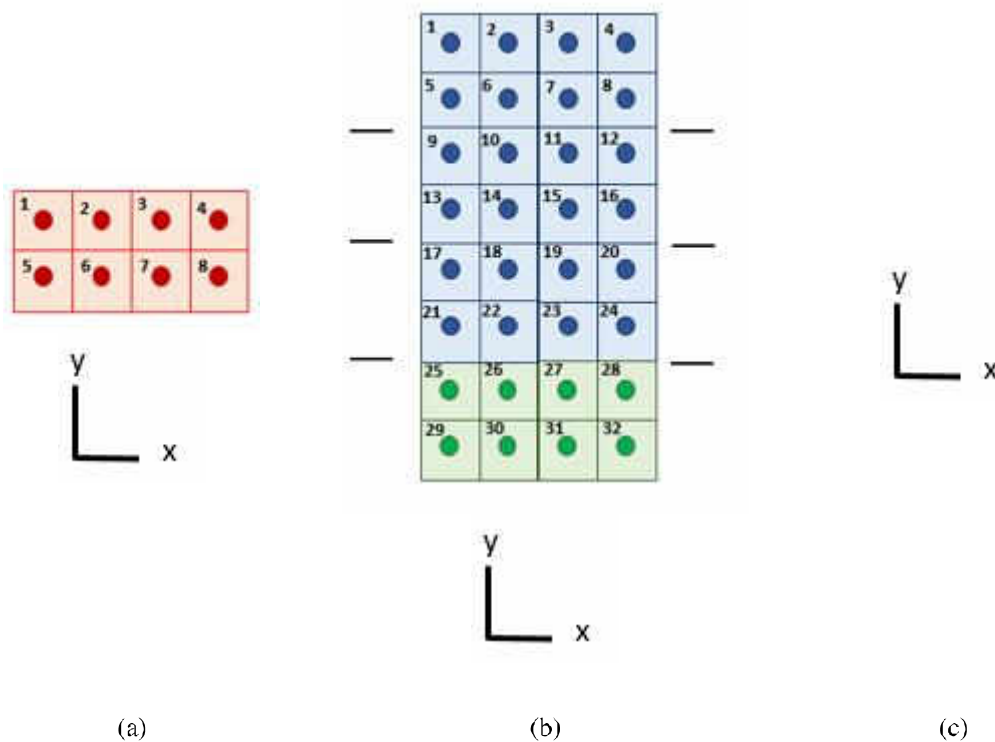


Inicialmente deve-se delimitar uma região do domínio de projeto que será repetida em todo o domínio, sendo que as variáveis contidas nessa região compõem o conjunto $\mathbf{d}^1$. As densidades secundárias $\mathbf{d}^2$, são obtidas através do mapeamento das variáveis de projeto contidas no conjunto $\mathbf{d}^1$ nos locais nos quais se deseja obter a mesma padronização. Para maior clareza da ilustração, a Figura 3.1 apresenta os conjuntos $\mathbf{y}$, $\mathbf{d}^1$ e $\mathbf{d}^2$ em uma aplicação bidimensional.

Figura 3. 1- Ilustração de mapeamento das variáveis de projeto para imposição da repetição de padrão ao longo do eixo Y em aplicações bidimensionais: (a) conjunto de variáveis de projeto $\mathbf{y}$; (b) conjuntos $\mathbf{d}^1$ e $\mathbf{d}^2$ de densidades nos elementos; (c) mapeamento das variáveis de projeto em densidades nodais formando a distribuição com padrões repetidos ao longo do eixo Y.



O mapeamento das variáveis de projeto foi adaptado de Almeida *et al.* (2010), onde foram desenvolvidas para aplicações bidimensionais com variáveis nodais, para aplicações tridimensionais para ABE segundo as expressões (3.1) a (3.3). A expressão (3.1) indica o mapeamento para a repetição ao longo do eixo X e a expressão (3.2) define o mapeamento para a repetição ao longo do eixo Y e a equação (3.3) indica a repetição ao longo do eixo Z. Para obter a repetição de padrão ao longo de mais de um eixo as equações devem ser aplicadas simultaneamente.

$$\begin{array}{ll} \text{se} & \begin{cases} X_i = X_j + a \\ Y_i = Y_j \\ Z_i = Z_j \end{cases} \\ \text{então} & d_i = d_j = y_k \end{array} \quad (3.1)$$

$$\begin{array}{ll} \text{se} & \begin{cases} X_i = X_j \\ Y_i = Y_j - b \\ Z_i = Z_j \end{cases} \\ \text{então} & d_i = d_j = y_k \end{array} \quad (3.2)$$

$$\begin{array}{ll} \text{se} & \begin{cases} X_i = X_j \\ Y_i = Y_j \\ Z_i = Z_j - c \end{cases} \\ \text{então} & d_i = d_j = y_k \end{array} \quad (3.3)$$

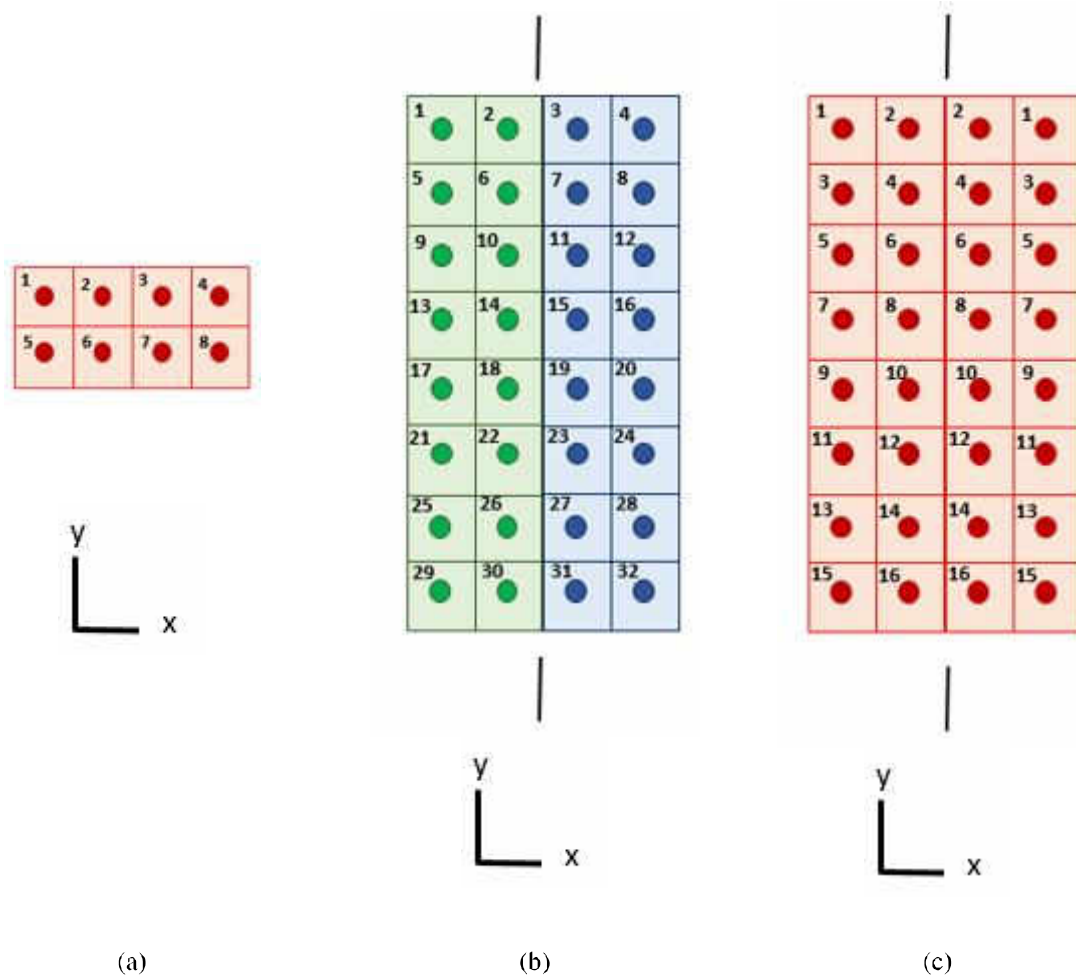
Onde:

