



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS ANGICOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

IGOR JOSÉ NASCIMENTO DE MEDEIROS

**COMPORTAMENTO DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO E EM
ALVENARIA SOB AÇÕES SÍSMICAS**

ANGICOS - RN

2018

IGOR JOSÉ NASCIMENTO DE MEDEIROS

**COMPORTAMENTO DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO E EM
ALVENARIA SOB AÇÕES SÍSMICAS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), para obtenção do título de Bacharelado em Ciência e Tecnologia.

Orientador (a): Prof. Me. Klaus André de Sousa Medeiros.

ANGICOS - RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M488c Medeiros, Igor José Nascimento de.
Comportamento de Edifícios em Concreto Armado e
em Alvenaria Sob Ações Sísmicas / Igor José
Nascimento de Medeiros. - 2018.
46 f. : il.

Orientador: Klaus André de Sousa Medeiros.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2018.

1. Terremotos. 2. Vibrações Sísmicas. 3.
Resistência. 4. Forças Sísmicas. I. Medeiros, Klaus
André de Sousa, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

IGOR JOSÉ NASCIMENTO DE MEDEIROS

**COMPORTAMENTO DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO E EM
ALVENARIA SOB AÇÕES SÍSMICAS**

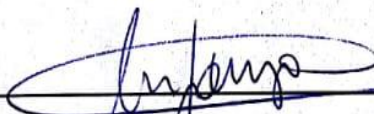
Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), para
obtenção do título de Bacharelado em Ciência e
Tecnologia.

APROVADA EM: 12 / 09 / 18

BANCA EXAMINADORA



Prof(a). Me(a). Klaus André de Sousa Medeiros, Orientador – UFERSA/Campus Angicos
Presidente



Prof(a). Dr(a). Wendell Rossine Medeiros de Souza – UFERSA/Campus Angicos
Primeiro Membro



Eng(a) Adryano José Mafaldo de Souza – UFRN/Natal
Segundo Membro

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, José Estevam de Medeiros Neto,
pai de família trabalhador, homem de caráter,
que foi a pessoa que mais me incentivou a
seguir em frente nas veredas do estudo e que,
sem dúvidas, é a pessoa com quem sempre eu
posso contar.

À minha mãe, Jeane Simone do Nascimento,
mulher dedicada aos filhos e a cuidar da casa,
sempre preocupada, à disposição de cuidar de
mim da melhor forma possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo seu amor por mim e por ter me abençoado grandemente em todas as áreas. Sem Ele, nada disso teria acontecido em minha vida. Em todos os momentos sempre o Senhor esteve comigo, então o que me resta é só agradecer-lo.

Aos meus pais por ter me proporcionado o estudo, mesmo com todas as dificuldades financeiras, a distância, mas eles nunca deixaram de se importar comigo, e sem eles para me darem forças, eu não conseguiria chegar até aqui. Não tenho palavras nem para agradecer por tudo o que vocês fazem por mim. Sem vocês, eu não teria chagado até aqui. Eu os amo muito!

A todos os meus familiares, que me ajudaram e me apoiaram direta e indiretamente, pois a ajuda de todos eles somaram para esta grande conquista em minha vida. Aos meus tios, Alexandre, Álvaro, Aristóteles, Adriano (*in memorian*), Flaviano. Às minhas tias, Joelma, Jucilia, Maria, Luciana. E à minha querida avó, que também foi minha segunda mãe, Josefa Sales.

À minha namorada, Giovanna, a qual já está presente na minha vida diária há anos. Agradeço por todo apoio espiritual e profissional, na minha vida acadêmica e por estar presente nesses momentos. Com certeza o seu apoio foi e é de grande importância para mim.

À toda minha família espiritual, os meus líderes espirituais (pastor Josenildo, pastora Meire Jane e família) que sempre estiveram comigo em todos os momentos, me dando força e intercedendo por mim, e me ajudando em tudo sempre que era preciso. O amor e carinho que tenho por vocês não tem como nem demonstrar com palavras. Vocês somaram em tudo para a realização deste meu sonho. A vocês, meus pastores (e família), o meu muito obrigado!

A todo o ministério de louvor, do qual faço parte, que para mim também é uma família. Há cinco anos que compartilho com vocês a minha vida, meu proceder, alegrias e tristezas, vocês são muito especiais para mim. Repito, todos vocês são como famílias para mim. Vocês já fazem parte da minha história.

Aos meus professores por toda dedicação e pelos conhecimentos repassados a mim, e em especial ao meu orientador Klaus André, por toda dedicação, paciência e exigência, fatores necessários para o meu aprendizado e para a conclusão deste trabalho. Professor que para mim é um exemplo a ser seguido de competência.

A todos que fazem parte da minha vida (que são muitos), não irá caber aqui se eu for comentar de um por um. A vocês, o meu muito obrigado!

RESUMO

Os impactos que os sismos geram são muito relevantes em qualquer lugar, podendo provocar grandes catástrofes, devastando prédios, barragens e até cidades inteiras. O presente trabalho visa descrever como se comportam os prédios construídos em concreto armado e em alvenaria sob atuação de forças sísmicas, apontando as formas que apresentam maior vulnerabilidade e técnicas que resistam a essas ações. Também foi descrito como as vibrações sísmicas de energia se propagam, relatos sobre grandes desastres nacionais e internacionais, e o impacto que isso gerou no local de ocorrência. Com isso, o estudo do comportamento de edifícios sujeitos a ações sísmicas pode amenizar danos nas estruturas e na sociedade, entender, de forma mais precisa, o modo como a estrutura de um edifício pode dissipar a energia sofrida sem diminuir o impacto para a ocorrência de fissuras ou rachaduras.

Palavras-Chave: Terremotos. Forças sísmicas. Vibrações sísmicas. Resistência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ocorrência de Falhas	11
---------------------------------------	----

Figura 2 - Ondas Primárias P.....	12
Figura 3 - Ondas Secundárias S.....	12
Figura 4 - Ondas Rayleigh e Ondas Love.....	13
Figura 5 - Velocidade de Propagação das Ondas	13
Figura 6 - A Lei de Snell numa Sucessão de Camadas Horizontais.....	14
Figura 7 - (a) À medida em que a velocidade aumenta constantemente com a profundidade, (b) os tempos de percurso formam uma curva, (c) as trajetórias dos raios sísmicos possuem um formato de arcos de circunferência.....	14
Figura 8 - (a) A estrutura da velocidade apresenta uma certa descontinuidade, (b) as curvas de tempo de percurso são interrompidas, (c) a onda C sofrerá uma refração ao atingir a descontinuidade	15
Figura 9 - Terremoto no Chile (1960)	17
Figura 10 - Terremoto no Alasca (1964)	17
Figura 11 - Terremoto em Sumatra, na Indonésia (2004)	18
Figura 12 - Terremoto Honshu, Japão (2011)	18
Figura 13 - Terremoto em Kamchatka, Rússia (1952)	19
Figura 14 - Rompimento da barragem fundão causado por terremotos	20
Figura 15 - Mapa de ameaça sísmica no Brasil para probabilidade de 10% de excedência em 50 anos.....	21
Figura 16 - Mapeamento da aceleração sísmica horizontal atuante no Brasil.....	22
Figura 17 - Sismos rasos (prof. < 50 Km) do Brasil, 1720-2016/04	22
Figura 18 - Mapa de Ameaça Sísmica ("Seismic Hazard Maps") para aceleração de pico (pga) em rocha, para probabilidade de 10%	23
Figura 19 - Mapa de Ameaça Sísmica ("Seismic Hazard Maps") para aceleração de pico (pga) em rocha, para probabilidade de 2%	23
Figura 20 - Demonstração de irregularidade torsional	26
Figura 21 - Demonstrações de reentrâncias em cantos	26
Figura 22 - Representação de excentricidades no diafragma	27
Figura 23 - Aberturas inadequadas em estruturas segundo a norma sísmica mexicana.....	27
Figura 24 - Representação de ausência de paralelismo	27
Figura 25 - Pórtico resistente com rigidez inferior aos demais pórticos	28
Figura 26 - Tipos de materiais usados nos sistemas sismo-resistentes: (a) Concreto armado; (b) Paredes de concreto ou alvenaria estrutural; (c) Estruturas de aço.	29

Figura 27 - Sistemas estruturais sismo-resistentes: (a) Estrutura de pórticos; (b) Estrutura mista ou dual; (c) Parede estrutural.....	29
Figura 28 - Pilar curto, devido à descontinuidade em altura provocada pela parede de alvenaria	30
Figura 29 - Exemplos de Alvenaria.....	30
Figura 30 - Exemplos de Secções Transversais de Paredes de Alvenaria de Pedra.....	31
Figura 31 - Parede de alvenaria de pedra sismo-resistente.....	32
Figura 32 - Montagem de Blocos com Juntas Desfasadas	33
Figura 33 - Pedra de Perpianho	33
Figura 34 - Abaulamento da Parede sem Perpianho.....	33
Figura 35 - Mecanismos de colapso das paredes quando sujeitas a forças horizontais para fora do seu plano.....	34
Figura 36 - Exemplo de peças metálicas de ligação	34
Figura 37 - Alvenaria de Tijolo Confinada	35
Figura 38 - Exemplo de Alvenaria Simples	35
Figura 39 - Exemplo de Alvenaria Armada.....	36
Figura 40 - Exemplo de Alvenaria Confinada.....	36
Figura 41 - Ação da Vibração Sísmica sobre uma construção	37
Figura 42 - Classificação em danos de edifícios de alvenaria.....	38
Figura 43 - Parede isolada sujeita a forças laterais.....	39
Figura 44 - Construção constituída por quatro paredes não ligadas.....	40
Figura 45 - Construção de quatro paredes travadas por cunhais	40
Figura 46 - Construção alongada constituída por quatro paredes travadas nos cunhais	41
Figura 47 - Comportamento de uma parede com aberturas.....	41
Figura 48 - Efeitos das irregularidades em planta no comportamento sísmico de edifícios	42
Figura 49 - Efeitos das irregularidades em planta no comportamento sísmico de edifícios	43
Figura 50 - Efeitos das irregularidades em planta no comportamento sísmico de edifícios	43
Figura 51 - Exemplos de efeitos de irregularidades em altura no comportamento sísmico em edifícios	43
Figura 52 – Solidarização das paredes conferida por uma laje rígida	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
----------	------------------------	----------

1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	8
1.2	OBJETIVOS	9
2	METODOLOGIA	10
3	SISMOS.....	11
3.1	CONCEITOS BÁSICOS	11
3.2	TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS	11
3.3	LEI DE SNELL E CURVAS TEMPO-DISTÂNCIA.....	13
3.4	MAGNITUDE	15
3.5	INTENSIDADE	16
3.6	HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS	16
3.7	RISCO SÍSMICO NO BRASIL E NA AMÉRICA DO SUL	20
4	EDIFÍCIOS CONSTRUÍDOS EM MEIO À AÇÃO SÍSMICA	24
4.1	NOÇÕES GERAIS	24
4.2	EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO	25
4.2.1	Definições e princípios fundamentais	25
4.2.2	Modos de colapso e formas de propagação de fissuras.....	28
4.3	EDIFÍCIOS EM ALVENARIA	30
4.3.1	Alvenaria de blocos de pedra	31
4.3.2	Alvenaria de tijolo	34
4.3.3	Alvenaria estrutural.....	35
4.3.4	Modos de colapso e formas de propagação de fissuras.....	37
4.3.5	Efeito das aberturas	41
4.3.6	Efeitos de assimetrias e irregularidades.....	42
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

É notório o desenvolvimento tecnológico da construção civil no decorrer dos anos, de forma que novos materiais e métodos construtivos vêm sendo criados, trazendo mais segurança e qualidade. Porém, quando se fala em edifícios construídos para suportarem cargas dinâmicas, trata-se de um tipo de construção bem diferente das demais.

É muito comum tratar a construção em um universo estático, com ausência de ações dinâmicas, como dos abalos sísmicos, por exemplo. Quando tratamos de construções sujeitas a essas ações, o processo construtivo é totalmente afetado por mudanças, pois a resistência a essas cargas será um dos principais critérios do dimensionamento.

Em várias regiões do mundo existe um alto índice de ocorrência de sismos, acarretando problemas sociais, comprometendo a qualidade de vida das pessoas, pois a atuação desses efeitos naturais causa degradação e destruição em tudo que há no lugar, inclusive mortes. As regiões com graus elevados de incidência sísmica procuram se prevenir no modo de se construir, levando em conta os métodos e materiais mais resistentes, com evidente simetria nas casas e edifícios construídos nesses lugares.

Com o crescente avanço tecnológico na construção civil, as ferramentas para a elaboração de projetos vêm aumentando ainda mais a segurança na hora da execução do trabalho na obra. No caso das estruturas próprias para resistirem a ações sísmicas, nos dias atuais existem meios de prever o comportamento de todos os elementos do edifício, observando os locais onde podem ocorrer danos devido à força atuante.

