

# Definição dos Requisitos Mínimos Necessários para o Detalhamento Sismo-Resistente de Edifícios em Concreto Armado no Brasil

*Pedro Ivo Ishakewitsch Galvão<sup>1</sup>  
Sergio Hampshire C. Santos<sup>2</sup>  
Silvio de Souza Lima<sup>3</sup>*

## Resumo

A possibilidade da ocorrência de sismos no Brasil, que possam comprometer a segurança das estruturas, é hoje amplamente conhecida e aceita pelo meio técnico nacional. A NBR15421 (2006) define os requisitos mínimos a serem atendidos no projeto de edifícios, considerando as solicitações de caráter sísmico. Embora a determinação das forças sísmicas em estruturas de edifícios esteja claramente definida nessa norma, não são explicitados os critérios que definem os níveis de detalhamento “intermediário” e “especial”, sendo assumido que o detalhamento “usual” é aquele que corresponde ao atendimento aos requisitos mínimos estabelecidos na NBR6118(2007). Dessa forma, para que os projetistas se beneficiem das reduções das forças sísmicas decorrentes da consideração dos níveis de detalhamento “intermediário” e “especial” é necessário se recorrer a normas estrangeiras, como a ACI-318 (2011) e ASCE-7 (2010). Com base nestas recomendações, será apresentado o cálculo em modelo computacional e o detalhamento completo de um pilar de um edifício-padrão de 12 andares, cuja análise sísmica foi já realizada em outras publicações.

**Palavras-chave:** Análise Sísmica, Concreto Armado, Detalhamento Sismo-Resistente.

## 1 Introdução

O Brasil encontra-se em uma região continental estável, no interior da placa tectônica Sul-Americana. Por consequência, a sismicidade brasileira é modesta se comparada a outras regiões nas bordas de placas. Entretanto, o território brasileiro não está imune a terremotos e o risco sísmico em nosso país não pode ser simplesmente ignorado.

A norma brasileira NBR 5421 define a verificação de segurança nas estruturas usuais da construção civil para as ações sísmicas. Nessa norma, observa-se que o comportamento de uma estrutura sob as ações sísmicas depende, entre outros fatores, do sistema básico sismo-resistente, da categoria sísmica em que esta se enquadra e do nível de detalhamento considerado, relativamente à ductilidade estrutural.

Nessa norma estabelecidos os critérios que definem os níveis de detalhamento “intermediário” e “especial”, sendo assumido que o detalhamento “usual”

é aquele que corresponde ao atendimento aos requisitos estabelecidos na NBR6118. Para a definição dos níveis de detalhamento sismo-resistentes “intermediário” e “especial”, deverá se recorrer a normas estrangeiras, como a ACI-318 e a ASCE-7.

Neste trabalho será apresentada a aplicação destes conceitos de detalhamento sismo-resistente a um elemento estrutural, um pilar de um edifício-padrão de 12 andares, cuja análise sísmica já foi realizada em outras publicações.

### **Requisitos para detalhamento sismo-resistente das estruturas**

Considerando-se os critérios da ASCE-7, os requisitos necessários para a definição do nível mínimo de detalhamento são estabelecidos em uma Categoria de Detalhamento Sísmico (CDS). Esta relaciona os tipos de detalhamento sismo-resistente, usual (A e B), intermediário (C) e especial (D), com a aceleração

1 Eng. Civil, Mestre do Programa de Projeto de Estruturas, PPE/UFRJ/ e-mail: pedroivoig@gmail.com

2 Professor Associado (D.Sc.). Departamento de Estruturas, UFRJ/ e-mail: sergiohampshire@poli.ufrj.br

3 Professor Associado (D.Sc.). Departamento de Estruturas, UFRJ/ e-mail: sdesouzalima@gmail.com

espectral para o período de 1,0 s,  $a_{gs1}$ , e com a Categoria de Risco Sísmico da Edificação (I, II ou III), conforme definido na Tabela 1.