- i – indica o índice do nó do conjunto $\mathbf{d}^2$;
- j – indica o índice do nó do conjunto $\mathbf{d}^1$;
- k – identifica a variável de projeto y para assumir as densidades do nó i e j ;
- a, b e c – comprimento do padrão na direção dos eixos X e Y respectivamente.

3.1.2. Simetria

A distribuição simétrica de material é atingida pelo mapeamento das variáveis de projeto y em um conjunto de densidades do elemento $\mathbf{d}$, seguindo a mesma ideia apresentada para repetição de padrão por Almeida *et al.* (2010). As variáveis de projeto são mapeadas no conjunto de densidades primárias $\mathbf{d}^1$. O mapeamento secundário é construído levando em consideração a simetria desejada. As coordenadas dos nós do conjunto secundário $\mathbf{d}^2$ são testadas para determinar as condições de simetria em relação ao conjunto de densidades primárias $\mathbf{d}^1$. Uma vez que o nó é identificado, a mesma variável de projeto é atribuída para os dois. Para maior clareza da ilustração, a Figura 3.2 apresenta os conjuntos y , $\mathbf{d}^1$ e $\mathbf{d}^2$ em uma aplicação bidimensional.

Figura 3.2 - Ilustração do mapeamento das variáveis de projeto para imposição de simetria em relação ao eixo Y em aplicações bidimensionais: (a) conjunto de variáveis de projeto y ; (b) conjuntos $\mathbf{d}^1$ e $\mathbf{d}^2$ de densidades nos elementos; (c) mapeamento das variáveis de projeto em densidades nodais formando a distribuição simétrica em relação ao eixo Y .



O mapeamento das variáveis de projeto foi adaptado de Almeida *et al.* (2010), onde foram desenvolvidas para aplicações bidimensionais com variáveis nodais, para aplicações tridimensionais para ABE segundo as expressões (3.1) a (3.3). As expressões (3.4), (3.5), (3.6) representam o mapeamento para a imposição de simetria em relação aos planos X - Y , X - Z e Y - Z respectivamente. Para a obtenção da simetria em mais de um eixo as equações devem ser aplicadas simultaneamente.

$$\begin{array}{ll}
 \text{se} & \begin{cases} X_i = X_j \\ Y_i = Y_j \\ Z_i = L_Z - Z_j \end{cases} \\
 \text{então} & d_i = d_j = y_k
 \end{array} \quad (3.4)$$

$$\begin{array}{ll}
 \text{se} & \begin{cases} X_i = X_j \\ Y_i = L_Y - Y_j \\ Z_i = Z_j \end{cases} \\
 \text{então} & d_i = d_j = y_k
 \end{array} \quad (3.5)$$

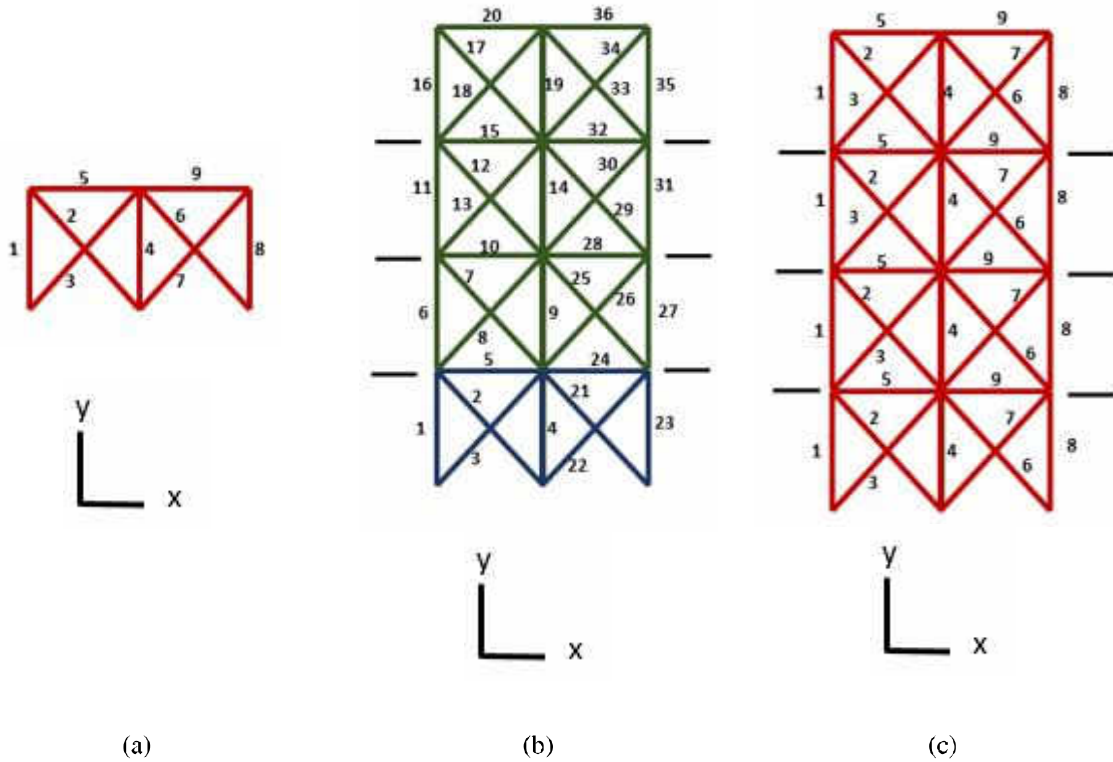
$$\begin{array}{ll}
 \text{se} & \begin{cases} X_i = L_X - X_j \\ Y_i = Y_j \\ Z_i = Z_j \end{cases} \\
 \text{então} & d_i = d_j = y_k
 \end{array} \quad (3.6)$$

3.2. TÉCNICAS DE CONTROLE DE LAYOUT - MÉTODO GROUND STRUCTURE

As equações apresentadas por Almeida *et al.* (2010) para imposição das condições de manufatura são aqui adaptadas ao método de *ground structure* e para aplicações tridimensionais. A diferença é que, nesse caso, o conjunto de variáveis de projeto $\mathbf{y}$ será mapeado para os conjuntos primário $\mathbf{a}^1$ e secundário $\mathbf{a}^2$ de áreas das seções das barras.

