas não estruturais.	1,0	2,5
Elementos em balanço não contraventados, ou contraventados a um nível inferior a seu centro de massa: parapecitos, paredes interiores não estruturais em balanço e chaminés contraventadas lateralmente.	2,5	2,5
Elementos em balanço contraventados a um nível superior a seu centro de massa: parapecitos, chaminés e paredes exteriores não estruturais.	1,0	2,5
Ancoragens dos elementos de ligação de paredes exteriores não estruturais	1,25	1,0
Coberturas, exceto quando sua estrutura é uma extensão da estrutura principal.	2,5	3,5
Tetos	1,0	2,5
Compartimentos de armazenamento e equipamentos de laboratório	1,0	2,5
Pisos de acesso	1,0	1,5
Apêndices e ornamentações	2,5	2,5
Sinais e cartazes	2,5	2,5
Outros componentes rígidos:		
Elementos de alta deformabilidade	1,0	3,5
Elementos de deformabilidade limitada	1,0	2,5
Elementos de baixa deformabilidade	1,0	1,5
Outros componentes flexíveis:		
Elementos de alta deformabilidade	2,5	3,5
Elementos de deformabilidade limitada	2,5	2,5
Elementos de baixa deformabilidade	2,5	1,5

Componentes flexíveis têm o período fundamental T maior que 0,06s.

Componentes rígidos têm o período fundamental T menor ou igual a 0,06s.

Elementos de alta deformabilidade têm a relação entre deformação de ruptura e deformação elástica máxima superior a 3,5.

Elementos de deformabilidade limitada têm a relação entre deformação de ruptura e deformação elástica máxima entre 1,5 e 3,5.

Elementos de baixa deformabilidade têm a relação entre deformação de ruptura e deformação elástica máxima inferior a 1,5.

12.3 Ancoragem dos elementos não estruturais

Os elementos de ligação dos componentes não estruturais à estrutura principal (parafusos, chumbadores, soldas, rebites, etc.) deverão ser projetados sem considerar o efeito favorável das forças horizontais de atrito decorrentes da ação da gravidade. As forças para o projeto são as determinadas de acordo com o estabelecido no item 12.2.

As ancoragens em concreto ou em alvenaria deverão ser dimensionadas com forças pelo menos 1,3 vezes as obtidas de acordo com o item 12.2. Os valores de R_p a serem considerados na determinação das forças nas ancoragens não deverão ser maiores do que 1,5.