**Tabela 1** – Categoria de detalhamento sísmico (adaptado da ASCE-7).

	Categoria de Risco	
	I ou II	III
$a_{gs1} \leq 0,067$	A	A
$0,067 < a_{gs1} \leq 0,133$	B	C
$0,133 < a_{gs1} \leq 0,20$	C	D
$0,20 < a_{gs1}$	D	D

Conforme o item 11.4.1 da ASCE-7, nas estruturas em locais onde a aceleração sísmica horizontal característica  $a_g$  for menor ou igual que 0,025, será permitido se adotar a Categoria de Detalhamento Sísmico A. Nas outras situações a Tabela 2 deverá ser consultada. Observa-se nesta tabela, que o dimensionamento e o detalhamento requeridos devem ser compatibilizados com o nível de dissipação de energia considerado na avaliação das forças sísmicas. Entretanto, a critério do projetista, podem ser adotados níveis de detalhamento mais rígidos, a fim de que se possa beneficiar de maiores reduções das forças sísmicas em razão da resposta da estrutura no regime elasto-plástico não linear.

**Tabela 2** – Categoria de detalhamento sísmico em função das zonas sísmicas e da classe do terreno.

Zonas sísmicas	Aceleração Sísmica horizontal na rocha	Aceleração espectral com amplificação sísmica no solo					Categoria de detalhamento sísmico				
		Classe do terreno					Classe do terreno				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0	0,025	0,02	0,03	0,04	0,06	<b>0,09</b>	A	A	A	A	<b>B</b>
	0,030	0,02	0,03	0,05	<b>0,07</b>	<b>0,11</b>	A	A	A	<b>B</b>	<b>B</b>
	0,035	0,03	0,04	0,06	<b>0,08</b>	<b>0,12</b>	A	A	A	<b>B</b>	<b>B</b>
1	0,040	0,03	0,04	0,07	<b>0,10</b>	0,14	A	A	A	<b>B</b>	C
	0,045	0,04	0,05	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	0,16	A	A	<b>B</b>	<b>B</b>	C
	0,050	0,04	0,05	<b>0,09</b>	<b>0,12</b>	0,18	A	A	<b>B</b>	<b>B</b>	C
2	0,055	0,04	0,05	<b>0,09</b>	<b>0,13</b>	0,19	A	A	<b>B</b>	<b>B</b>	C
	0,060	0,05	0,06	<b>0,10</b>	0,14	0,21	A	A	<b>B</b>	C	D
	0,065	0,05	0,07	<b>0,11</b>	0,16	0,23	A	A	<b>B</b>	C	D
	0,070	0,06	<b>0,07</b>	<b>0,12</b>	0,17	0,25	A	<b>B</b>	<b>B</b>	C	D
	0,075	0,06	<b>0,08</b>	<b>0,13</b>	0,18	0,26	A	<b>B</b>	<b>B</b>	C	D
	0,080	0,06	<b>0,08</b>	0,14	0,19	0,28	A	<b>B</b>	C	C	D
	0,085	0,07	<b>0,09</b>	0,14	0,20	0,30	A	<b>B</b>	C	D	D
	0,090	<b>0,07</b>	<b>0,09</b>	0,15	0,22	0,32	<b>B</b>	<b>B</b>	C	D	D
	0,095	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	0,16	0,23	0,33	<b>B</b>	<b>B</b>	C	D	D
	0,100	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	0,17	0,24	0,35	<b>B</b>	<b>B</b>	C	D	D
3	0,105	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	0,18	0,25	0,37	<b>B</b>	<b>B</b>	C	D	D
	0,110	<b>0,09</b>	<b>0,11</b>	0,19	0,26	0,39	<b>B</b>	<b>B</b>	C	D	D
	0,115	<b>0,09</b>	<b>0,12</b>	0,20	0,28	0,40	<b>B</b>	<b>B</b>	C	D	D
	0,120	<b>0,10</b>	<b>0,12</b>	0,20	0,29	0,42	<b>B</b>	<b>B</b>	D	D	D
	0,125	<b>0,10</b>	<b>0,13</b>	0,21	0,30	0,44	<b>B</b>	<b>B</b>	D	D	D
	0,130	<b>0,10</b>	<b>0,13</b>	0,22	0,31	0,46	<b>B</b>	<b>B</b>	D	D	D
	0,135	<b>0,11</b>	0,14	0,23	0,32	0,47	<b>B</b>	C	D	D	D
	0,140	<b>0,11</b>	0,14	0,24	0,34	0,49	<b>B</b>	C	D	D	D
4	0,145	<b>0,12</b>	0,15	0,25	0,35	0,51	<b>B</b>	C	D	D	D
	0,150	<b>0,12</b>	0,15	0,26	0,33	0,51	<b>B</b>	C	D	D	D