A Figura 3.3 ilustra o esquema para obtenção de soluções 2D com repetição de padrão ao longo do eixo Y . O padrão é definido pelo usuário em função do objetivo da aplicação. As variáveis de projeto são representadas na Figura 3.3(a), o subconjunto $\mathbf{a}^1$ é representado pelas barras verdes e o subconjunto $\mathbf{a}^2$ pelas barras azuis na Figura 3.3(b). Figura 3.3(c) mostra a distribuição espacial das variáveis de projeto.

Figura 3.3 - Ilustração do mapeamento das variáveis de projeto para imposição de repetição de padrão ao longo do eixo Y em aplicações bidimensionais: (a) conjunto de variáveis de projeto y ; (b) conjuntos a^1 e a^2 de áreas das transversais; (c) mapeamento das variáveis de projeto em áreas das seções transversais formando a distribuição com padrões repetidos ao longo do eixo Y .



Em estudos 3D, a expressão (3.7) impõe repetição de padrão ao longo do eixo X , a expressão (3.8) ao longo do eixo Y e a expressão (3.9) ao longo do eixo Z . Para obter a repetição de padrão em mais de um plano as equações devem ser aplicadas simultaneamente.

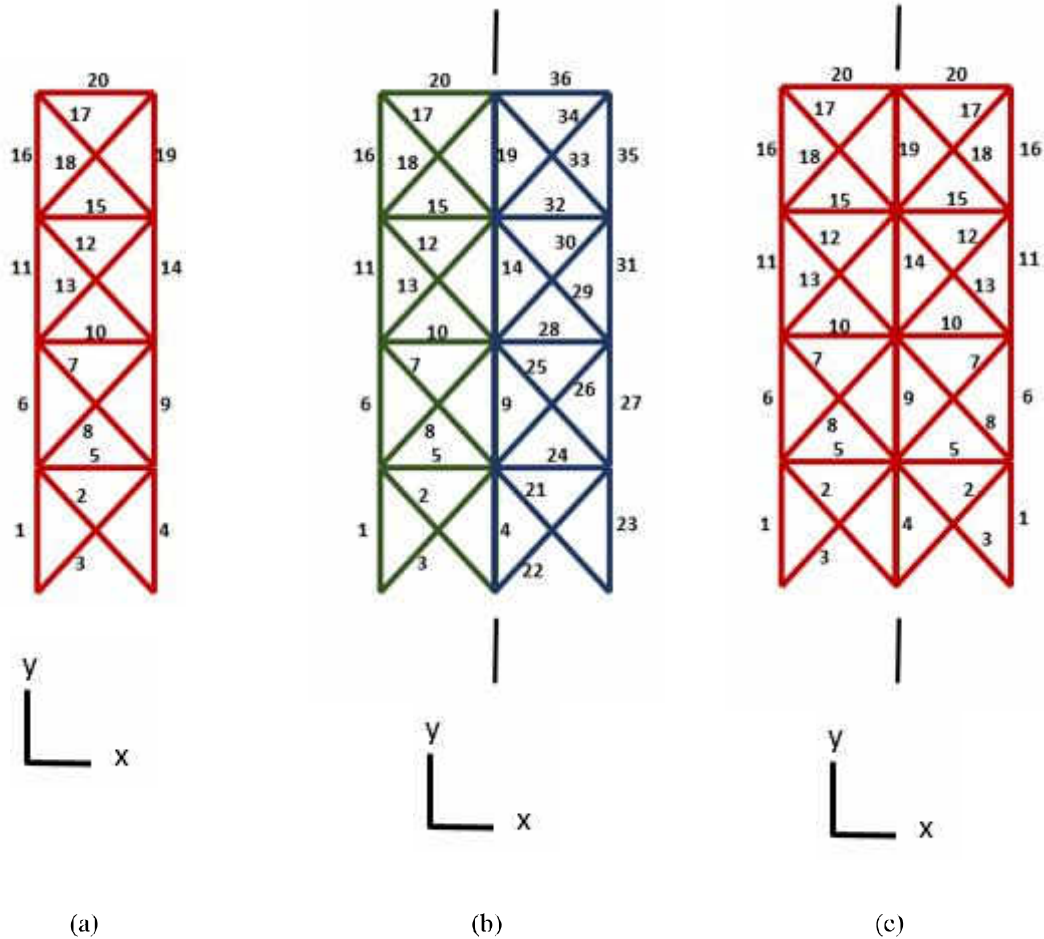
$$\begin{array}{l}
 \text{sc} \\
 \text{então}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 X_{1i} = X_{1j} + a \\
 X_{2i} = X_{2j} + a \\
 Y_{1i} = Y_{1j} \\
 Y_{2i} = Y_{2j} \\
 Z_{1i} = Z_{1j} \\
 Z_{2i} = Z_{2j} \\
 A_i = A_j = y_k
 \end{array}
 \right.
 \quad (3.7)$$

$$\begin{array}{l}
 \text{se} \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{1i} = X_{1j} \\ X_{2i} = X_{2j} \\ Y_{1i} = Y_{1j} - b \\ Y_{2i} = Y_{2j} - b \\ Z_{1i} = Z_{1j} \\ Z_{2i} = Z_{2j} \end{array} \right. \\
 \text{então} \quad A_i = A_j = y_k
 \end{array} \tag{3.8}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{se} \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{1i} = X_{1j} \\ X_{2i} = X_{2j} \\ Y_{1i} = Y_{1j} - b \\ Y_{2i} = Y_{2j} - b \\ Z_{1i} = Z_{1j} \\ Z_{2i} = Z_{2j} \end{array} \right. \\
 \text{então} \quad A_i = A_j = y_k
 \end{array} \tag{3.9}$$

A Figura 3.4 ilustra o esquema para obtenção de soluções 2D simétricas em relação ao eixo Y . As variáveis de projeto y são representadas na Figura 3.4(a), o subconjunto $\mathbf{a}^1$ é representado pelas barras verdes e o subconjunto $\mathbf{a}^2$ pelas barras azuis na Figura 3.4(b). A Figura 3.4(c) mostra a distribuição espacial das variáveis de projeto.

Figura 3.4 - Ilustração do mapeamento das variáveis de projeto para imposição de simetria em relação ao eixo Y em aplicações bidimensionais: (a) conjunto de variáveis de projeto y ; (b) conjuntos a^1 e a^2 de áreas das seções transversais; (c) mapeamento das variáveis de projeto em áreas das seções transversais formando a distribuição simétrica em relação ao eixo Y .



Em estudos 3D, as expressões (3.10), (3.11) e (3.12) impõem simetria em relação aos planos X - Y , X - Z e Y - Z , respectivamente. Para obter simetria a mais de um plano as equações correspondentes devem ser aplicadas simultaneamente.