Dentre os métodos construtivos mais presentes nas regiões sísmicas do mundo estão o Concreto Armado e a Alvenaria Estrutural. Os edifícios construídos em alvenaria usam componentes e métodos que, unidos na hora do assentamento, geram maior resistência as ações que possam atuar sobre eles. Já os edifícios construídos em concreto armado são formados por estruturas de pórticos, estes compostos por lajes, vigas e pilares, a fim de suportar as cargas atuantes. Logo, frente a grande representatividade desses métodos, é de suma importância entender como um edifício construído usando o concreto armado ou alvenaria, seja simples, confinada ou estrutural, se comporta frente a atuação de forças sísmicas de maneira a preservar vidas e evitar grandes patologias em sua estrutura.

1.2 OBJETIVOS

a) Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho consiste em estudar o comportamento de edifícios sujeitos a ações sísmicas e entender o seu modo de concepção a fim de se obter maior segurança estrutural.

b) Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos, pode-se citar:

- Entender como acontecem os sismos, suas características, tipos de propagação de ondas de energia, etc.;
- Analisar as consequências que os sismos podem provocar nas estruturas convencionais que não possuem meios de resistência contra cargas dinâmicas;
- Estudar o comportamento de construções em concreto armado e alvenaria frente às ações sísmicas;

2 METODOLOGIA

a) Tipo de pesquisa

Pesquisa bibliográfica, feita a partir de matérias publicados, artigos científicos, teses, livros e o auxílio da internet para a busca de mais informações.

Foram utilizados alguns critérios de busca do material: assuntos específicos relacionados a sismos (como a estrutura se comporta sob atuação de forças sísmicas, observada por ilustrações, figuras ou modelagens computacionais) e pesquisa exploratória, buscando se familiarizar com o conteúdo abordado no trabalho.

b) Universo e amostra

Foram pesquisados em torno de dez referências diretas e oito referências indiretas. Sites relacionados a sismos, fenômenos mundiais de ocorrência foram os mais pesquisados; revistas, artigos e dissertações também foram umas das principais fontes de informações para a elaboração do trabalho.

c) Instrumentos de coleta de dados

A coleta de dados foi executada por intermédio de mapas mundiais e nacionais que apresentam as regiões com altas magnitudes sísmicas, pesquisas bibliográficas, como teses, livros, sites, artigos científicos publicados em periódicos, dissertações e trabalhos apresentados em congressos.

d) Análise dos dados

Foi analisado os dados que foram obtidos por outros pesquisadores, levando em consideração todas as afirmações e conclusões chegadas por eles. Para isso, usou-se todo material referente ao conteúdo que fora abordado.

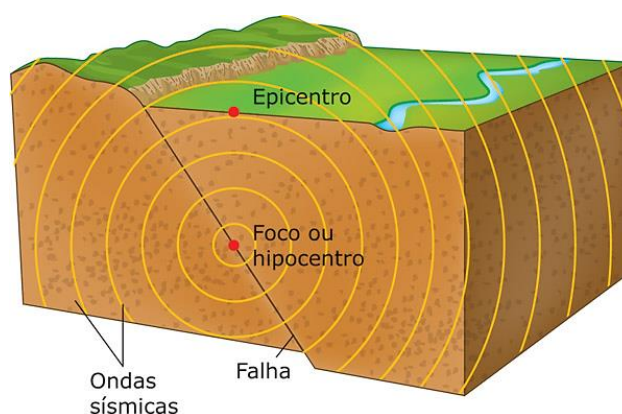
3 SISMOS

3.1 CONCEITOS BÁSICOS

Segundo o NESDE (2005), os sismos são o resultado de uma liberação de energia que pode ser propagada em forma de ondas sísmicas, em maior parte ocasionadas pelo movimento das placas tectônicas quando as mesmas se chocam. Essa liberação de energia parte das chamadas falhas terrestres, fluindo em forma de ondas, do hipocentro até ao epicentro, ou seja, do interior terrestre com uma profundidade bem considerável até a sua superfície.

Inicialmente, o conceito de falhas geológicas se dá por meio da quebra de um bloco de rocha que promove deslocamento de suas partes através de uma força atuante, geralmente ocasionada pelo movimento das placas tectônicas. E do mesmo modo temos as fronteiras, que estão relacionadas com o movimento das placas tectônicas em torno de si, que pode variar, podendo ser divergentes, convergentes ou transformantes. As falhas que geram um sismo podem ser originadas de diferentes formas. Na Figura 1 é mostrado como age a ação sísmica em decorrência das falhas. Dentre estas, estão as fronteiras divergentes, nas quais as placas tectônicas se afastam entre si, chamadas também de falha normal. Fronteiras Convergentes, a partir das quais as placas vão uma em direção à outra, também conhecida por falha inversa, e, por último, as fronteiras transformantes, sobre as quais as placas agem como se estivessem cisalhando ou deslizando uma sobre a outra, gerando as falhas de deslizamento (NESDE, 2005).

Figura 1 - Ocorrência de Falhas



Fonte: Ramos (2010)¹

3.2 TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS

Segundo Teixeira (2000), as ondas sísmicas surgem devido à ruptura na litosfera, gerando vibrações sísmicas que podem ser propagadas em todas as direções que, dependendo

¹ Disponível em: <http://danielrsilveira.blogspot.com/2010/04/terremoto.html>. Acesso: 16 de agosto de 2018.

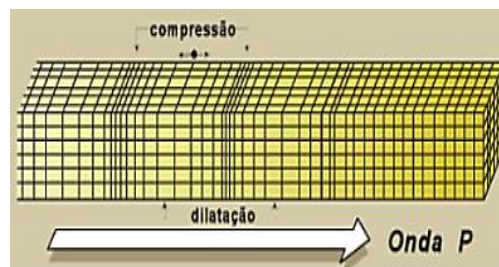
da sua magnitude, pode causar danos irreversíveis, principalmente nas regiões próximas ao epicentro. Essa ruptura na litosfera gera as chamadas falhas geológicas.

As ondas sísmicas podem se propagar de diferentes formas, variando sua frequência, intensidade e direção de atuação.

a) Ondas Primárias P

As partículas se movimentam paralelas à direção de propagação da onda, sendo estas ondas mais rápidas do que as outras (DANTAS, 2013). A Figura 2 mostra o comportamento das Ondas P.

Figura 2 - Ondas Primárias P

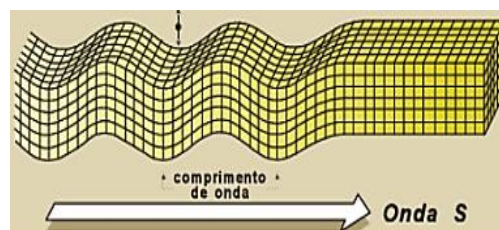


Fonte: Teixeira (2000)

b) Ondas Secundárias S (ou de Cisalhamento)

Este tipo de onda provoca movimentos das partículas perpendiculares à direção de propagação, e estão relacionadas às mudanças de forma sem variar o volume (DANTAS, 2013). A Figura 3 mostra o comportamento das Ondas S.

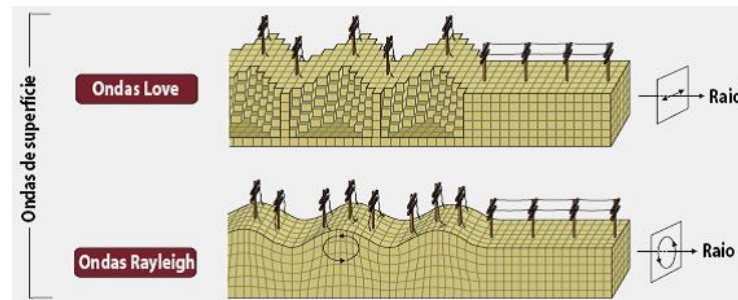
Figura 3 - Ondas Secundárias S



Fonte: Teixeira (2000)

c) Ondas do Tipo *Rayleigh* e *Love* (R e L)

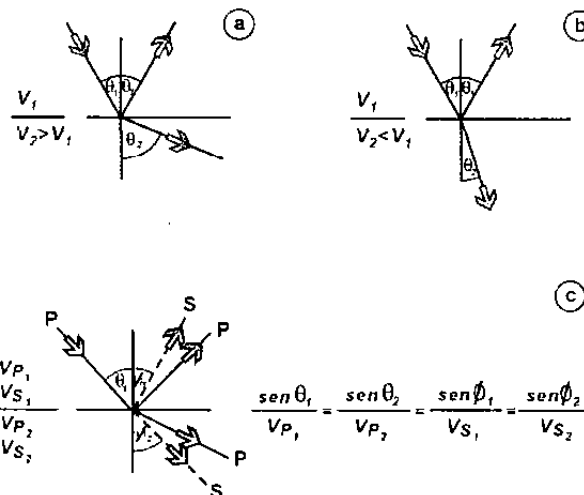
As ondas *Rayleigh* são caracterizadas por produzirem um movimento circular parecido com as ondas oceânicas, e as ondas *Love* proporcionam um movimento horizontal transversal à direção de propagação (DANTAS, 2013). A Figura 4 mostra os comportamentos das Ondas R e L.

Figura 4 - Ondas *Rayleigh* e Ondas *Love*Fonte: BioGeo10 (2014)²

3.3 LEI DE SNELL E CURVAS TEMPO-DISTÂNCIA

A direção em que as ondas se propagam pode mudar, ou seja, refratar, ao passar de um lugar com velocidade V_1 para outro com velocidade diferente V_2 . As ondas sísmicas sofrem refração e reflexão, obedecendo à lei de Snell, segundo a Figura 5. Existe a possibilidade da onda se converter de P para S ou de onda S para P. Como exemplo disso, temos a Figura 5(c) que mostra uma onda P, cuja energia é dividida entre as ondas P e S refletidas e P e S refratadas. Neste caso, a lei de Snell se aplica a cada tipo de raio (TEIXEIRA, 2000).

Figura 5 - Velocidade de Propagação das Ondas

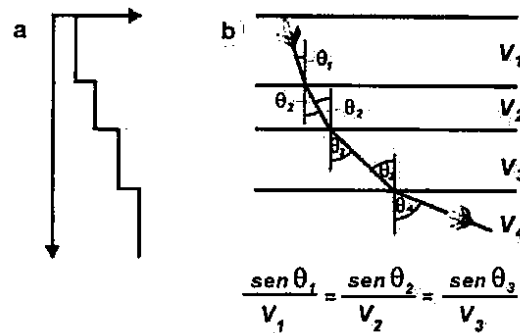


Fonte: Teixeira (2000)

Segundo Teixeira (2000), se o meio de atuação das ondas for constituído de várias camadas horizontais, a lei de Snell pode ser definida como a variação da direção do raio sísmico, como mostra a Figura 6.

² Disponível em: <http://biogeo10c.blogspot.com/2014/02/sismologia-1.html>. Acesso: 16 de agosto de 2018.

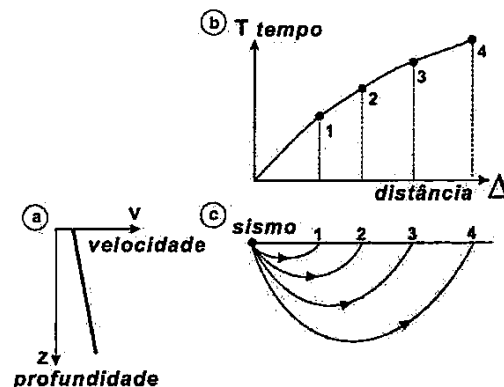
Figura 6 - A Lei de Snell numa Sucessão de Camadas Horizontais



Fonte: Teixeira (2000)

Na Figura 7(a) é possível notar que a velocidade vai aumentando à medida em que a profundidade cresce, e as ondas percorrem uma trajetória curva, como mostra a Figura 7(c). O gráfico dos tempos de percurso em função da distância será definido como uma curva, como mostra a Figura 7(b) (TEIXEIRA, 2000).

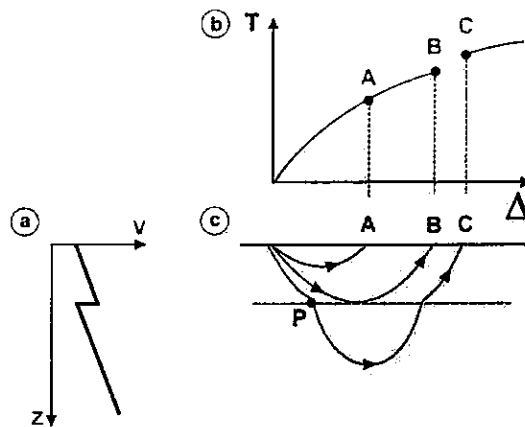
Figura 7 - (a) À medida em que a velocidade aumenta constantemente com a profundidade, (b) os tempos de percurso formam uma curva, (c) as trajetórias dos raios sísmicos possuem um formato de arcos de circunferência



Fonte: Teixeira (2000)

Supondo que exista uma descontinuidade no interior da Terra e dividindo-a em dois meios diferentes, mostrado na Figura 8(a), mas que o material abaixo da descontinuidade tem velocidade menor que a do material acima. À medida em que as ondas passam do meio com velocidade maior para o outro meio com velocidade menor, como mostra o ponto P na Figura 8(c), a trajetória percorrida pela onda se aproxima da normal à interface, visto na Figura 8(b). Tudo isto coopera para que o raio sísmico C se afaste do raio sísmico B, formando uma interrupção na curva tempo-distância, visto na Figura 8(b), também chamada de “zona de sombra” na superfície. As ondas que entram na camada mais profunda formam um ramo mais atrasado em relação ao ramo mais raso, mostrado na Figura 8(b) (TEIXEIRA, 2000).