**Sistemas básicos sismos-resistentes**

A definição do sistema básico sismo-resistente de um edifício deverá estar de acordo com a CDS em que esse se encontra, e em alguns casos há também limitação pela altura da edificação, como definido na Tabela 3, baseada na ASCE-7. Os coeficientes de projeto a serem utilizados para a definição das solicitações sísmicas, conforme item 8.2.1, Tabela 6, da

NBR 15421, deverão estar de acordo com o sistema básico sismo-resistente adotado.

**Descrição do edifício estudado**

O exemplo será um edifício convencional, a partir da adaptação de um modelo já analisado por GOSH *et al.* (2004). Conforme a Tabela 4 o edifício apresenta as seguintes dimensões:

**Tabela 3** – Categoria de detalhamento sísmico em função dos tipos de detalhamento sismo-resistente (adaptado da ASCE-7, Tabela 12.2-1).

Sistema básico sismo-resistente	Limite dos sistemas estruturais e das alturas das estruturas		
	Categoria de Detalhamento Sísmico		
	B	C	D
Pilares-parede de concreto com detalhamento especial	Sem limitação	Sem limitação	Sem limitação
Pilares-parede de concreto com detalhamento usual	Sem limitação	Sem limitação	Não Permitido
Pórticos de concreto com detalhamento especial	Sem limitação	Sem limitação	Sem limitação
Pórticos de concreto com detalhamento intermediário	Sem limitação	Sem limitação	Não Permitido
Pórticos de concreto com detalhamento usual	Sem limitação	Não permitido	Não Permitido
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento especial e pilares-parede de concreto com detalhamento especial	Sem limitação	Sem limitação	Sem limitação
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento especial e pilares-parede de concreto com detalhamento usual	Sem limitação	Sem limitação	Não Permitido
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento intermediário e pilares-parede de concreto com detalhamento usual	Sem limitação	Sem limitação	Até 49 m
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento intermediário e pilares-parede de concreto com detalhamento usual	Sem limitação	Sem limitação	Não Permitido
Sistema dual, composto de pórticos com detalhamento usual e pilares-parede de concreto com detalhamento usual	Sem limitação	Não Permitido	Não Permitido

**Tabela 4** – Principais dimensões do edifício em estudo.

Pavimento Tipo (m)	Altura do edifício (m)	Pilares (cm)	Vigas (cm)	Lajes (cm)	Pilares-parede (cm)
20,11 x 55,44	45,15	60 x 60	30 x 80	15	792 x 30

O edifício foi modelado com elementos finitos, por meio do programa de análise estrutural SAP2000. Conforme visto na Figura 1, são utilizados elementos de barra que simulam pilares e vigas e elementos tipo “shell” que simulam as lajes e os pilares-parede. Para efeito do estudo as características físicas para o concreto são: resistência característica à compressão do concreto igual a 28 MPa, módulo de elasticidade de 32 GPa e categoria do aço, CA-50.

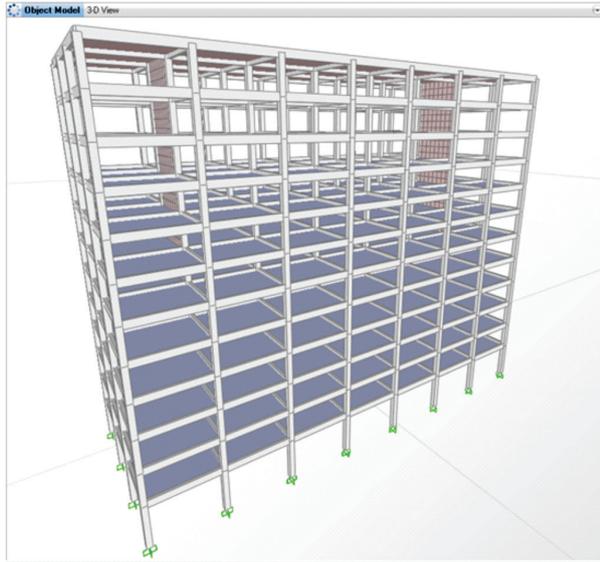


Figura 1 – Modelo estrutural gerado pelo SAP2000.