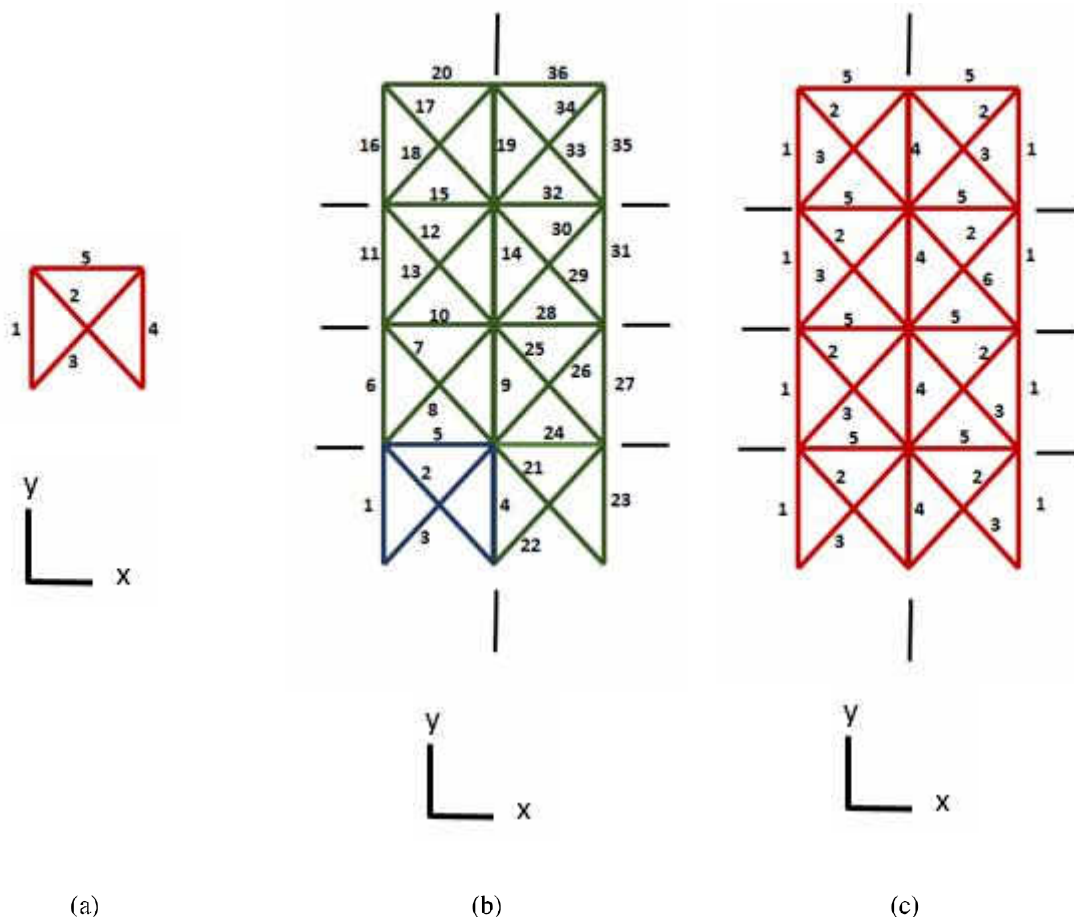
$$\begin{array}{l}
 \text{se} \\
 \left\{ \begin{array}{l} X_{1i} = X_{1j} \\ X_{2i} = X_{2j} \\ Y_{1i} = Y_{1j} \\ Y_{2i} = Y_{2j} \\ Z_{1i} = L_Z - Z_{1j} \\ Z_{2i} = L_Z - Z_{2j} \end{array} \right. \\
 \text{então} \quad A_i = A_j = y_k
 \end{array} \quad (3.10)$$

$$\begin{array}{lcl}
& & \left\{ \begin{array}{l} X_{1i} = X_{1j} \\ X_{2i} = X_{2j} \\ Y_{1i} = L_Y - Y_{1j} \\ Y_{2i} = L_Y - Y_{2j} \\ Z_{1i} = Z_{1j} \\ Z_{2i} = Z_{2j} \end{array} \right. \\
\text{se} & & \\
& & \\
\text{então} & & \Lambda_i = \Lambda_j = y_k
\end{array} \tag{3.11}$$

$$\begin{array}{lcl}
& & \left\{ \begin{array}{l} X_{1i} = X_{1j} \\ X_{2i} = X_{2j} \\ Y_{1i} = Y_{1j} \\ Y_{2i} = Y_{2j} \\ Z_{1i} = L_Z - Z_{1j} \\ Z_{2i} = L_Z - Z_{2j} \end{array} \right. \\
\text{se} & & \\
& & \\
\text{então} & & \Lambda_i = \Lambda_j = y_k
\end{array} \tag{3.12}$$

A Figura 3.5 ilustra uma solução 2D com repetição de padrão ao longo do eixo Y e simetria em relação ao eixo Y aplicadas simultaneamente. As variáveis de projeto $\mathbf{y}$ são representadas na Figura 3.5(a), o subconjunto $\mathbf{a}^1$ é representado pelas barras verdes e o subconjunto $\mathbf{a}^2$ pelas barras azuis na Figura 3.5(b) e a Figura 3.5(c) mostra a distribuição espacial das variáveis de projeto.

Figura 3.5 - Ilustração do mapeamento das variáveis de projeto para imposição de repetição de padrão ao longo do eixo Y e simetria em relação ao eixo Y em aplicações bidimensionais: (a) conjunto de variáveis de projeto y ; (b) conjuntos a^1 e a^2 de áreas das seções transversais; (c) mapeamento das variáveis de projeto em áreas das seções transversais formando a distribuição com padrões repetidos ao longo do eixo Y dispostos de forma simétrica em relação ao eixo Y .