Figura 8 - (a) A estrutura da velocidade apresenta uma certa descontinuidade, (b) as curvas de tempo de percurso são interrompidas, (c) a onda C sofrerá uma refração ao atingir a descontinuidade



Fonte: Teixeira (2000)

3.4 MAGNITUDE

A magnitude é caracterizada por medir a força que um terremoto pode exercer, ou seja, indica o tamanho relativo dos sismos.

a) Escala de Magnitude Richter

O sismólogo americano Charles Francis Richter criou uma escala de magnitude que se baseava em amplitudes registradas nas estações sismológicas. Segundo Teixeira (2000), esse tipo de escala é baseado num tipo de escala logarítmica, em que cada ponto na escala corresponda a um fator de 10 vezes nas amplitudes de vibrações. Para se calcular a magnitude Richter, usa-se:

$$Ml = \log A + 2,76 \log \Delta - 2,48 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

Ml = Magnitude Local;

Δ = Distância epicentral, em quilômetros (Km);

A = Amplitude das ondas sísmicas;

b) Escala de Magnitude de Momento

Este tipo de escala de magnitude mostra com mais facilidade os tamanhos absolutos dos terremotos, se baseando nos processos físicos que ocorrem e foi desenvolvida por Hiro Kanamori no Laboratório de Sismologia do California Institute of Technology, em Pasadena, e pode ser definida como:

$$Mw = -10,7 + \frac{2}{3} \log 10 (Mo) \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

M_w = escala de magnitude do momento. O “w” representa o trabalho mecânico realizado;

M_o = momento sísmico, obtido através de registros de movimento da superfície terrestre por meio dos sismogramas. Sua unidade é descrita por dina.cm;

3.5 INTENSIDADE

A intensidade classifica o grau de tremor de um sismo, representando os efeitos sísmicos que geram estragos, que são maiores no epicentro e diminui com a distância.

A escala mais utilizada é a Escala Mercalli, a qual foi proposta em 1902 por Giuseppe Mercalli. Esta escala mede o grau de destruição causada pelas ondas de um terremoto a cada distância, e normalmente é determinada pelos relatos de pessoas que sentiram o tremor.

De acordo com Bianchi (2016), em 1931 a escala foi modificada por Wood & Neumann, passando a ser chamada de Escala Mercalli Modificada. Nesta nova escala foram definidos níveis de I a XII, onde I são tipo de ondas que não são sentidas e XII ocorrem grande destruição. Esses níveis são representados de forma que:

- I. Não é sentido;
- II. Sentido dentro de casa por poucas pessoas;
- III. Sentido dentro de casa por várias pessoas;
- IV. Sentido dentro de casa por muitas pessoas e fora por poucas;
- V. Sentido dentro de casa por todos, e fora por muitos;
- VI. Sentido por todas as pessoas;
- VII. Assustam todas as pessoas que correm para a rua;
- VIII. Alarme perto do pânico, danos consideráveis em edifícios normais;
- IX. Danos em barragens, tubulações subterrâneas são quebradas consideravelmente;
- X. Solo rachado até larguras de várias polegadas;
- XI. Grande distúrbio no solo;
- XII. Danos totais. Objetos são atirados para cima, ondas na superfície do terreno podem ser visualizadas;

3.6 HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS

A ação sísmica, dependendo da sua magnitude e das condições estruturais das edificações, pode acarretar uma catástrofe que cause danos muitas vezes irreparáveis para uma sociedade, destruindo casas, ruas e tudo o que estiver pela frente, muitas vezes sendo incapaz de ser impedida ou amenizada essa devastação. Dentre os fenômenos sísmicos que já aconteceram em todo mundo, são listados os principais e de maior relevância quanto à

destruição de cidades causadas por terremotos de altas magnitudes, de acordo com a BBC – Brasil (2014):

- Chile – 1960: Eleito o maior terremoto registrado em todo o mundo, com 9,5 de magnitude, começou com um tsunami, deixando aproximadamente 1,6 mil pessoas mortas, 3 mil feridas e 2 milhões ficaram desabrigadas. O Chile teve um prejuízo de quase R\$ 1,2 bilhão (Figura 9).

Figura 9 - Terremoto no Chile (1960)



Fonte: Vista al Mar (2018)³

- Alasca (EUA) – 1964: O terremoto com 9,2 de magnitude começou com um tsunami, causando tremores fortes em muitas cidades. Aproximadamente 131 pessoas morreram e o prejuízo para o país foi cerca de R\$ 5,2 bilhões (Figura 10).

Figura 10 - Terremoto no Alasca (1964)



Fonte: Mentis Bereanas (2009)⁴

- Sumatra (Indonésia) – 2004: Possuindo um terremoto com 9,1 de magnitude, seguido por um tsunami, fez com que 14 países do Sul da Ásia e do Leste da África sentissem os tremores. Foi contado cerca de 230 mil mortos e 1,7 milhão de pessoas que ficaram sem moradia (Figura 11).

³ Disponível em: <https://www.vistaalmar.es/medio-ambiente/tsunami/7314-en-1960-chile-fue-golpeado-por-el-terremoto-mas-poderoso-jamas-registrado.html>. Acesso: 21 de agosto de 2018.

⁴ Disponível em: http://www.mentisbereanas.info/bibmb_sinal3.html. Acesso: 21 de agosto de 2018.

Figura 11 - Terremoto em Sumatra, na Indonésia (2004)



Fonte: Uol Notícias (2013)⁵

- Honshu (Japão) – 2011: Terremoto com 9,0 de magnitude deixou 15,7 mil mortos e 5,3 mil feridos. O terremoto foi seguido por um tsunami que destruiu a costa leste de Honshu, uma grande ilha do Japão. As ondas do tsunami tinham cerca de 38 metros de altura. O prejuízo do país foi de aproximadamente R\$ 700 bilhões (Figura 12).

Figura 12 - Terremoto Honshu, Japão (2011)



Fonte: Revista Época (2011)⁶

- Kamchatka (Rússia) – 1952: Possuindo 9,0 de magnitude, esse terremoto atingiu a península de Kamchatka em forma de tsunami. Não houve mortes registradas, mas houve uma despesa de R\$ 2,4 milhões para os Estados Unidos, pois o maremoto atingiu o Havaí (Figura 13).

⁵ Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/album/2013/09/01/os-10-terremotos-de-maior-magnitude-da-historia.htm#fotoNav=3>. Acesso: 16 de agosto de 2018.

⁶ Disponível em: <http://revistaepoca.globo.com/Revista/Epoca/0,,EMI217363-15227,00-TREMOR+DE+PROVOCA+TSUNAMI+DEVASTADOR+NO+NORDESTE+DO+JAPAO.html>. Acesso: 21 de agosto de 2018.

Figura 13 - Terremoto em Kamchatka, Rússia (1952)



Fonte: Emergencias: *Los Terremotos más Grandes de la Historia* (2016)⁷

Um outro desastre de grande repercussão aconteceu na capital do Haiti, Porto Príncipe, em 2010. No total, cerca de 230 mil pessoas morreram e mais de um milhão ficaram desabrigadas. O que gerou este fenômeno foi um terremoto de magnitude 7 agravadas pela falta de estrutura apta para suportar as ações sísmicas⁸.

No Brasil o rompimento da barragem Fundão em 2015, na cidade de Mariana, em Minas Gerais foi impulsionado por terremotos sucessivos com 2,6 de magnitude, provocando uma enxurrada de lama que inundou o distrito de Bento Rodrigues (Figura 14), deixando pelo menos dezenove mortos e centenas de desabrigados, segundo dados da BBC – Brasil (2015).

- João Câmara (Brasil) – 1986: Já ocorreram muitos tremores nesta cidade, mas o primeiro e maior deles ocorreu em 1986, fazendo com que milhares de pessoas saíssem de casa, com medo de desabamentos. A sua magnitude foi em torno de dois na escala Richter.⁹

⁷ Disponível em: <http://felipemora-luisalvear.blogspot.com/2016/11/terremoto-y-tsunami-rusia-1952.html>. Acesso: 21 de agosto de 2018.

⁸ Disponível em: <http://memoriaglobo.globo.com/programas/jornalismo/coberturas/terremoto-no-haiti.htm>. Acesso: 04 de agosto de 2018.

⁹ Disponível em: <http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/maior-tremor-de-terra-do-rn-foi-registrado-em-1986/137371>. Acesso: 18 de agosto de 2018.

Figura 14 - Rompimento da barragem fundão causado por terremotos



Fonte: BBC - Brasil (2015)¹⁰

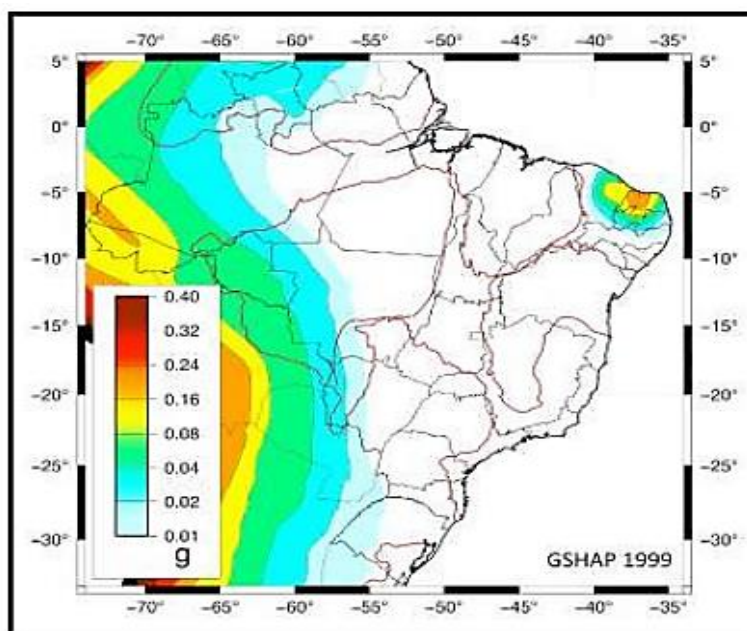
3.7 RISCO SÍSMICO NO BRASIL E NA AMÉRICA DO SUL

Como o Brasil se localiza no interior de uma placa tectônica, não há uma atividade sísmica alta no território brasileiro, se comparado, por exemplo, com outros países da América do Sul. Na região dos Andes é possível sentir abalos, pois fica próxima dos limites de uma das placas tectônicas.

A Figura 15 representa as zonas de riscos sísmicos no Brasil, sendo que ambas as imagens ainda mostram as acelerações de pico (PGA) em frações de gravidade, com probabilidade de excedência de 10% durante 50 anos, e o período de retorno do efeito é de 475 anos. A imagem representa o mapa do projeto *Global Seismic Hazard Assessment Program - GSHAP*.

¹⁰ Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/11/151105_tremor_barragem_lk. Acesso: 01 de agosto de 2018.

Figura 15 - Mapa de ameaça sísmica no Brasil para probabilidade de 10% de excedência em 50 anos

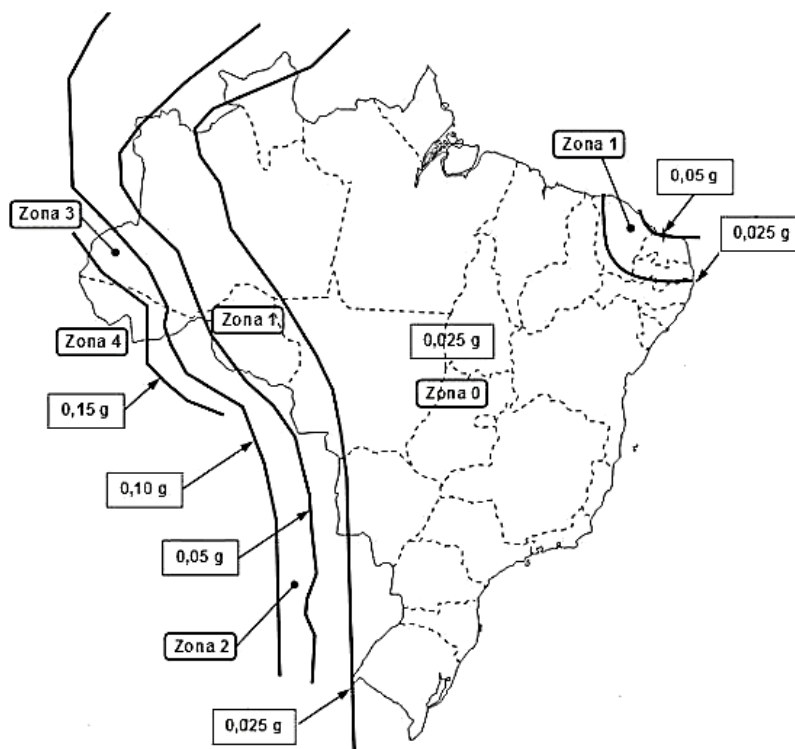


Fonte: Shedlock; Tanner (1999)

Segundo a Figura 16, o território brasileiro possui baixa ação sísmica, com acelerações horizontais inferiores a $0,4 \text{ m/s}^2$. Mas há lugares no Brasil que apresentam um índice sísmico mais alto, como alguns estados do Nordeste. Segundo Silva (2009), isto ocorre devido a posição do Nordeste com relação à falha do Atlântico Central. Ainda há ocorrências sísmicas nas regiões Norte e Centro-Oeste, devido estarem próximas da Cordilheira dos Andes.