### Cargas permanentes, acidentais e sísmicas

O peso próprio da estrutura é calculado pelo programa SAP2000, tomando-se 25 kN/m<sup>3</sup> para o concreto. A sobrecarga adotada é de 3 kN/m<sup>2</sup> (pavimentos tipo) e 2 kN/m<sup>2</sup> (cobertura).

Para a definição das ações sísmicas se considera a edificação em análise localizada na cidade de Cruzeiro do Sul, estado do Acre, onde a aceleração horizontal máxima na rocha  $a_g$  a considerar é 0,15g, conforme a NBR15421. Considera-se a classe do terreno igual a E (solo mole) e categoria de utilização II, com fator de importância de utilização I igual a 1,25.

Para estruturas simples e regulares, que é o caso do edifício analisado, a NBR 15421 permite a aplicação do método das forças estáticas equivalentes. Para a aplicação desse método considera-se o período fundamental da estrutura na direção longitudinal X, obtido na análise no SAP2000:  $T = 1,73s$ . Esse valor é conservadoramente considerado nas duas direções. A massa total da estrutura é de 11.783 toneladas.

Devido à sua localização e a classe do terreno considerada, o edifício apresentará a CDS igual a D, conforme a Tabela 2. Assim, pode ser adotado como sistema sismo-resistente o dual composto de pórticos e pilares-parede de concreto com detalhamento espe-

cial. A esse sistema corresponde o coeficiente de modificação (redução) de resposta R igual a 7.

A partir da localização e da classe do terreno, pela NBR 15421 definem-se as acelerações espectrais para os períodos de 0,0s e 1,0s, que são:

$$a_{ss0} = C_a \cdot a_g = 2,1 \cdot 0,15 \cdot 9,81 = 3,09 \text{ m/s}^2 \quad (1)$$

$$a_{ss1} = C_v \times a_g = 3,4 \cdot 0,15 \cdot 9,81 = 5,00 \text{ m/s}^2 \quad (2)$$

O coeficiente de resposta sísmica é definido como o menor entre os dois valores abaixo:

$$C_s = \frac{2,5(a_{gs0}/g)}{(R/I)} = \frac{2,5(3,09/9,81)}{(7/1,25)} = 0,1407 \quad (3)$$

$$C_s = \frac{(a_{gs1}/g)}{T(R/I)} = \frac{(5,00/9,81)}{1,73(7/1,25)} = 0,0526 \quad (4)$$

Força sísmica horizontal total na base da estrutura é então:

$$H = C_s \times W = 0,0526 \times 11783 \times 9,81 = 6080 \text{ kN} \quad (5)$$

A força horizontal total na base  $H$  é distribuída verticalmente entre as várias elevações da estrutura, considerando-se a aceleração horizontal variando linearmente na altura do prédio:

$$F_x = C_{vx} H \quad (6)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (7)$$

### Combinação de cargas

Com base na NBR 15421 é considerada a seguinte combinação de cargas:

$$F_d = 1,2 \Sigma F_g + \Sigma F_q + F_{exc} \quad (8)$$

Nesta combinação,  $F_d$ ,  $F_g$ ,  $F_q$  e  $F_{exc}$  são o valor numérico de uma determinada solicitação de cálculo nas suas parcelas de cargas permanente, acidental e sísmica. A Figura 2 ilustra a aplicação desta combinação de cargas nas direções X e Y no SAP2000.