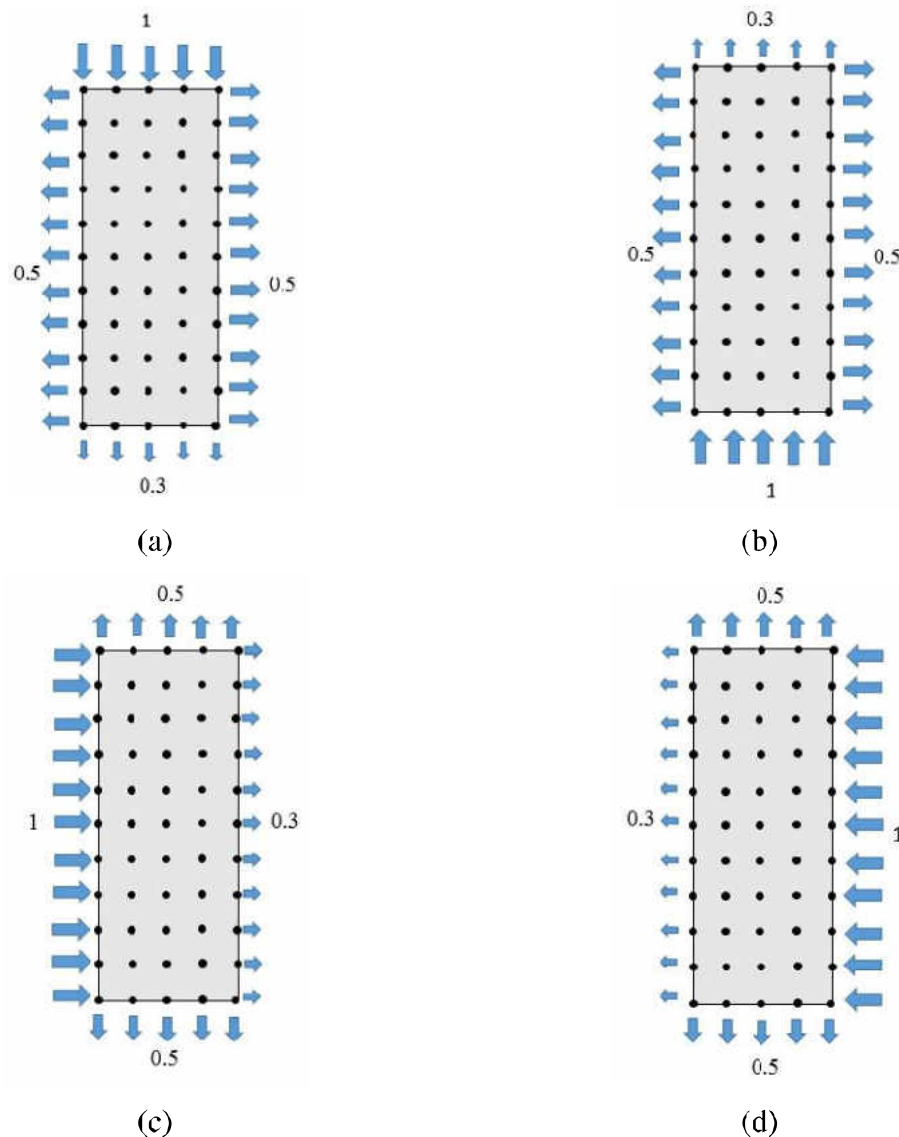
3.3. MÚLTIPLOS CARREGAMENTOS

Os edifícios são estruturas sujeitas a diversos tipos de ações que podem ocorrer de forma isolada ou simultânea. O peso próprio da estrutura, as cargas oriundas da ocupação, os pesos dos elementos de construção resultam em cargas verticais, enquanto que as cargas horizontais que se devem principalmente à ação do vento. Com o crescente aumento do número de arranha-céus o papel do vento na concepção estrutural tem se tornado cada dia mais determinante e é a principal ação no sistema de contraventamento dos edifícios. Normalmente, as cargas verticais são suportadas por outros elementos internos e não fazem parte do escopo deste trabalho, o qual

tem foco nas estruturas de contraventamento, para as quais serão utilizadas apenas os carregamentos horizontais devidos à ação do vento.

As normas de projeto preveem que, no caso de análise estática equivalente em edifícios tipo caixa, sejam considerados carregamentos não simultâneos com vento incidindo perpendicularmente às fachadas do edifício. Assim, no âmbito da OT tal consideração resultará na necessidade da análise de múltiplos carregamentos com 4 (quatro) possibilidades de atuação do vento segundo sua direção e o seu sentido X^+ , X^- , Y^+ e Y^- .

Figura 3.6 – Exemplo de cargas não simultâneas devidas à incidência do vento em edifícios do tipo caixa:
(a) vento incidindo a 0° em sentido 1 (X^+); (b) vento incidindo a 0° em sentido 2 (X^-); (c) vento incidindo a 90° em sentido 1 (Y^+); (d) vento incidindo a 90° em sentido 2 (Y^-).



O deslocamento da massa de ar, ao ser interceptado na fachada de sotavento provoca sobre ela uma sobrepressão. Uma parte da massa de ar é desviada e outra parte passa ao longo das fachadas transversais originando sobre elas uma sucção de menor intensidade que a sobrepressão original. Novamente uma parte da massa de ar é desviada e outra parte atinge a fachada de barlavento originando sobre ela uma sucção de menor intensidade que a sobrepressão original e que a sucção nas fachadas transversais. Os valores dessas cargas variam de acordo com as dimensões do edifício. Como o processo de OT corresponde à fase de definição do *layout* da estrutura, o valor da carga pouco interfere no resultado final. Assim, neste trabalho serão adotados os carregamentos ilustrados na Figura 3.6, a qual mostra a incidência do vento em edifícios tipo caixa.

3.3.1. Métodos de densidade

A flexibilidade média da estrutura para um problema sujeito a múltiplos carregamentos pode ser dada pela equação (3.13):

$$c = \sum y_k \mathbf{F}_k^T \mathbf{U}_k \quad (3.13)$$

Onde

y_k – é o peso associado à combinação de ações k .

Logo, o problema de minimização da flexibilidade média da estrutura apresentado em (2.5) é reescrito conforme a equação (3.14).

$$\begin{aligned} \text{obter :} & \quad \mathbf{x} \\ \text{que minimiza :} & \quad c(\mathbf{x}) = \sum y_k \mathbf{F}_k^T \mathbf{U}_k(\mathbf{x}) \\ \text{tal que :} & \quad \sum_{\mathbf{r} \in \Omega} \mathbf{r}_e V_e = f V_0 \\ & \quad \mathbf{r}_{\min} \leq \mathbf{r}_e(\mathbf{x}) \leq 1 \\ \text{com :} & \quad \mathbf{K}(\mathbf{r}(\mathbf{x})) \mathbf{U}_k(\mathbf{x}) = \mathbf{F}_k \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.3.2. Método de *ground structure*

Para a obtenção da solução ótima de uma treliça submetida a múltiplos carregamentos não é recomendado otimizar cada carregamento separadamente e considerar a área de maior valor ou a média destas para cada barra (ROZVANY *et. al.*, 2014).

Rozvany and Hill (1978) propuseram a utilização do princípio da superposição para otimização de barras submetidas a dois carregamentos distintos. A ideia é obter as componentes de cada carregamento e otimizá-las separadamente. Feito isso deve-se sobrepor as soluções obtidas.

Logo, o problema de minimização do volume de uma treliça submetida a múltiplos carregamentos pode ser reescrito conforme equação (3.15).

$$\begin{aligned}
 &\text{Obter :} && \mathbf{x} \\
 &\text{que minimiza :} && V(\mathbf{A}(\mathbf{x})) = \mathbf{L}^T \mathbf{A}(\mathbf{x}) \\
 &\text{tal que :} && \mathbf{B}(\mathbf{A}(\mathbf{x}))^T \mathbf{n} = \mathbf{F}_k \\
 &&& -\mathbf{s}_c \leq \mathbf{s}_i \leq \mathbf{s}_t \\
 &&& A_i \geq 0 \qquad i = 1, 2, \dots, N_b
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Sved and Ginos (1968) observaram que para a otimização de uma treliça submetida à restrições de tensão e múltiplos carregamentos, o peso pode ser reduzido se for permitido que alguns membros desapareçam (junto com suas restrições de tensão) e desta forma a solução ótima não pode ser encontrada através de um procedimento iterativo.