De acordo com os estudos de Santos e Souza Lima (2004), foram observadas zonas sísmicas no Brasil, apresentando aceleração horizontal nominal “ a_g ” elevada na região oeste, próxima da América do Sul e na região nordeste, como mostra a mesma figura. No Brasil, o Nordeste é o estado mais atingido por terremotos, apesar de não ser sismos com magnitudes tão altas, ainda assim há abalos consideráveis.

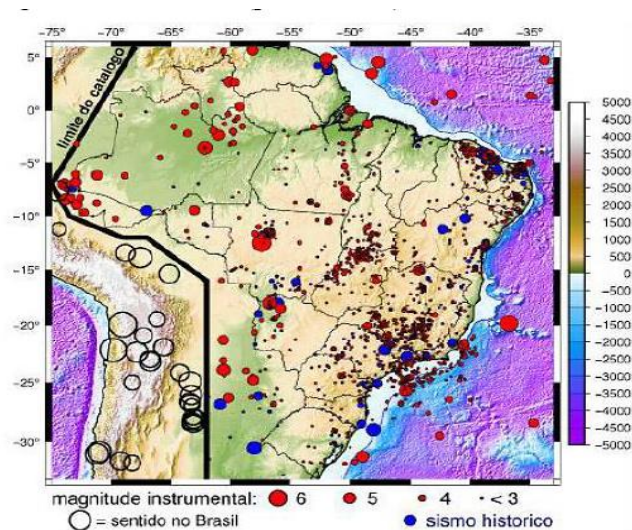
Figura 16 - Mapeamento da aceleração sísmica horizontal atuante no Brasil



Fonte: NBR 15421 (ABNT, 2006)

A Figura 17 representa os sismos mais antigos e os mais recentes. As imagens foram capturadas por satélites, e ainda foram registrados muitos tremores antigos que não foram detectados. Na figura, vê-se as regiões de ocorrência de altas e baixas magnitudes.

Figura 17 - Sismos rasos (prof. < 50 Km) do Brasil, 1720-2016/04

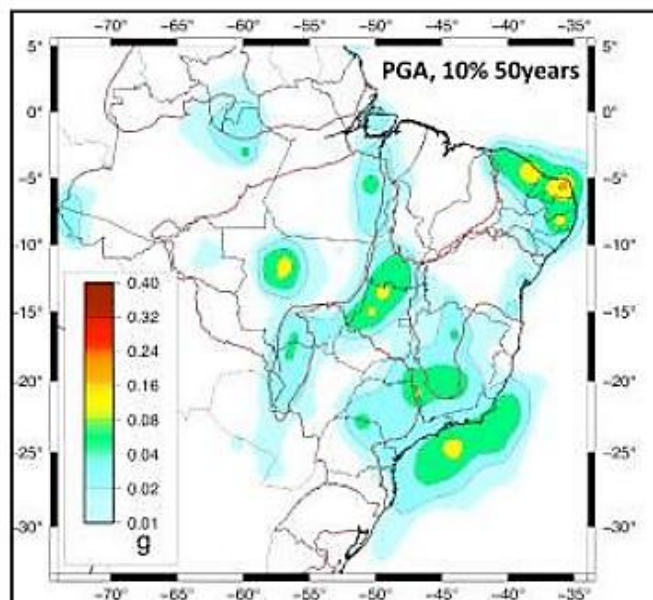


Fonte: Assumpção (2016)

Nos dois mapas a seguir (Figura 18 e Figura 19), são representados riscos sísmicos em regiões do Brasil com maiores chances ocorrência. Essas figuras mostradas apresentam as

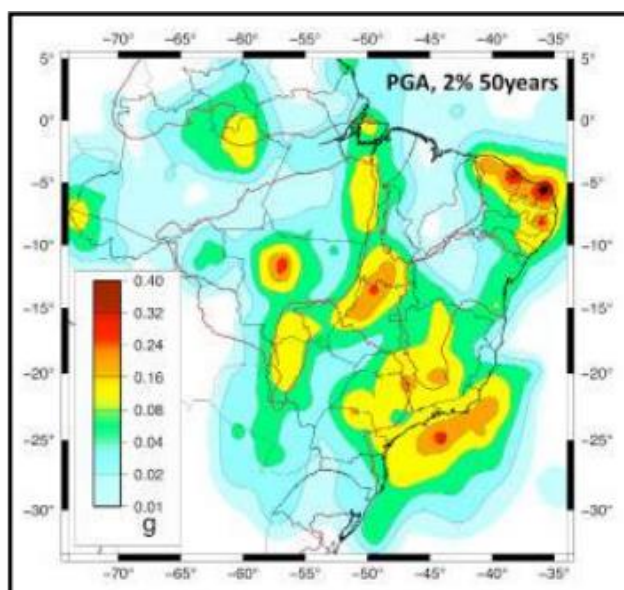
acelerações de pico (PGA), em locais de rocha, com probabilidade de excedência de 10% e 2% durante 50 anos, correspondendo a períodos de retorno de 475 e 1475 anos, respectivamente (ASSUMPÇÃO, 2016).

Figura 18 - Mapa de Ameaça Sísmica ("Seismic Hazard Maps") para aceleração de pico (pga) em rocha, para probabilidade de 10%



Fonte: Assumpção *et al.* (2016)

Figura 19 - Mapa de Ameaça Sísmica ("Seismic Hazard Maps") para aceleração de pico (pga) em rocha, para probabilidade de 2%



Fonte: Assumpção *et al.* (2016)

4 EDIFÍCIOS CONSTRUÍDOS EM MEIO À AÇÃO SÍSMICA

4.1 NOÇÕES GERAIS

Na construção de edifícios, de grande ou pequeno porte, é necessário que toda a estrutura seja resistente, desde a laje, vigas, pilares e fundações. Como não é comum se deparar com abalos sísmicos em todos os lugares, é notório que nem todo material usado para se construir e nem todas as técnicas construtivas têm capacidade de suportar cargas dinâmicas. Segundo Pomba (2007), elementos estruturais têm como objetivo resistir a esforços, sem deformar-se, quando são submetidos a forças externas.

Segundo o NESDE (2005), deve ser levado em conta vários detalhes antes de se construir em lugares com ação sísmica. Normalmente é encontrado em casas paredes feitas de alvenaria simples, com janelas mais largas e até com paredes um pouco altas, que não suportarão a propagação de ondas sísmicas, acarretando em fissuras nas paredes, podendo chegar até à ruína total. Por isso, para que uma construção não apresente problemas patológicos quando submetido a esforços dinâmicos, as edificações devem ser feitas utilizando sistemas construtivos portantes e confiáveis, suportando as cargas que atuarão não só na vertical, como também na horizontal, devendo-se, ainda, evitar paredes altas, e as janelas deverão ser menores e simétricas, para diminuir a área de vulnerabilidade.

Com o passar dos anos, especificamente no início século XX, a alvenaria como sistema estrutural começou a ser conhecida, de tal modo que a construção de todo o mundo, se voltou a usá-la como um dos principais materiais de construção (SOUSA, 2006). O concreto armado surgiu em meados do século XX, mas foi muito usado e explorado em países que apresentavam movimentos sísmicos de grau considerável em algumas regiões, de forma que a alvenaria nas construções foi sendo menos utilizada (SOUSA, 2006).

O EUROCODE: 2008 mostra alguns princípios básicos que devem ser seguidos na construção de uma estrutura que possa resistir aos movimentos sísmicos:

- 1) Simplicidade estrutural;
- 2) Uniformidade, simetria e redundância da estrutura;
- 3) Rigidez e resistências torcionais;
- 4) Resistência e rigidez bi-direcionais;
- 5) Ação de diafragma ao nível dos pisos;
- 6) Disposição adequada das fundações;
- 7) Continuidade estrutural;
- 8) Elementos estruturais secundários;

- 9) Ligação Viga / Pilar;
- 10) Análise estrutural;

Ainda complementando estes procedimentos, a norma sísmica peruana NTE E.030:2003 apresenta outras recomendações com o objetivo de aprimorar o desempenho sísmico das edificações:

- 1) Evitar grande concentração de cargas em edifícios mais altos;
- 2) Selecionar adequadamente o uso dos materiais;
- 3) Atendimento aos limites de deformação;
- 4) Inclusão de sucessivas linhas de resistência;
- 5) Boas práticas construtivas e inspeção estrutural detalhada;

4.2 EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO

4.2.1 Definições e princípios fundamentais

O concreto armado é definido como a junção do concreto (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água) e as armaduras (normalmente de aço), sendo o concreto muito resistente à compressão e as armaduras muito resistentes à tração.

As estruturas de concreto armado podem ser em estruturas de parede (paredes de concreto montados na vertical e estrutura de piso feita de vigas e lajes) e estrutura de pórtico (constituídas por pilares, vigas e lajes). Ademais, a composição a qual o concreto está sujeito faz com que possa ser resistente a ações sísmicas, sendo aconselhável utilizar paredes de concreto mais largas e não muito altas, janelas e portas com simetria, de modo a não acarretar em fissuras e fragilidade na estrutura (NESDE, 2005).

Segundo Alves (2011), as vantagens de utilizar o concreto armado na construção civil apresentam diminuição na mão-de-obra, rapidez e agilidade na execução, pouco desperdício do material e é economicamente viável, contudo apresentando desvantagens, como pequenas aberturas nas paredes estruturais durante ou após o processo de construção.

Segundo Dantas (2013), um dos princípios fundamentais no lançamento estrutural de estruturas de concreto resistentes ao sismo é que a rigidez dos pisos no plano deve ser grande em relação à rigidez lateral dos elementos verticais, de modo que a deformação do piso tenha um efeito reduzido na distribuição das forças entre os elementos sujeitos às cargas das estruturas.

Todos os estudos sobre estruturas que resistem a forças sísmicas afirmam que a ausência de regularidade do plano facilita as deformações estruturais e prejudica o desempenho sísmico da edificação. Segundo Dantas (2013), os principais casos de irregularidade no lançamento

estrutural em planta e seus respectivos modelos de deformações com patologia estão relacionados a:

a) Irregularidade torsional

A Figura 20 mostra a atuação sísmica que provoca danos localizados, com formação do mecanismo de colapso em suas extremidades.

Figura 20 - Demonstração de irregularidade torsional

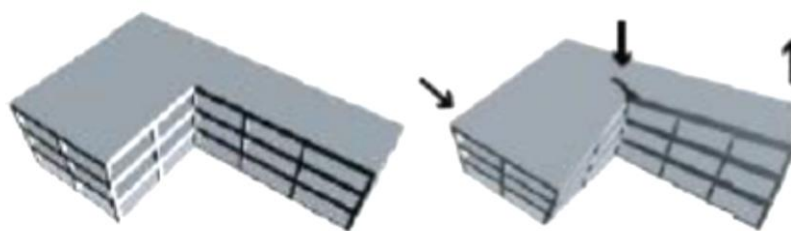


Fonte: FEMA 454 (2007)

b) Cantos com reentrância

Na Figura 21 é mostrado o dano que os sismos provocam na região no diafragma e os elementos vinculados a ele. Em edifícios muito largos pode ser observado o colapso nas extremidades. Em edifícios na forma de L, a rigidez das duas abas em relação a cada um do plano principal é diferente. Com isso, a concentração de tensões nos cantos dos pavimentos e nas extremidades das abas é maior. Por isso recomenda-se construir edifícios simétricos, sem essas diferenças na estrutura.