### Detalhamento sismo-resistente de um pilar

Na Tabela 5 estão apresentados as solicitações no pilar mais solicitado. Nas duas primeiras linhas estão os esforços provenientes do sismo na direção X, na

base e no topo do pilar. Nas duas últimas linhas estão as solicitações devidas ao sismo na direção **Y**, na base e no topo do pilar. A consideração dos efeitos de segunda ordem global já está computada no modelo estrutural.

O dimensionamento e o detalhamento completos de diversos elementos estruturais do edifício foram detalhadamente apresentados por GALVÃO (2014), juntamente com regras de detalhamento a serem obedecidas nos detalhamentos intermediário e especial.

Será apresentado o detalhamento de um pilar de 60 cm x 60 cm, que se localiza no térreo, com base na norma americana ACI-318, a partir dessas solicitações.

Verificação dos requisitos gerais:

- Força axial de compressão  
 $N_{sd} \geq A_c f_{ck} / 10 = 1008 \text{ kN};$
- As dimensões do pilar deverão ser maiores que 30 cm;
- A razão  $b_w/h = 1 > 0,4;$

### Dimensionamento das armaduras longitudinais

De forma a privilegiar a ruptura mais dúctil das vigas, relativamente à mais frágil dos pilares, esses últimos deverão ser pelo menos 6/5 mais resistentes que as vigas às solicitações que chegam em um nó. Quando consideradas partes das lajes como mesas de vigas T, as solicitações nessas mesas devem ser consideradas. O momento de flexão a ser considerado no pilar dimensionado, considerando-se a colaboração da laje como mesa da viga T, será de:

$$\Sigma M_{nc} \geq \frac{6}{5} \Sigma M_{nb} = \frac{6}{5} 1275 \text{ kNm} = 1530 \text{ kNm} \quad (9)$$

Como  $\lambda$  é igual a 28,3, menor que 35, a análise dos efeitos locais de segunda ordem no pilar pode ser dispensada.

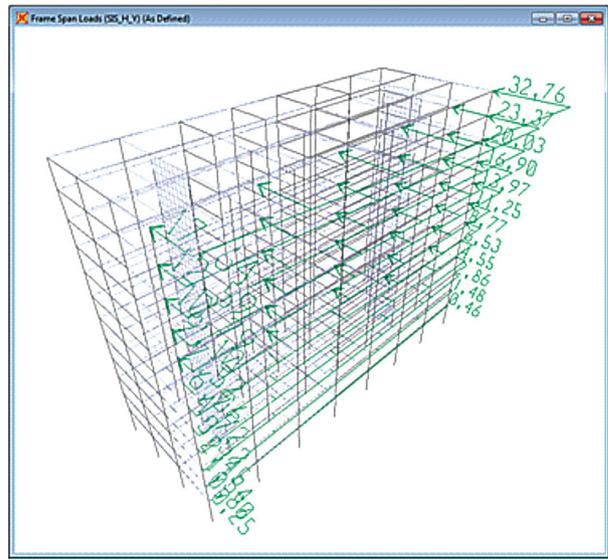
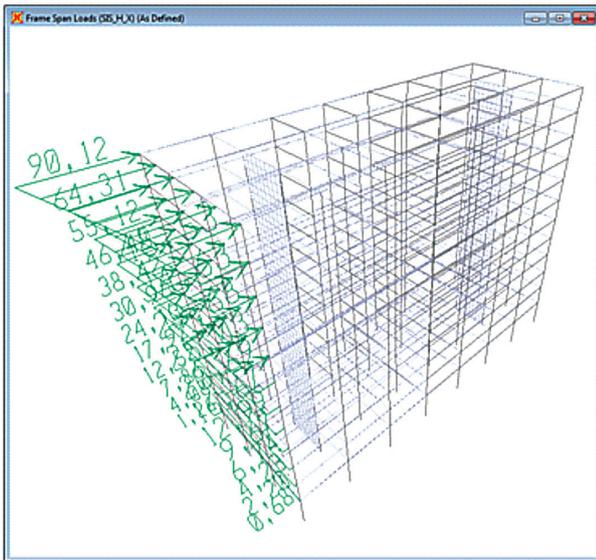


Figura 2 – Carregamento sísmico nas direções X e Y.

Tabela 5 – Solicitações no pilar devido aos sismos na direção X e Y.