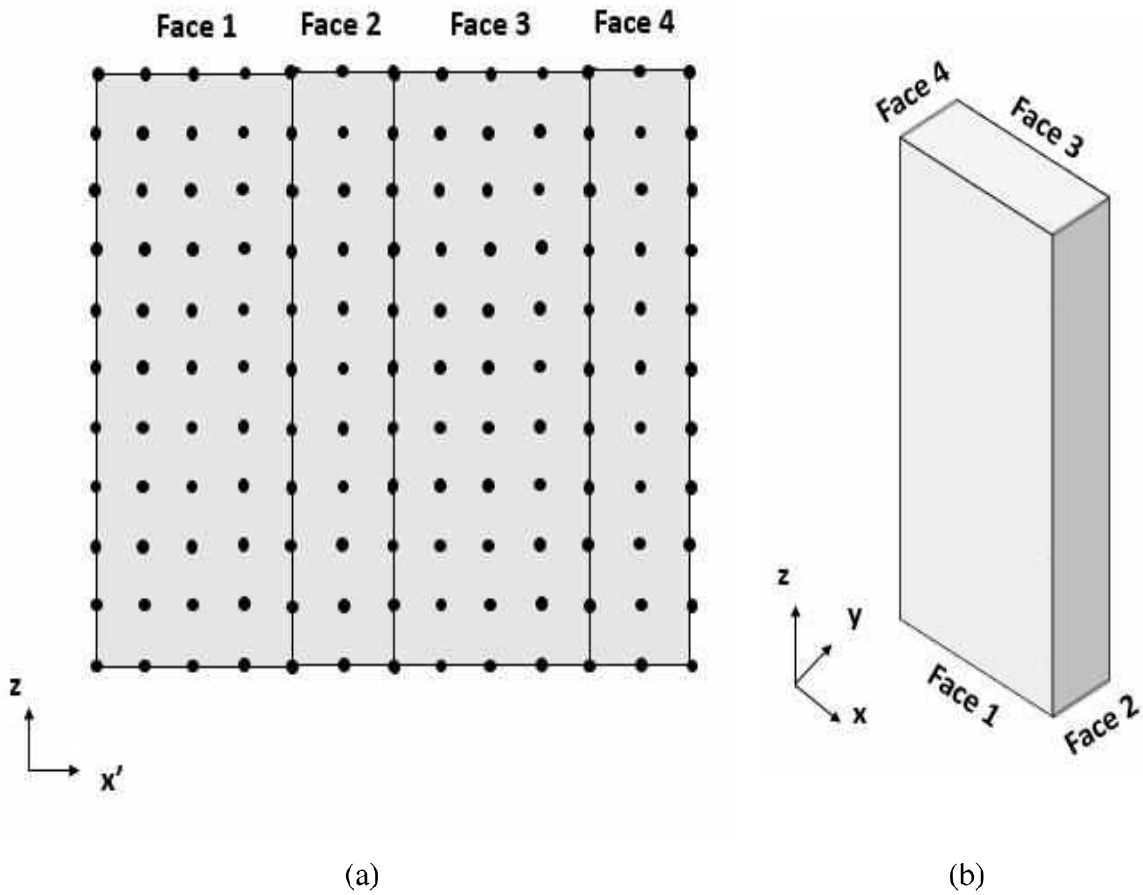
3.4. GERAÇÃO DE MALHAS

Esta seção apresenta a metodologia adotada para a geração das malhas utilizadas para a resolução dos exemplos 3D apresentadas no capítulo 4 deste trabalho.

3.4.1. Edifício tipo caixa

A Figura 3.7(a) mostra a vista em planta da malha adotada para o edifício tipo caixa. Inicialmente cria-se uma malha 2D formada por 4 retângulos que são denominadas faces. A dimensão L_X nas faces 1 e 3 representam o comprimento do edifício na direção X . O comprimento L_Y do edifício na direção Y é representado pelas faces 2 e 4. A altura do edifício caixa é a altura L_Z que está representada na malha 2D. A partir deste retângulo as coordenadas das faces 2, 3 e 4 são rotacionadas de modo que formem a caixa, conforme Figura 3.7(b).

Figura 3.7 – Geração de malha para edifício tipo caixa: (a) Vista em planta malha em 2D; (b) Perspectiva da malha após rotação.



$$Se: \begin{cases} x' \leq Lx & FACE1 \\ Lx \leq x' \leq (Lx + Ly) & FACE2 \\ (Lx + Ly) \leq x' \leq ((2 \times Lx) + Ly) & FACE3 \\ (2 \times Lx + Ly) \leq x' \leq ((2 \times Lx) + (2 \times Ly)) & FACE4 \end{cases} \quad (3.16)$$

Durante a geração da malha foi inserido uma restrição que impede a geração de barras atravessando a linha limite de duas faces. Assim, cria-se uma superfície interna ao edifício caixa, denominada restrição de domínio, onde ao gerar a estrutura base toda barra que ultrapasse esta superfície é eliminada. Com isso, o edifício apresenta apenas uma “casca”, que é utilizada para a obtenção dos sistemas de contraventamento. Os elementos internos, responsáveis por suportar as cargas verticais, não fazem parte do escopo deste trabalho.

3.4.2. Edifício tipo caixa com variação arquitetônica

Um dos edifícios a serem estudados neste trabalho sofre uma rotação de modo que ao atingir o topo os cantos do edifício sofreram uma rotação de 45°. Para isso é gerada uma malha para edifício tipo caixa conforme apresentado na seção 3.4.1. Em seguida define-se o ângulo de rotação que deverá ser aplicado a cada nó para que ao atingir o topo os cantos tenham sofrido a rotação de $\mathbf{q}$ conforme a expressão (3.16).

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{q}}{(N_z - 1)} \frac{z}{h_z} \quad (3.17)$$

Onde,

$\mathbf{q}$ - é a rotação total sofrida pela planta do edifício;

N_z - é o número de nós na direção do eixo Z;

z - é a coordenada do nó; na direção do eixo Z;

h_z - é a projeção de cada elemento no eixo Z.

Os nós localizados na coordenada $Z = 0$ não sofrem rotação. Definido o ângulo α deve-se criar a matriz de rotação $\mathbf{R}$ conforme a expressão (3.17).

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{a} & \text{sen} \mathbf{a} \\ -\text{sen} \mathbf{a} & \cos \mathbf{a} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

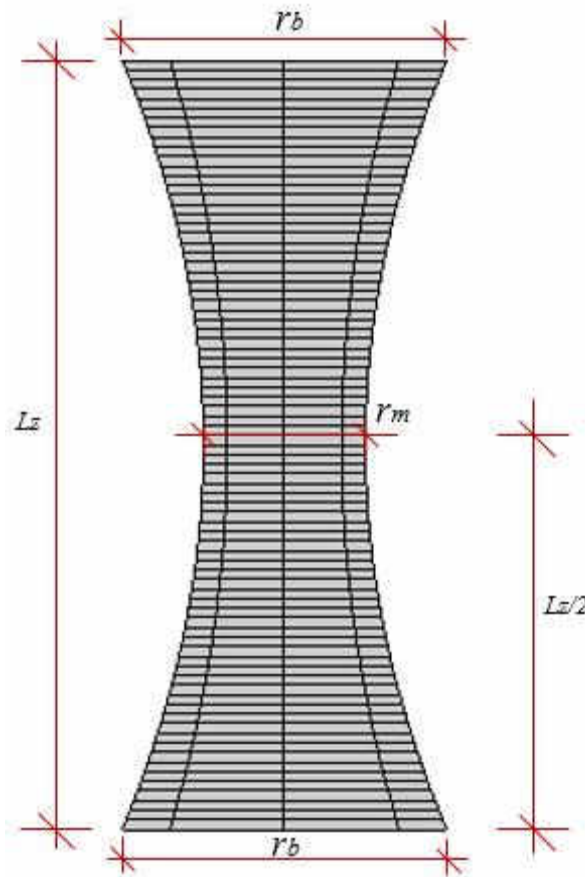
As novas coordenadas, $\bar{x}$ e $\bar{y}$, do nó são obtidas em função das coordenadas antigas, x e y , conforme a expressão (3.18).

$$\begin{Bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{a} & \text{sen} \mathbf{a} \\ -\text{sen} \mathbf{a} & \cos \mathbf{a} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

3.4.3. Edifício com seção circular variável

O edifício estudado apresenta variação da seção transversal sendo que a base e o topo apresentam mesmo raio. Na seção intermediária o raio é metade do raio da base conforme a Figura 3.8.