Figura 21 - Demonstrações de reentrâncias em cantos

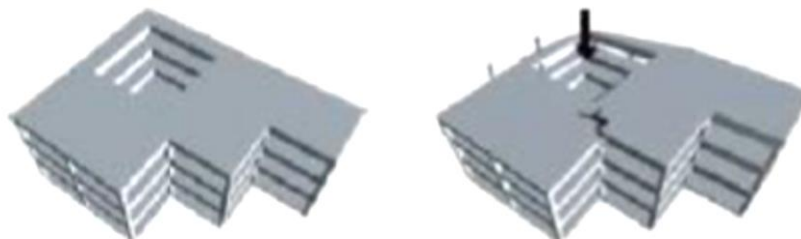


Fonte: FEMA 454 (2007)

c) Excentricidade no diafragma dos elementos vazados na estrutura:

No caso da Figura 22, como a estrutura é assimétrica, parecido com a situação anterior, a fragilidade nas estruturas é maior pelo fato das forças não conseguirem se distribuir uniformemente sobre a estrutura. Com isso, o edifício sofre danos estruturais localizados.

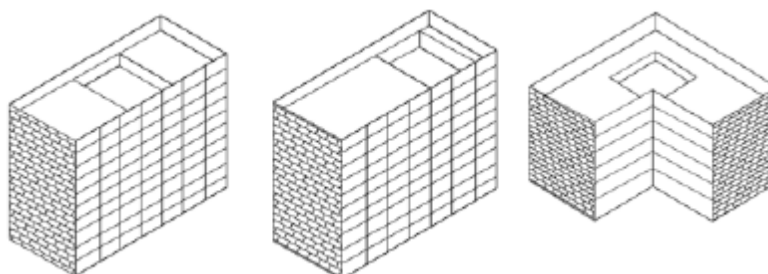
Figura 22 - Representação de excentricidades no diafragma



Fonte: FEMA 454 (2007)

Assim como o FEMA: 2007, várias normas internacionais sugerem que sejam evitados lançamentos de vazios nos diafragmas, como pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 - Aberturas inadequadas em estruturas segundo a norma sísmica mexicana

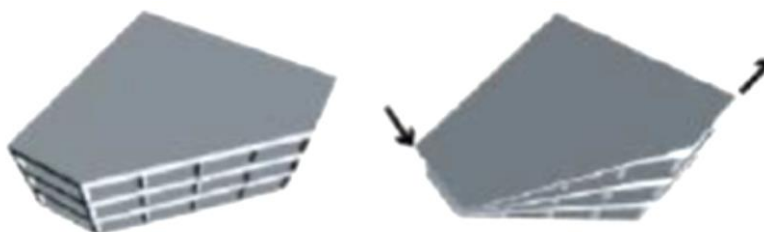


Fonte: NOM - 116 (2005)

d) A ausência de paralelismo no sistema resistente a solicitações laterais

Como mostra Figura 24, a falta de paralelismo na estrutura faz com que a mesma sofra esforços de torção, instabilidade na estrutura e danos localizados.

Figura 24 - Representação de ausência de paralelismo

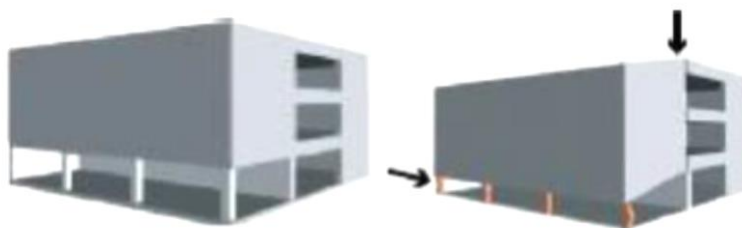


Fonte: FEMA 454 (2007)

e) Descontinuidade da rigidez entre pórticos resistentes

De acordo com a Figura 25, é possível observar a fragilidade que a estrutura tem, pois o peso das paredes não pode ser distribuído para baixo à medida que sofrem forças horizontais, sem a continuidade das mesmas. Quando as forças atuarem sobre os pilares sem as paredes, logo irão romper-se. Posteriormente, ocorrerá colapso na estrutura,

Figura 25 - Pórtico resistente com rigidez inferior aos demais pórticos



Fonte: FEMA 454 (2007)

4.2.2 Modos de colapso e formas de propagação de fissuras

Uma estrutura deve ter um bom funcionamento e um comportamento adequado. Para isso, a estrutura não deve possuir irregularidades ou assimetria, pois esses fatores causam concentração de esforços e, posteriormente, promove deformações permanentes. O recomendado é que a estrutura seja simétrica, pois ela tende a distribuir uniformemente os esforços, diminuindo as chances de danos nos elementos estruturais, além de reduzir os efeitos de torção (PEÑA, 2012).

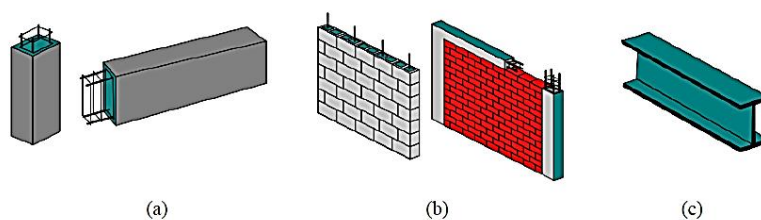
É importante que a estrutura de concreto possua um bom número de ligações (ou grau de hiperestaticidade) para equilibrar as cargas aplicadas e dissipar a energia gerada pelos abalos sísmicos, de modo que qualquer dano em um dos elementos não fará com que toda a estrutura entre em colapso. É necessário que a dissipação de energia gerada pela ação sísmica seja máxima possível, e que o número de pórticos seja aumentado para reduzir o efeito de torção em determinada direção (PEÑA, 2012).

O comportamento de cada sistema de estruturas depende dos tipos de elementos e do grau de dissipação de energia do material utilizado na sua construção (Figura 26). Segundo Peña (2012), o sistema estrutural mais utilizado em edificações de pouca altura é o sistema de pórticos (menos de dez andares) e, em geral, possui boa resistência aos sismos. Este sistema estrutural é composto por vigas e pilares de concreto ou de aço sem diagonais com algum tipo de contraventamento (Figura 27).

Outro sistema bastante utilizado é a estrutura mista ou dual, que é um sistema composto por um pórtico e por um sistema de pilares-parede ou até por pórticos de aço contraventados em treliça, como mostra a Figura 27 (b). Este sistema permite deslocamentos horizontais da estrutura assim como a sua distribuição ao longo da altura (PEÑA, 2012).

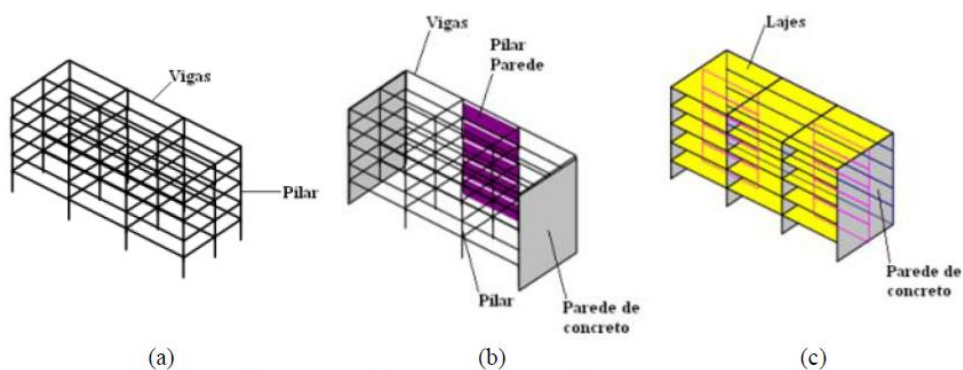
Outro sistema bastante utilizado é a parede de alvenaria (ou alvenaria estrutural), a qual substitui os sistemas estruturais de concreto armado, como vigas e pilares. Estas paredes suportam todas as cargas verticais, como o próprio peso dos blocos de alvenaria, o peso da cobertura e das lajes, como mostra a Figura 27 (c). Este tipo de parede é bastante utilizado.

Figura 26 - Tipos de materiais usados nos sistemas sismo-resistentes: (a) Concreto armado; (b) Paredes de concreto ou alvenaria estrutural; (c) Estruturas de aço.



Fonte: Peña (2012)

Figura 27 - Sistemas estruturais sismo-resistentes: (a) Estrutura de pórticos; (b) Estrutura mista ou dual; (c) Parede estrutural

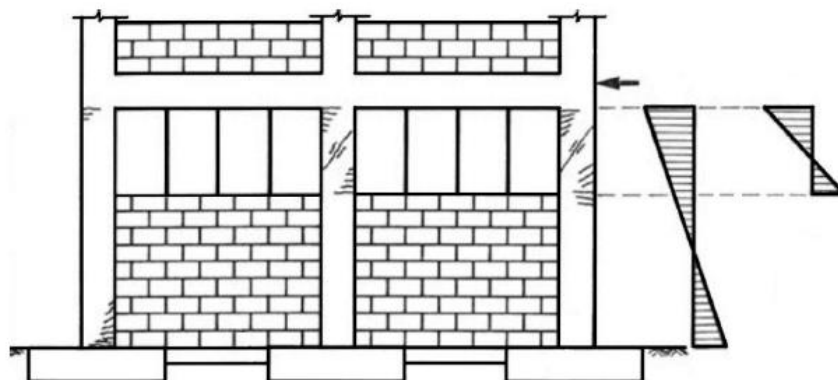


Fonte: Peña (2012)

Na construção do sistema estrutural de concreto armado é importante evitar que uma falha frágil que possa ocasionar perda de capacidade em resistir às cargas. Esta falha frágil que pode ser causada pela atuação do esforço cortante. Um exemplo deste tipo de falha acontece quando os andares apresentam o mesmo pé direito e quando as paredes apresentam descontinuidade em sua altura em relação à altura do pilar, originando a situação de pilar curto. (PEÑA, 2012).

A parede restringe a deformação lateral da parte inferior dos pilares e leva para essas zonas grande concentração de esforços de cisalhamento. Para se evitar a falha frágil nas vigas, uma alternativa é reduzir seu esforço longitudinal, de forma a provocar uma falha por flexão e não por cisalhamento, Figura 28 (BOZZO; BARBAT, 2008).

Figura 28 - Pilar curto, devido à descontinuidade em altura provocada pela parede de alvenaria



Fonte: Peña (2012)

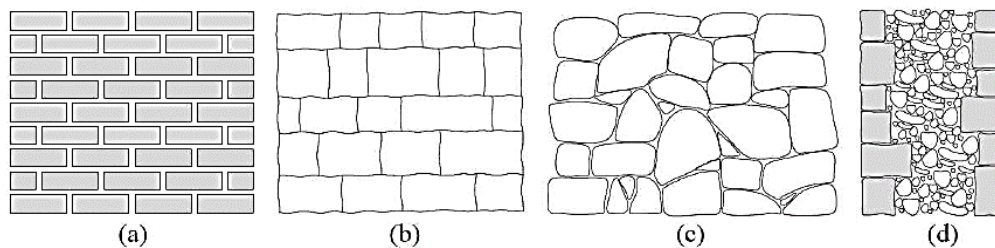
4.3 EDIFÍCIOS EM ALVENARIA

O uso da alvenaria já vem sendo usado há milhares de anos, sendo notória nas construções históricas. Pode ser visto que a sociedade daquela época começou a construir utilizando a pedra como material, a qual apresentava uma certa resistência considerável e seu manuseio era simples.

Nos dias de hoje o uso da alvenaria como sistema estrutural é quase que comum em todos os lugares por apresentar características como baixo custo, grau mínimo de absorção de calor no local construído e simplicidade na fase de montagem.

Existem três tipos de alvenaria: a alvenaria de pedra, a alvenaria de tijolo e a alvenaria estrutural, sendo que há variedades quanto à forma de execução das paredes. A Figura 29 mostra as variações de alvenaria, sendo (a) alvenaria de tijolo; (b) alvenaria de pedra aparelhada; (c) alvenaria irregular; (d) alvenaria com secção transversal, com a parede possuindo dois panos exteriores e o centro preenchido com fragmentos de pedra, tijolo ou argamassa.

Figura 29 - Exemplos de Alvenaria



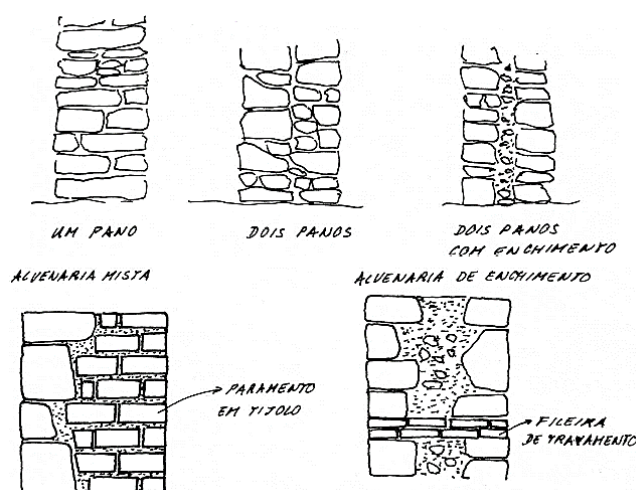
Fonte: Lourenço; Zucchini (2002)

4.3.1 Alvenaria de blocos de pedra

A pedra é um material natural, já criado pela natureza, mas que pode ser muito útil na construção civil, pois ela apresenta boa resistência mecânica e boa qualidade, além de fácil modelação. É notório a queda do uso da pedra na alvenaria por questões econômicas, sendo mais usada para decoração e ornamentação de ambientes, casas, entre outros.