Combinação	Elevações	P	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	T	M <sub>xx</sub>	M <sub>yy</sub>	Mmin
	m	KN	KN	KN	KNm	KNm	KNm	KNm
ELU_1_SISN_EX	0,00	-6405,6	227,4	-2,3	-0,2	-4,9	645,0	211,4
ELU_1_SISN_EX	4,90	-6365,8	227,4	-2,3	-0,2	6,2	-469,1	
ELU_1_SISN_EX	0,00	-6739,4	1,9	36,3	0,4	112,3	2,7	224,4
ELU_1_SISN_EX	4,90	-6699,5	1,9	36,3	0,4	-65,7	-6,5	

Onde: elevações – seção do pilar onde as solicitações são analisadas; P – solicitações axiais; V<sub>x</sub> e V<sub>y</sub> – forças cortantes nas direções X e Y; T – momentos de torção; M<sub>xx</sub> e M<sub>yy</sub> – momentos fletores sem torno de X e de Y; M<sub>min</sub> – momentos mínimos pela NBR6118.

Para a configuração de armadura mostrada na Figura 3, será verificado o pilar na flexão composta oblíqua, por meio da curva de interação gerada pelo programa OBLÍQUA, da Universidade Federal do Paraná. As solicitações últimas consideradas para tal verificação são:  $N = -6405 \text{ kN}$ ,  $M_x = 211 \text{ kNm}$  e  $M_y = 1530 \text{ kNm}$

Verifica-se que o pilar com a distribuição de armadura resiste às solicitações máximas, e atende às taxas de armadura mínima e máxima pela ACI-318 que são de 1% e 6%, respectivamente.

### Dimensionamento das armaduras transversais

Para o dimensionamento da armadura de cisalhamento no pilar, a força cortante de cálculo  $V_d$  não poderá ser menor que  $V_{e3,4}$  cujo valor é determinado conforme a Figura 4.

Os momentos nas extremidades  $M_{pr}$  são os momentos resistentes avaliados a partir das cargas normais atuantes e da armadura existente, com a tensão de escoamento igual a  $1,25 f_{yk}$ :

$$M_{pr} = \sum_{i=1}^n A_{s_i} \frac{1,25 f_y}{1,15} \left( d_i - \frac{y}{2} \right) \quad (10)$$

O valor do momento resistente máximo é de 1535 kNm. Assim, o cortante teórico será de:

$$V_e = \frac{M_{pr3} + M_{pr4}}{l} = \frac{2 \times 1535}{4,10} = 748 \text{ kN} \quad (11)$$

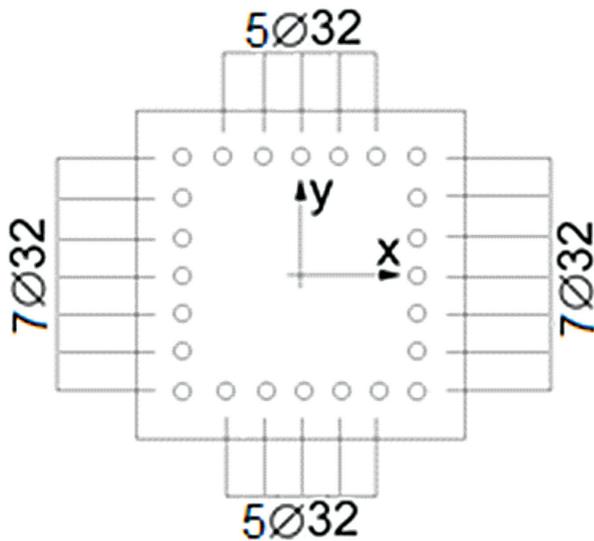


Figura 3 – Curva de interação na flexão composta oblíqua do pilar.