Figura 3.8 – Edifício com seção circular variável



O raio da seção circular do edifício estudado segue a expressão (3.19).

$$r(z) = \frac{4 * (r_b - r_m)}{L_z^2} * z^2 - \frac{4 * (r_b - r_m)}{L_z} * z + r_b \quad (3.19)$$

Onde,

r_b - raio da base do edifício;

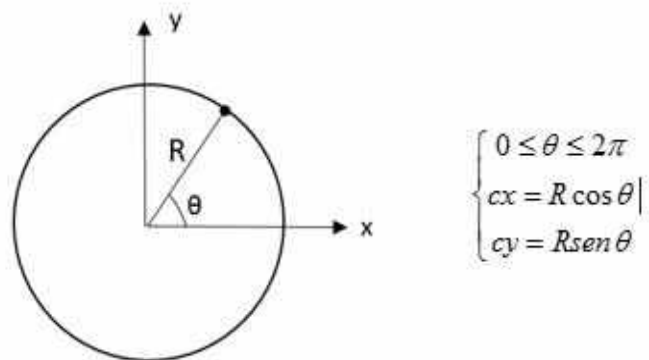
r_m - raio da seção intermediária do edifício;

L_z - altura do edifício;

z - coordenada do nó em relação ao eixo Z .

Definido o raio de seção é possível obter as coordenadas cartesianas com o auxílio do sistema de coordenadas polares, conforme ilustrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Esquema para obtenção das coordenadas cartesianas



CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados exemplos da utilização do método de *ground structure* conforme formulações apresentadas nos capítulos 2 e 3. Para tanto apresentam-se os resultados de 6 (seis) experimentos numéricos.

Primeiramente, o método da densidade e o método de *ground structure* são aplicados a análise bidimensional de um edifício de 35 (trinta e cinco) pavimentos, com o intuito de observar a qualidade dos resultados dos dois métodos nesse tipo particular de aplicação. Em seguida o método de *ground structure* é aplicado para obter o sistema de contraventamento de edifícios em formato de caixa, com variações desse formato, e com planta circular. Por fim, apresentam-se propostas de sistema de contraventamento para dois casos reais: a Lotte Tower e o One World Trade Center.

Para a obtenção dos resultados do método de *ground structure* partiu-se dos programas computacionais GRAND e GRAND3, ambos em matlab elaborados por Zégard & Paulino (2013;2014). Os exemplos a serem estudados foram inseridos no código, acrescentando também as condições de manufatura apresentadas no capítulo anterior, tornando o código específico para o desenvolvimento do sistema de contraventamento de edifícios.

4.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE DENSIDADE E *GROUND STRUCTURE*

O objetivo deste experimento é verificar a aplicabilidade dos métodos de densidade e de *ground structure* a projeto de edifícios. Para tanto, foram estudados dois casos: um edifício com 35 andares e altura de 105 m e um edifício com 100 andares e altura de 300 m. O primeiro caso foi estudado por Torres (2014) e o segundo por Pinho (2015), ambos aplicando o método de densidade.

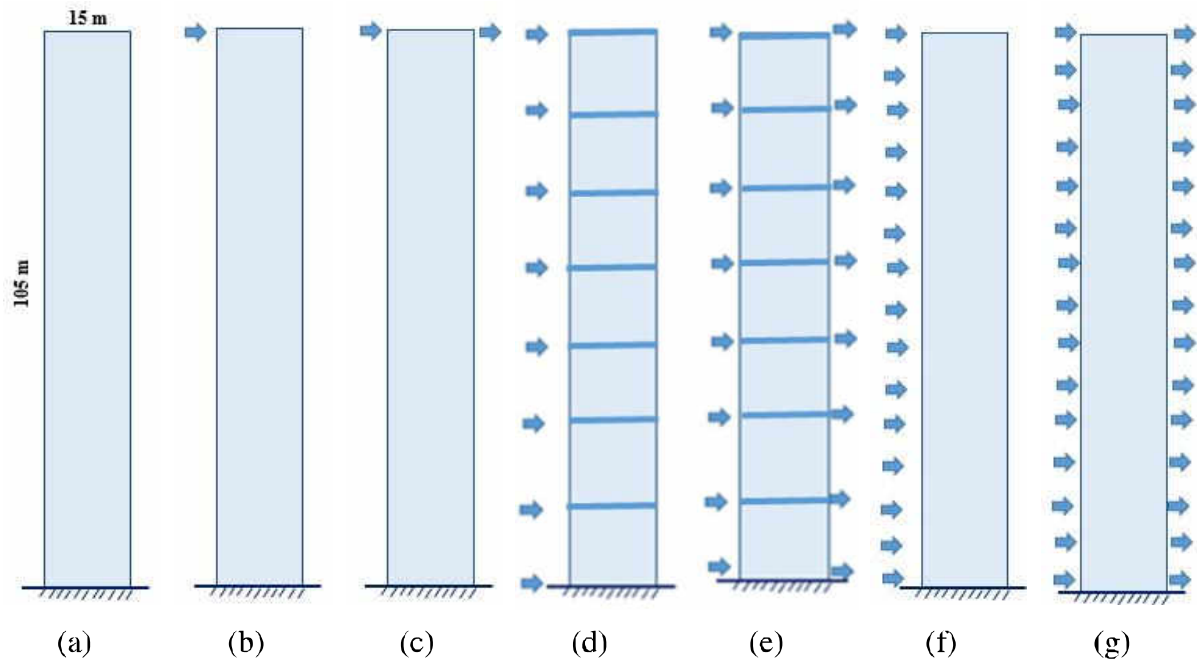
4.1.1. Edifício com 35 andares

Nesta seção analisa-se a viabilidade de utilização de técnicas de otimização de topologia para obtenção do sistema de contraventamento de um edifício com 35 andares e dimensões 15 m x 105 m. Pretende-se comparar as soluções obtidas utilizando o método de *ground structure* com as obtidas por Torres (2014) utilizando uma das variações do método de densidade.

Foram analisadas 3 (três) formas de aplicação de cargas horizontais, escolhidas de modo a simular a aplicação do carregamento de vento em um edifício. O primeiro caso de carregamento (caso A) consiste em aplicar um carregamento unitário no topo do edifício, conforme apresentado na Figura 4.1(b). Essa não é a forma de aplicação de carregamento utilizada na prática de projeto, mas é a aplicação de carga mais comumente encontrada na literatura referente à otimização de topologia. O segundo caso de carregamento (B) apresentado na Figura 4.1(d) simula a aplicação de cargas aplicadas em nós espaçados na direção do eixo Y, sendo aplicado apenas nos pontos onde se conectam as lajes da edificação que funcionam como diafragma. Por fim, apresenta-se o caso de carregamento C onde aplica-se cargas em todos os nós da estrutura no sentido na direção do eixo Y simulando carga distribuída uniformemente.