Segundo Pomba (2007), as paredes de alvenaria de pedra podem ser construídas seguindo estes procedimentos: (a) limpar os blocos de alvenaria para melhorar a aderência à argamassa utilizada; (b) umedecer os blocos de alvenaria para não absorverem água de amassadura, necessária para a reação de hidratação do cimento; (c) as pedras que serão utilizadas na alvenaria devem ser talhadas regularmente, ou seja, cortadas ou fatiadas uniformemente para permitir a fixação dos blocos uns com os outros, devendo realizar o desfasamento das juntas dos elementos; (d) para garantir uma boa ligação dos blocos, é recomendável que os mesmos se sobreponham num comprimento de 0,4 vezes a altura do bloco ou 40mm (CITY UNIVERSITY, 2007); (e) na zona dos cunhais a sobreposição dos blocos de pedra deve ser utilizado no mesmo piso (CITY UNIVERSITY, 2007); (g) a espessura das paredes deve ser mantida a mesma de piso para piso (Observar a Figura 30, que mostra alguns perfis de paredes de alvenaria de pedra) (CITY UNIVERSITY, 2007).

Figura 30 - Exemplos de Secções Transversais de Paredes de Alvenaria de Pedra



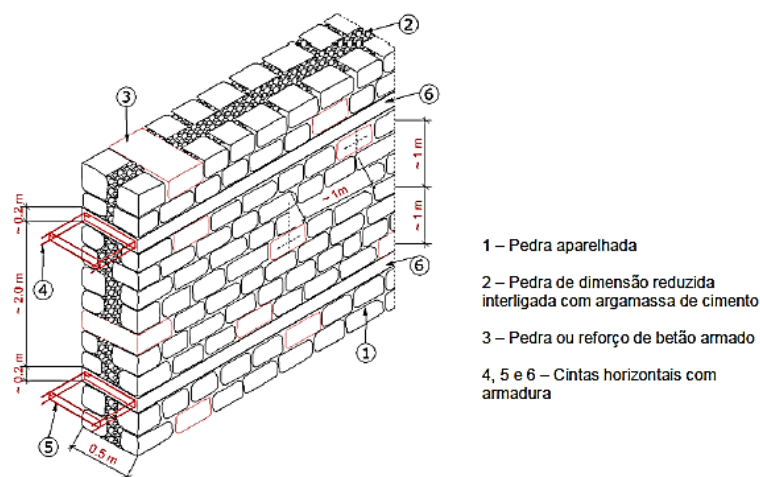
Fonte: Mascarenhas (2003)

De acordo com Pomba (2007), a pedra é um material natural que pode ser aproveitado na construção civil de pequeno porte e que pode apresentar boa qualidade e resistência mecânica

viável. A Figura 31 representa a forma de ser feita uma parede de alvenaria de pedra sujeita à ação sísmica.

Segundo as regras dadas pela City University (2007), as paredes de alvenaria de pedra devem ser construídas na seguinte sequência: (a) limpar os blocos de alvenaria para melhorar a sua aderência na argamassa; (b) umedecer os blocos da alvenaria, pois caso contrário os mesmos podem absorver água de amassadura, necessária para a reação de hidratação do cimento; (c) as pedras utilizadas na alvenaria devem ser talhadas de forma regular, para facilitar o travamento mútuo dos elementos; (d) é recomendado que os blocos se sobreponham num comprimento de 0,4 vezes a altura do bloco ou 40mm; (e) na zona dos cunhais e sobreposição dos blocos de pedra deve ser no mínimo igual à sua largura; (f) o mesmo tipo de pedra e de argamassa deve ser utilizado no mesmo piso; e (g) a espessura das paredes deve ser mantida constante de piso para piso.

Figura 31 - Parede de alvenaria de pedra sismo-resistente



Fonte: Tomazevic (1999)

Segundo Candeias (2008), a diferença das juntas entre as unidades de alvenaria cria uma ligação que dificulta o aumento das fendas entre os blocos, e isso se aplica tanto na alvenaria de pedra irregular quanto na de tijolo, como é visto na Figura 32.

Figura 32 - Montagem de Blocos com Juntas Desfasadas



Fonte: Appleton (2003)

O perpianho, mostrado na Figura 33, é um tipo de pedra que atravessa a espessura da parede de um lado ao outro, é utilizado nas alvenarias de pedra aparelhada, e pode ser usada na alvenaria de pedra irregular, ainda garantindo a boa qualidade e resistência da parede (Candeias, 2008). A Figura 34 mostra o que ocorre com uma parede que não tem a pedra perpianho em sua execução.

Figura 33 - Pedra de Perpianho



Fonte: Fórum da Casa (2012)¹¹

Figura 34 - Abaulamento da Parede sem Perpianho

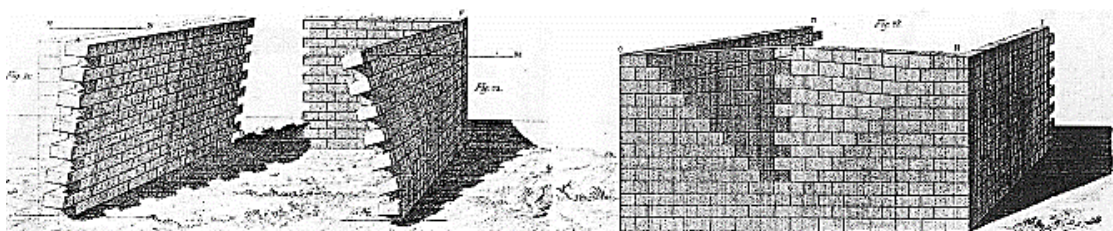


Fonte: Appleton (2003)

¹¹ Disponível em: <https://forumdacasa.com/discussion/27163/preco-muro-de-pedra/>. Acesso: 28 de agosto de 2018.

O contraventamento do edifício, através da ligação entre as paredes, garante a resistência e estabilidade da estrutura, como mostra a Figura 35. Sobre posicionamento das unidades de alvenaria pode ser complementado com a colocação de peças metálicas com função de ligação. Para melhor funcionamento, coloca-se varões de ferro ancorados nas extremidades, funcionando como uma armadura passiva, como mostra a Figura 36 (CANDEIAS, 2008).

Figura 35 - Mecanismos de colapso das paredes quando sujeitas a forças horizontais para fora do seu plano



Fonte: Carocci (2001)

Figura 36 - Exemplo de peças metálicas de ligação



Fonte: Candeias (2008)

4.3.2 Alvenaria de tijolo

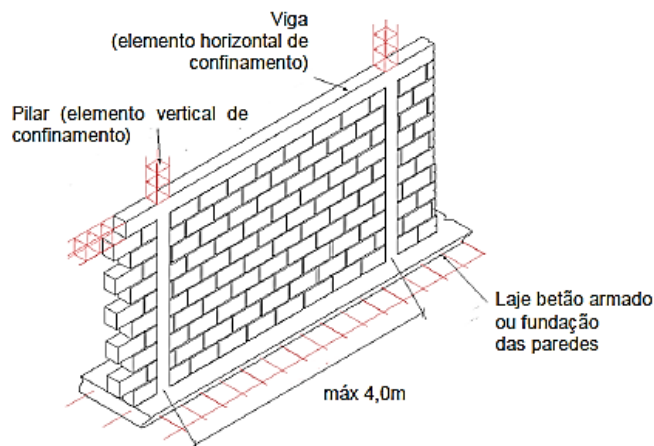
A alvenaria de tijolo é o tipo de alvenaria muito utilizada nas construções, com funções de enchimento nas estruturas de concreto armado. Segundo Pires e Carvalho (1994), esse tipo de alvenaria com essa formação pode ser resistente quando sujeita a ações verticais, mas não é resistente quando se leva em conta a ação das forças sísmicas.

Segundo Pires e Carvalho (1994), os fenômenos de interação entre as paredes de enchimento e as estruturas reticuladas provocam algumas alterações positivas e negativas no comportamento sísmico das forças de inércia, da energia dissipada e da resistência. A existência desses elementos “não estruturais” pode alterar as zonas críticas da estrutura, causando assimetrias relevantes da massa e rigidez, o que já diminui a resistência às ações sísmicas

impostas nas estruturas. A assimetria nas estruturas irá reduzir a sua ductilidade (POMBA, 2007).

A Figura 37 mostra um esquema de alvenaria de tijolo confinada por elementos na horizontal e vertical (elementos que constituem o pórtico e o concreto armado).

Figura 37 - Alvenaria de Tijolo Confinada



Fonte: City University (2007)

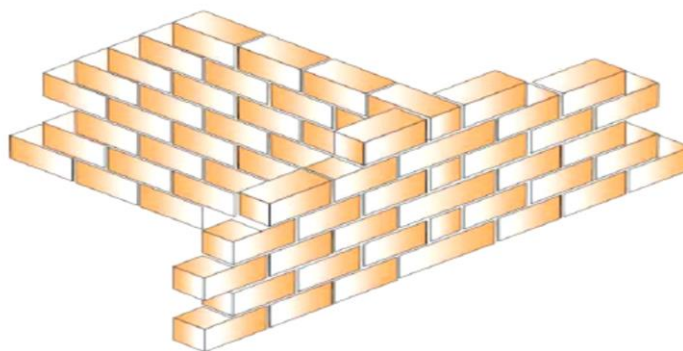
Segundo Candeias (2008), os colapsos causados nas paredes de alvenaria que estão sujeitas a ações sísmicas estão diretamente relacionados à relação entre a largura e altura da base da parede, ou seja, pela sua esbeltez.

4.3.3 Alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural é caracterizada pelos seguintes tipos:

- Simples: É definida como sendo um conjunto de unidades de alvenaria arranjadas uniformemente, ligadas por uma argamassa (Figura 38). Tipo de alvenaria que possui baixo limite de resistência em zonas sísmicas, não tendo nenhum tipo de esforço contra as forças externas recebidas (ALVES, 2011).

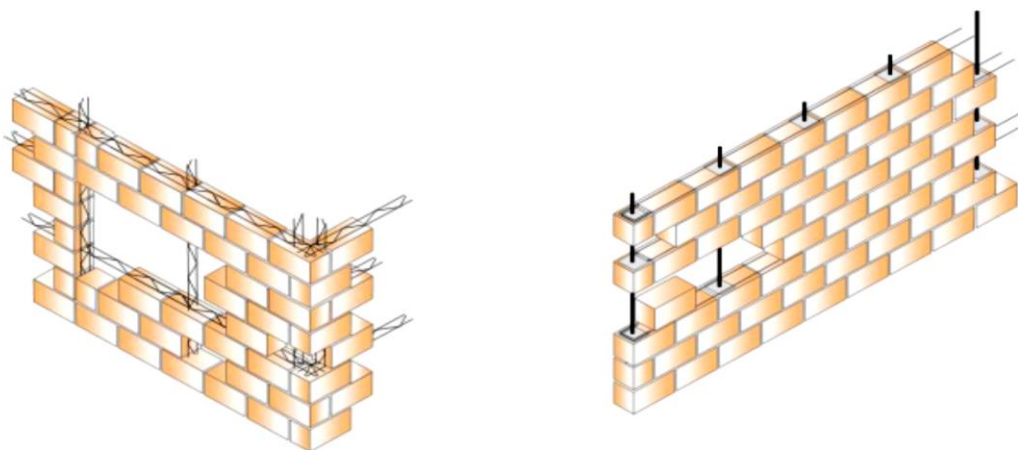
Figura 38 - Exemplo de Alvenaria Simples



Fonte: GOUVEIA (2007)

- Armada: Tipo de alvenaria que contém a presença de armaduras, Figura 39, geralmente feita de aço, que são muito resistentes a esforços de tração. Esse tipo de alvenaria auxiliada pelas ferragens tem capacidade de suportar esforços de tensões e de dissipar energia (ALVES, 2011).

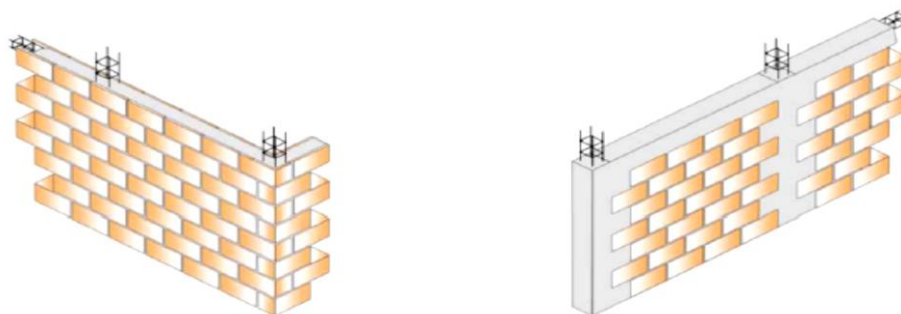
Figura 39 - Exemplo de Alvenaria Armada



Fonte: Gouveia (2007)

- Confinada: Tipo de alvenaria construída que, após as paredes serem levantadas, é usado tipos de confinamento dos quatro lados da alvenaria, formado a partir do concreto armado ou alvenaria armada, resultando em pilares, vigas ou cintas (ALVES, 2011). Observar a Figura 40.