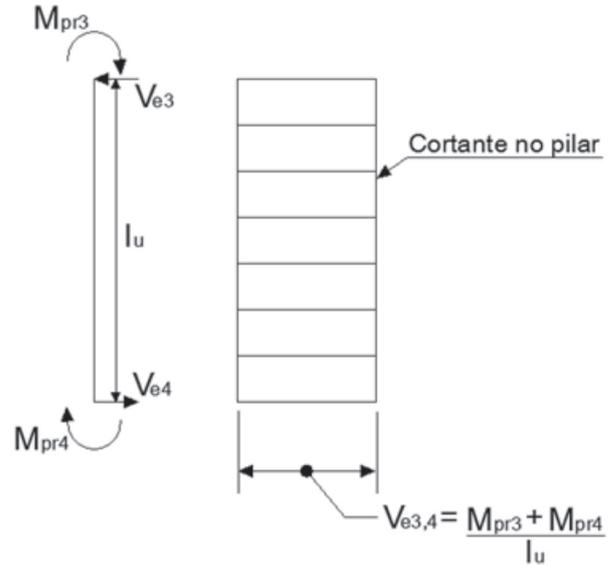
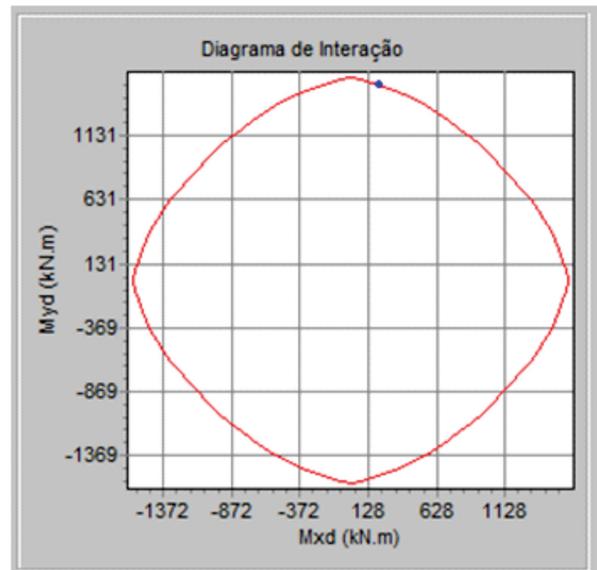


Figura 4 – Cortante de dimensionamento para pilares (adaptada da ACI318).

Comparando com o cortante apresentado na Tabela 5,  $V_e > V_2 = 295 \text{ kN}$ . Os cálculos as armaduras de cisalhamento do pilar são apresentados na Tabela 6. Observar que em alguns casos definidos na ACI 318, o valor de  $V_e$  a ser tomado poderá ser zero.

Embora a NBR6118 permita adoção de estribos de Ø8 mm a cada 15 ou Ø10 mm a cada 20 com 4 ramos, de acordo com a ACI-318 deverão ser atendidas as seguintes recomendações:

- o espaçamento entre eixo dos estribos não poderá exceder a quarta parte da menor dimensão do pilar:  $h/4 = 60/4 = 15 \text{ cm}$ ;



- o espaçamento entre eixos dos estribos não poderá exceder seis vezes o diâmetro da menor barra longitudinal:  $6\phi 32 = 6 \times 3,2 = 19 \text{ cm}$ ;
- o espaçamento entre eixos dos estribos não poderá exceder.

$$S_0 = 100 + (350 - h_x)/3 = 100 + (350 - 200)/3 = 15 \text{ cm};$$

- não se poderá utilizar barras menores que 10 mm de diâmetro.

Assim adotar-se-á  $\phi 10 \text{ mm}$  a cada 15 cm com 4 ramos, para todas as seções.

### Detalhe da armadura do pilar

Na Figura 5 está apresentado o detalhamento do pilar.

## Conclusões

No presente trabalho mostrou-se que há aspectos a complementar nas disposições regulamentares brasileiras para o dimensionamento sísmico. A base de

complementação proposta são as normas americanas ASCE-7 e a ACI-318.

Os requisitos para o detalhamento sismo-resistente, baseados nessas normas, balizariam o projetista nos tipos de detalhamento sismo-resistente a ser adotado, usual, intermediário e especial. Pela Tabela 2, percebe-se que já a partir da zona sísmica 1, os detalhamentos intermediário ou especial poderão ser necessários, e por essa razão, o desenvolvimento de recomendações de detalhamento sismo-resistentes nesses casos é de extrema urgência.