Figura 40 - Exemplo de Alvenaria Confinada



Fonte: Gouveia (2007)

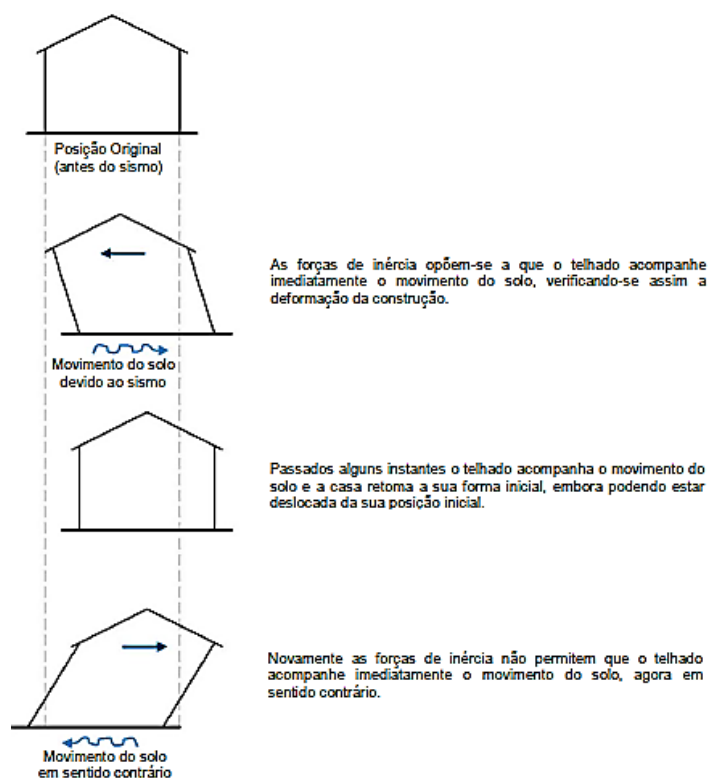
Dentre esses vários tipos de alvenaria, a mais indicada e que possui maior índice de resistência e dissipação de energia causada pela ação sísmica é a alvenaria confinada, pois além

de possuir elementos de concreto armado, contém armaduras adequadas para suportarem esses esforços sísmicos.

4.3.4 Modos de colapso e formas de propagação de fissuras

As vibrações horizontais resultam em forças de inércia nas laterais do edifício devido à resistência que a construção oferece em se pôr em movimento junto com a vibração irregular do solo, causando o efeito que pode ser visto na Figura 41 (CARVALHO; OLIVEIRA, 1983).

Figura 41 - Ação da Vibração Sísmica sobre uma construção



Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

A Figura 42 mostra uma classificação dos danos para edifícios de alvenaria, segundo a escala macrossísmica europeia;

Figura 42 - Classificação em danos de edifícios de alvenaria

Classe de Danos	Descrição geral dos danos	
Grau 1: Danos desprezáveis a leves	- Fendilhação ligeira em algumas paredes; - Queda de reboco em zonas limitadas; - Poucos casos de queda de pedras soltas, de zonas superiores dos edifícios.	
Grau 2: Danos moderados (danos estruturais ligeiros, danos não estruturais moderados)	- Fendilhação em muitas paredes; - Queda de rebocos com dimensões importantes; - Colapsos parciais de chaminés.	
Grau 3: Danos substanciais a severos (danos estruturais moderados, danos não estruturais severos)	- Fendilhação larga e profunda na maioria das paredes; - Desagregação das telhas da cobertura; - Rotura das chaminés no plano da cobertura; - Rotura de elementos não estruturais como paredes divisórias e parte triangular das empenas junto ao telhado.	
Grau 4: Danos muito severos	- Rotura de paredes; - Rotura parcial de pavimentos e cobertura.	
Grau 5: Colapso	- Grande parte ou a totalidade do edifício em ruína.	

Fonte: Pomba (2007)

Segundo Pomba (2007), um edifício sujeito a uma ação sísmica irá se comportar como um todo, ou seja, como um conjunto de elementos interligados uns com os outros, garantindo que todos os elementos constituintes apresentem resistência em suas interligações.

Como a alvenaria apresenta boa resistência a esforços de compressão, é um tipo de característica bastante importante para a resistência aos sismos. Já a desvantagem de uso (no que diz respeito ao comportamento sísmico) são as alvenarias de ligantes de baixa qualidade,

ou seja, com argamassa feita de argila ou com pouco uso de cal hidráulica, pois o efeito das forças sísmicas nas paredes deste tipo de alvenaria conduz fácil e rapidamente a separação do material (CARVALHO; OLIVEIRA, 1983).

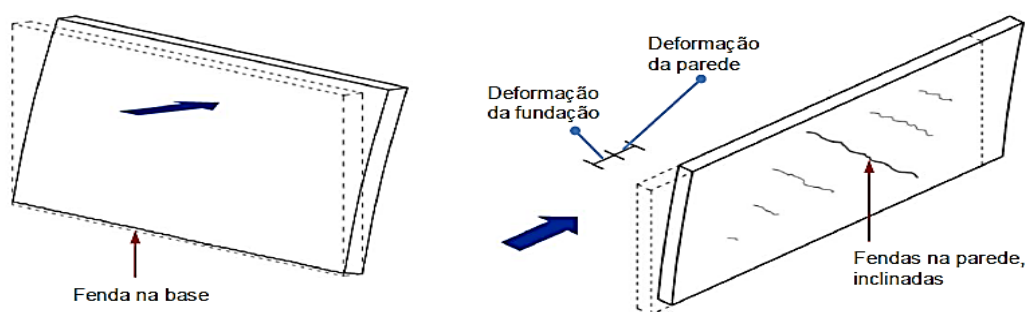
De acordo com Carvalho e Oliveira (1983), nas construções de pequeno porte, as paredes se interligam com os pavimentos e a cobertura, desempenhando simultaneamente funções de resistência estrutural tanto para cargas verticais como para horizontais.

Segundo Pomba (2007), o bom comportamento de uma parede de alvenaria não se deve à ligação entre os blocos numa alvenaria quando sujeita a forças horizontais sísmicas, pois mesmo uma parede bem construída pode apresentar mau comportamento face aos ataques de sismos.

A atuação de forças transversais é muito mais desfavorável do que a atuação de forças longitudinais, pois paredes construídas perante a atuação de forças transversais possuem baixa resistência, facilitando o seu derrubamento por meio da formação de uma fenda junto da fundação ou por rotura da própria fundação. Já as paredes feitas para a atuação de forças longitudinais ao plano da parede promovem melhor capacidade de suporte, transferindo as cargas para as fundações de forma eficaz (POMBA, 2007).

A ação sísmica atua em todas as direções, induzindo forças segundo a direção transversal e longitudinal da parede, como mostra a Figura 43.

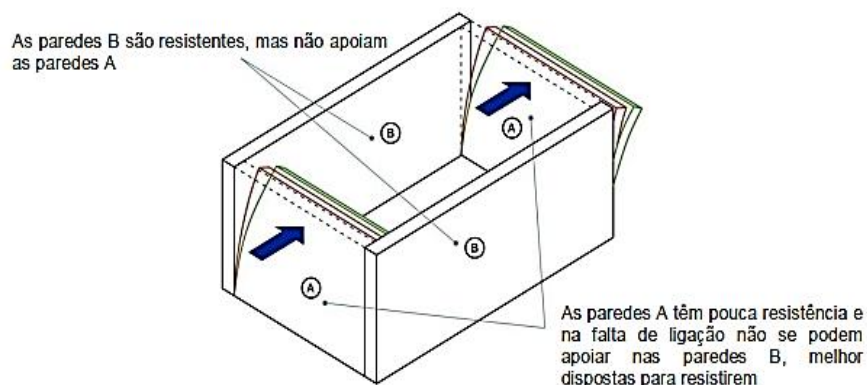
Figura 43 - Parede isolada sujeita a forças laterais



Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

Para se obter um bom comportamento sísmico, os elementos devem ser resistentes em mais de uma direção. Mas como se pode observar na Figura 44, esta parede possui uma ligação deficiente, implicando em um comportamento isolado sobre as mesmas, ou seja, não promove o apoio de uma parede sobre outra.

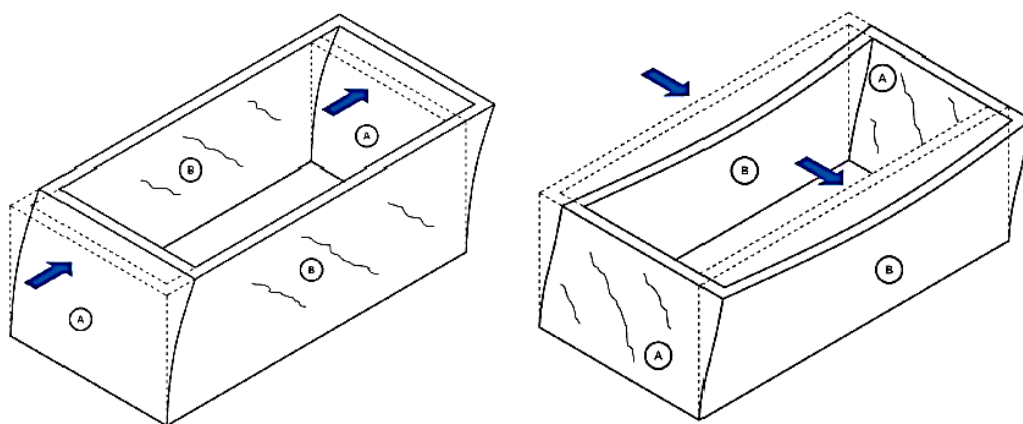
Figura 44 - Construção constituída por quatro paredes não ligadas



Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

O funcionamento em conjunto das quatro paredes suporta qualquer que seja direção de atuação das forças sísmicas atuantes. A Figura 45 mostra o bom comportamento das paredes numa edificação de pequeno porte. A primeira imagem mostra as paredes B suportando as paredes A, e a segunda imagem mostra as paredes A suportando as paredes B.

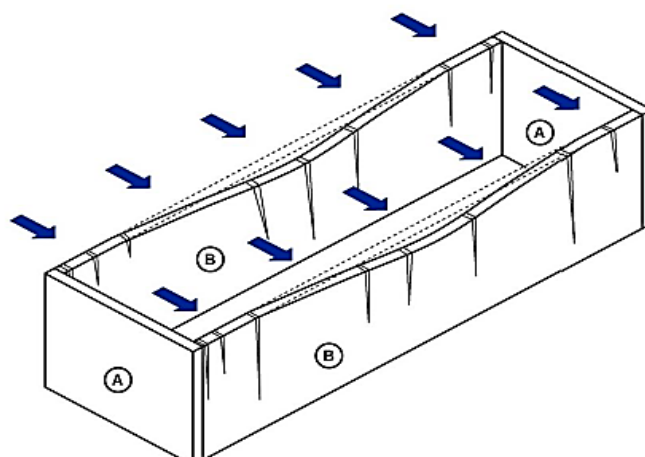
Figura 45 - Construção de quatro paredes travadas por cunhais



Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

A Figura 46 mostra o comprimento das paredes B e sua zona central, que não podem se apoiar nas paredes transversais, apresentando nessa zona um comportamento próximo ao de parede isolada com uma maior resistência do que a parede mostrada anteriormente.

Figura 46 - Construção alongada constituída por quatro paredes travadas nos cunhais

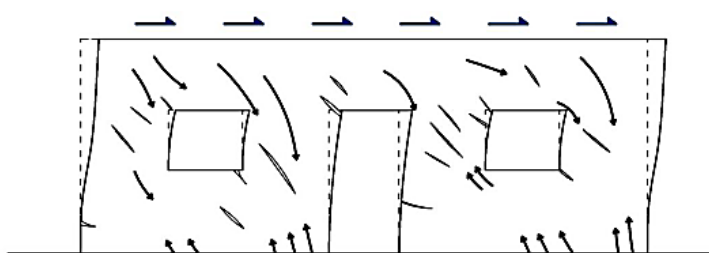


Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

4.3.5 Efeito das aberturas

Até agora só foi analisado o comportamento de paredes sem quaisquer aberturas, no entanto, a existência dessas aberturas altera de forma muito significativa o comportamento das paredes sujeitas ao sismo, pois o encaminhamento das cargas até às fundações é afetado pela posição das aberturas. Dependendo das dimensões dessas aberturas, podem afetar de forma considerável o comportamento e resistência do edifício, diminuindo a rigidez da parede. A Figura 47 mostra o comportamento de uma parede que possui aberturas, atuada por uma força horizontal superiormente.

Figura 47 - Comportamento de uma parede com aberturas



Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

Enquanto numa parede uniforme, sem aberturas, a força aplicada pode ser dissipada na parede seguindo uma trajetória diagonal ao terreno, no caso de haver aberturas na parede, essa trajetória é interrompida, implicando em consequências, como:

- A existência de aberturas reduz a área de parede para a transmissão da força, as tensões desenvolvidas na zona maciça (entre dois vãos de porta ou janela) da parede são maiores do que na situação da parede cega;

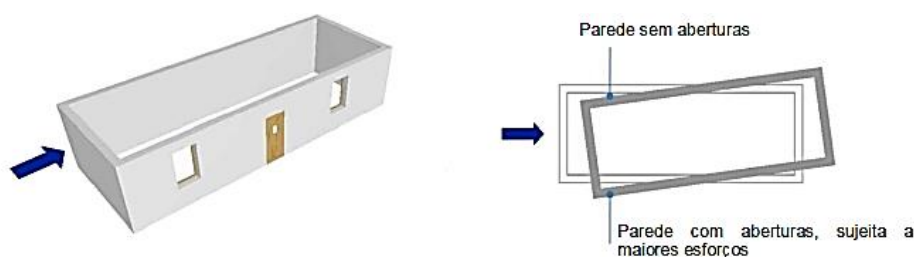
- Globalmente a rigidez da parede diminui, implicando em maiores deformações para uma mesma força;
- A ocorrência de fissuras nas paredes é devido às tensões de tração (CARVALHO; OLIVEIRA, 1983);

4.3.6 Efeitos de assimetrias e irregularidades

A localização das aberturas altera de alguma forma o comportamento das paredes, de modo a provocar danos graves na construção. Segundo Carvalho e Oliveira (1983), um dos fatores primordiais que contribui para uma melhoria na eficácia do comportamento das paredes sob ações sísmicas é a regularidade e simetria da sua concepção.

Na Figura 48 podemos observar a assimetria introduzida na construção por meio de aberturas bem diferenciadas, o que provocará esforços de torção no edifício devido às forças longitudinais provocadas pela ação sísmica.

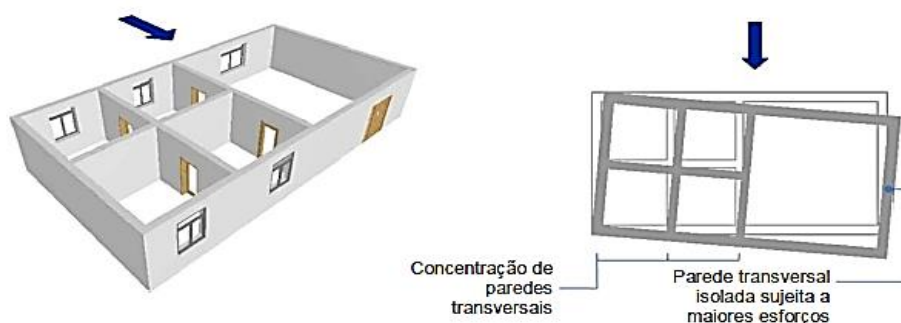
Figura 48 - Efeitos das irregularidades em planta no comportamento sísmico de edifícios



Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

Na Figura 49 a ação sísmica provoca forças transversais, acarretando em esforços de torção e uma concentração de esforços na parede de topo mais isolada. Já na Figura 50 a irregularidade resulta de uma planta em formato de L, com suas alas com diferenças na rigidez, o que provocará uma concentração de danos na zona de ligação dessas alas devido à grande diferença de rigidez das duas zonas do edifício. Posteriormente, ocorrerá deslocamentos diferenciais nas alas que geram concentrações de esforços, favorecendo o desencontro entre as paredes, o que agravará ainda mais o efeito descrito (CARVALHO; OLIVEIRA, 1983).

Figura 49 - Efeitos das irregularidades em planta no comportamento sísmico de edifícios



Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

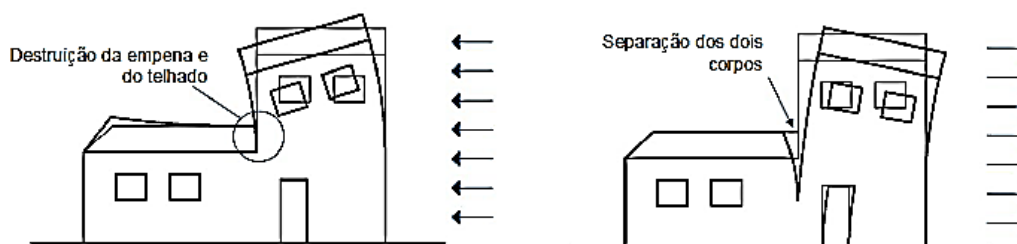
Figura 50 - Efeitos das irregularidades em planta no comportamento sísmico de edifícios



Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

Existem irregularidades e assimetrias em altura que são muito usuais em edifícios altos e que podem agravar os efeitos dos sismos. Observar a Figura 51.

Figura 51 - Exemplos de efeitos de irregularidades em altura no comportamento sísmico em edifícios



Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

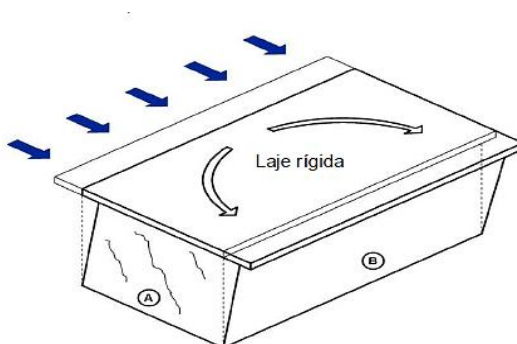
4.3.7 Pavimentos

As lajes de concreto armado maciças apresentam grande rigidez e resistência no seu plano, oferecendo um bom comportamento diante de solicitações horizontais. Estes tipos de lajes, se forem ligadas aos restantes dos elementos constituintes de um edifício, irá promover maior rigidez a todo o conjunto de elementos (CARVALHO; OLIVEIRA, 1983).

Na Figura 52 é apresentado um esquema de uma laje rígida sobre quatro paredes interligadas. As melhorias por ter a presença desta laje, de acordo com Carvalho e Oliveira, (1983), são:

- A rigidez da laje possibilita o travamento superior da zona central das paredes B, evitando o seu comportamento isolado;
- O travamento da zona central das paredes implica em uma transmissão de forças adicionadas às paredes A, que passam a suportar quase todas as forças horizontais atuantes;
- O funcionamento ilustrado na figura só poderá ocorrer se a laje estiver totalmente ligada às paredes A e B;
- Devido ao efeito das forças transversais atuantes nas paredes B, as suas zonas centrais irão fletir apoiando-se na parte inferior e superior, podendo ocasionar a rotura da parede (problema que poderá ser resolvido colocando-se montantes).

Figura 52 – Solidarização das paredes conferida por uma laje rígida



Fonte: Carvalho; Oliveira (1983)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo sobre o comportamento dos edifícios sujeitos a forças horizontais é de extrema relevância, visto que muitos lugares (até em algumas regiões do Brasil) estão sujeitos a fenômenos sísmicos. Se uma construção não for preparada para resistir a esses fenômenos, sofrerá fissuras que poderá levar até o colapso na sua estrutura. É preciso se aprofundar ainda mais neste assunto para aplicá-lo ao máximo na construção civil, pois vidas estão correndo risco quando uma estrutura não resiste à atuação sísmica sobre ela.

De acordo com o estudo feito neste trabalho, destaca-se o comportamento que a estrutura apresenta quando há irregularidades e assimetrias nos edifícios, ou seja, quando há mudanças bruscas na forma da estrutura, pois isso gera fissuras localizadas, principalmente nos vértices do edifício, e também nas aberturas das paredes e até nas ligações de umas com as outras, pois isso interfere diretamente na rigidez da estrutura. É essencial que a edificação seja simétrica e regular, sem muitas aberturas nas paredes e que possuam ligação parede-laje ou viga-parede bem resistente, para que as forças horizontais atuantes na estrutura possam ser dissipadas uniformemente até às fundações.

Sugere-se que as pesquisas sobre o tema abordado neste trabalho possam continuar, pois com isso será obtido melhorias no funcionamento da estrutura sob ações sísmicas, buscando meios mais econômicos de construir estes tipos de edifícios, pelo fato de nem todo país ter as condições necessárias de fazer um alto investimento neste tipo de construção. Também que estas pesquisas possam estudar as melhores formas de dissipar a energia, (como os amortecedores viscosos, placas deslizantes, pêndulos, etc.) que a estrutura está sujeita, mais meios de obter paredes ainda mais resistentes do que as que já foram estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J.P.S.M. **Desempenho Sísmico de Estruturas de Alvenaria de Blocos de Concreto**. 2011. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Construção e Reabilitação Sustentáveis. Universidade do Minho, Escola de Engenharia. Braga, 2011.

ASSUMPÇÃO, M.; PIRCHINER, M.; DOURADO, J. C.; BARROS, L. V. (2016): **Terremotos no Brasil: Preparando-se para eventos raros**. Boletim SBGF, v. 96, p. 25-29.

BOZZO, L. M., BARBAT, A. H. **Diseño Sismorresistente de Edificios: Técnicas convencionales y avanzadas**. Editorial Reverté, S.A, Barcelona, España, 2008.

BBCBrasil.com. **Conheça os cinco terremotos mais fortes do mundo**. Disponível em: <http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/04/140402_cinco_maiores_terremotos_lgb>. Acesso em: 11 mai. 2018.

CANDEIAS, P.J.O.X. **Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica de Edifícios de Alvenaria**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Protocolo de Cooperação com o LNEC. Universidade do Minho, Escola de Engenharia. Braga, 2008.

CARVALHO, E. C., & OLIVEIRA, C. S. (1983). **Manual de Construção Anti-sísmica**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

City University, London (2007). **Low-rise Residential Construction Detailing to Resist Earthquakes**. Recuperado em 2007, Junho 14, de <http://www.staff.city.ac.uk/earthquakes/index.php>.

DANTAS, R.O.O. **Subsídios para o Projeto de Estruturas Sismo Resistentes**. 2013. Dissertação (Mestre em Estruturas e Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Natal, 2013.

EUROCODE 08. **Seismic Design of Buildings Worked Examples**. European Committee for Standardization, Lisbon. 2011.

FEMA 454, 2007, **National Earthquake Hazard Reduction Program Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures** – Par 1 Provisions and Part 2 Commentary, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.

GOUVEIA, J. LOURENÇO P. (2008). **Desenvolvimento de um Sistema Industrializado em Alvenaria Estrutural**, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

GeoForschungsZentrum-Potsdam (GFZ). Global Seismic Hazard Map. In: www.gfz-potsdam.de/pb5/pb53/projects/en/gshap/menuegshape.html, 1999.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física, volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2002.

LOWRIE, William. **Fundamentals of Geophysics**, 1977.

LOURENÇO, 1996. P. B. LOURENÇO. **Computational Strategies for Masonry Structures**, PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, Delft University Press, ISBN: 9040712212.

LOURENÇO, 2002. PAULO B. LOURENÇO. **Computations on Historic Masonry Structures**, Progress in Structural Engineering and Materials, 2002; 4:301-319.

Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica e Estruturas. Departamento de Estruturas. **INFORMAÇÕES DE INTERESSE GERAL**. Disponível em: http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/o_que_sao_sismos.html. Acesso em: 20 abr. 2018.

NORMA Oficial Mexicana NOM-116-SEMARNAT: 2005, Que establece **las especificaciones de protección ambiental para prospecciones sísmológicas terrestres, ganaderas y eriales**.

POMBA, F.J.C. **Comportamento Sísmico de Edifícios de Pequeno Porte**. 2011. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa (ITS), Lisboa, 2012.

PIRES, F., & CARVALHO, E. C. (1994). **Estudo Experimental da Influência das Paredes de Enchimento no Comportamento dos Pórticos de Betão Armado quando sujeitos a Acções Horizontais**. Em 2º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), pp. IV.53-IV.63.

SOUSA, M. L., OLIVEIRA, C. S., & COSTA, A. C. (2006). **Caracterização do Parque Habitacional de Portugal Continental para Estudos de Risco Sísmico**. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, no55, pp. 35-50.

SILVA, F.C.M. (2009). **Avaliação do Risco Sísmico nas Regiões Nordeste e Sudeste do Brasil**. Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SANTOS, S.H.C., SOUZA LIMA, S. **Estudos da Zonificação Sísmica Brasileira Integrada em um Contexto Sul-Americano**. Anais das Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires. 2004.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. (2003): **Decifrando a Terra**. Companhia Editora Nacional, 2ª edição.

TOMAZEVIC, M. (1999). **Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings**. Imperial College Press.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). “Seismic Hazard Map of South America”. In: <http://earthquake.usgs.gov/research/hazmaps/index.php;2006>. Acesso em: 15 de julho de 2018.