No exemplo apresentado mostrou-se que o detalhamento sismo-resistente recomendado pela ACI-318 preocupa-se com as rupturas frágeis, principalmente quanto ao cisalhamento. Outra preocupação é que os pilares sejam sempre mais resistentes do que as vigas que apoiam.

## Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI318-11).

Tabela 6 – Cálculo das armaduras de cisalhamento.

SEÇÃO	$b_w$ (cm)	$h$ (cm)	$d'$ (cm)	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{yk}$ (MPa)	$V_d$ (kN)	$V_{Rd2}$ (kN)	$V_{sw}$ (kN)	$CV$ (kN)	$A_{sw}$ ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )
Pilar	60	60	4,0	28	500	748	1611	460	274	21,41

Onde:  $b_w$  – largura da viga;  $h$  – altura da viga;  $d'$  – distância do centro de gravidade das armaduras até a face tracionada;  $V_d$  – cortante de cálculo;  $V_{Rd2}$  – força resistente de cálculo, relativa à compressão do concreto;  $V_{sw}$  – parcela de força cortante resistida pela armadura transversal;  $V_c$  – parcela de força cortante resistida por mecanismos complementares.

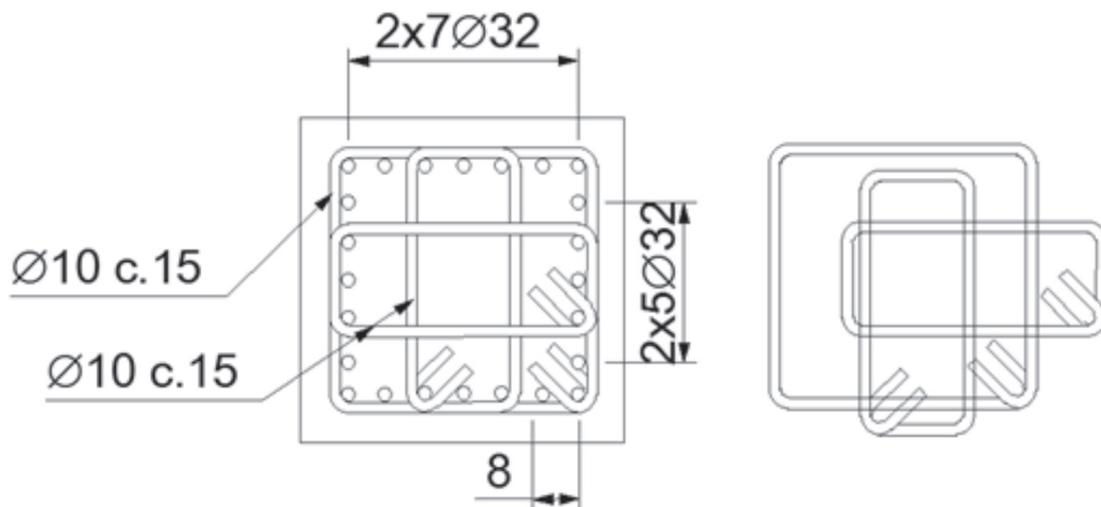


Figura 5 – Detalhe das armaduras do pilar P122.

Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary; Farmington Hills, M. I., United States, 2011.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures; Washington, D.C., United States, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR6118: Projetos de estruturas de concreto – Procedimento; Rio de Janeiro, R.J., Brasil, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR15421: Projeto de estruturas

resistentes a sismos – Procedimento; Rio de Janeiro, R.J., Brasil, 2006.

CENTRO DE ESTUDOS DE ENGENHARIA CIVIL PROFESSOR INALDO AYRES VIEIRA (CESEC-UFPR), Obliqua 1.0: Flexão Composta Obliqua, disponível em <http://www.cesec.ufpr.br/concretoarmado/>.

FANELLA, D. A., Seismic Detailing of Concrete Buildings, Michigan, Portland Cement Association, 2007.

GALVÃO, P. I. I., Definição de requisitos mínimos necessários para o detalhamento sismo-resistente de edifícios em concreto armado no Brasil, Dissertação de Mestrado, PPE/UFRJ, 2014.