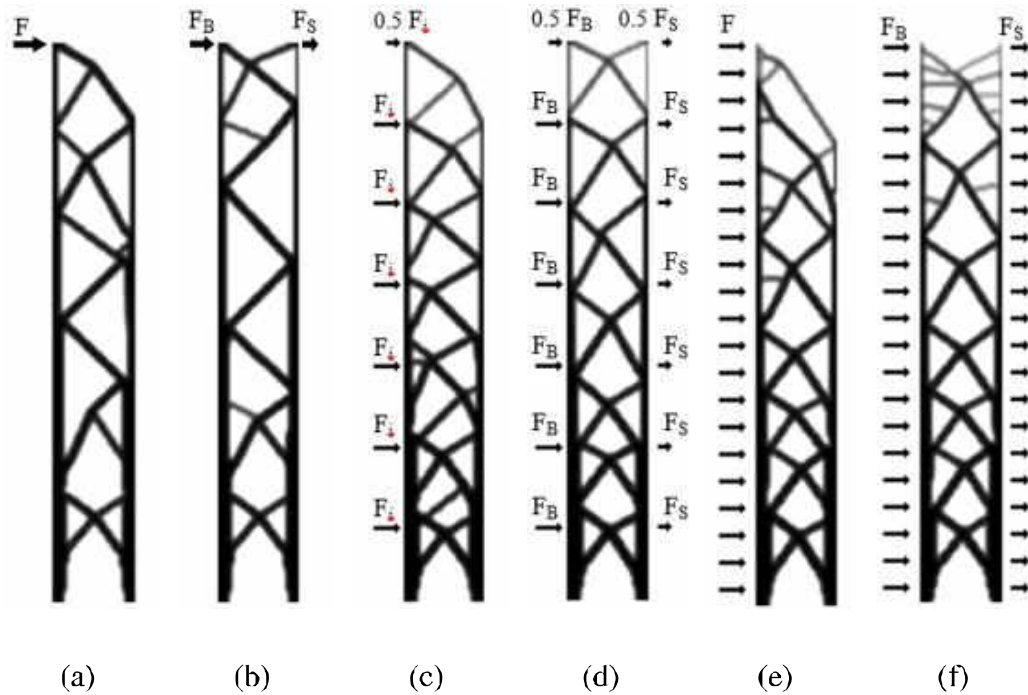
O vento normalmente gera uma sobrepressão na face de sotavento e uma sucção na face de barlavento, a última de menor intensidade que a primeira. Assim, para cada um dos casos de carregamento (A, B e C) é estudado um segundo posicionamento para a carga, representando a situação sobrepressão – sucção de forma correspondente.

Figura 4.1 – Dados do edifício de 35 andares: (a) Geometria; (b) Posicionamento de cargas 1 – caso A; (c) Posicionamento de cargas 2 – caso A; (d) Posicionamento de cargas 1 – caso B; (e) Posicionamento de cargas 2 – caso B; (f) Posicionamento de cargas 1 – caso C; (g) Posicionamento de cargas 2 – caso C.



Aplicou-se o método de densidade com ABE ao exemplo em estudo, discretizando o domínio estendido com uma malha de 30×210 elementos Q4. Admitiu-se fração de volume $f = 30\%$ do domínio estendido, raio de regularização $r_{min} = 2$ un e coeficiente de penalização $p = 3$. A Figura 4.2 apresenta as soluções encontradas.

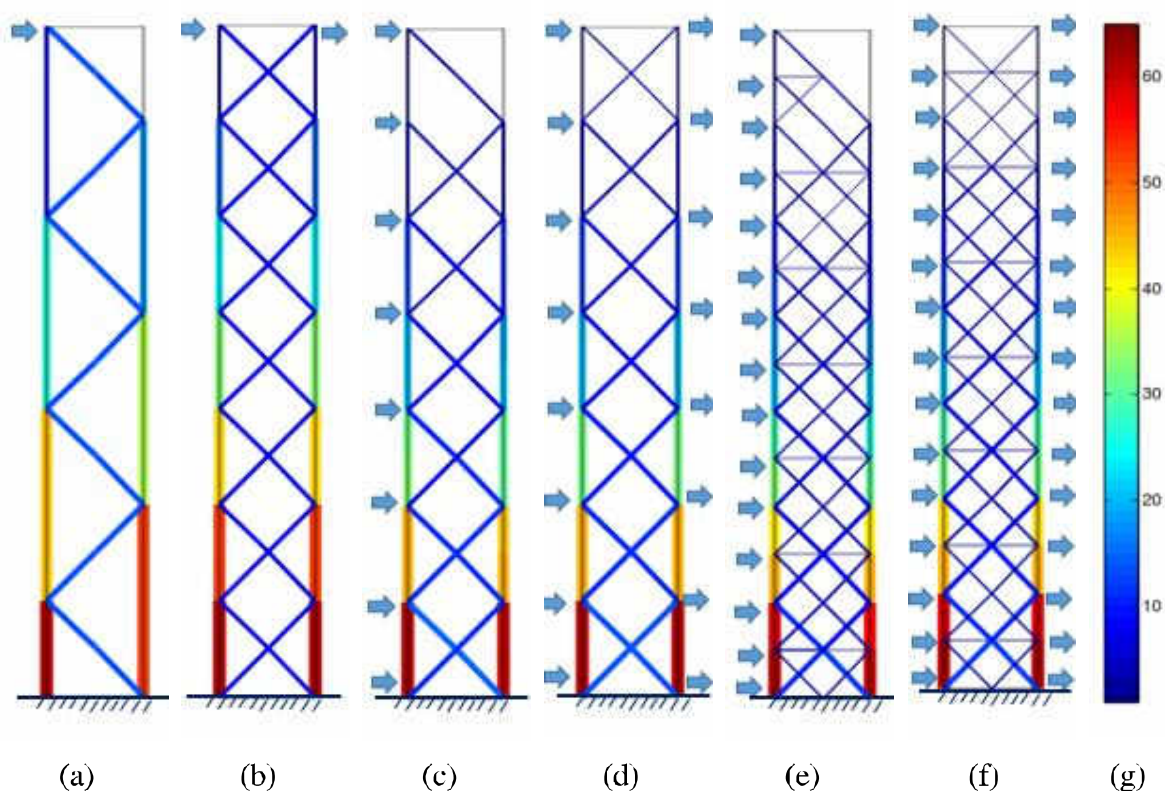
Figura 4.2 – Soluções obtidas para o edifício de 35 andares pelo método de densidade: (a) Posicionamento de cargas 1 – caso A; (b) Posicionamento de cargas 2 – caso A; (c) Posicionamento de cargas 1 – caso B; (d) Posicionamento de cargas 2 – caso B; (e) Posicionamento de cargas 1 – caso C; (f) Posicionamento de cargas 2 – caso C.



Os resultados da Figura 4.2 mostram que o método de densidade gera um acúmulo de material nas regiões inferiores do domínio estendido. Esse resultado, embora coerente do ponto de vista mecânico, não é desejável do ponto de vista do partido arquitetônico. Percebe-se também que as soluções com maior número de pontos de aplicação de carga ao longo da altura do edifício apresentam regiões mal definidas no topo. Novamente o resultado é coerente, uma vez que a quantidade de material é mantida constante. No entanto, essa solução não é viável na prática. Por fim, observa-se que a modelagem do carregamento com as cargas de sobrepressão e de sucção conduziram, como esperado, à disposição de material nas duas faces (sotavento e barlavento).

Para aplicação do método de *ground structure* a estrutura base foi gerada a partir de uma malha de 3×15 nós e nível de conectividade 1. Foram adotados os seguintes valores para os parâmetros do método: tolerância de colinearidade $ColTol = 0,999999$; valor de corte para plotagem da barra $Cutoff = 0.002$, tensão limite média $\sigma_0 = 1,0$, número de grupos de plotagem $N_g = 50$.

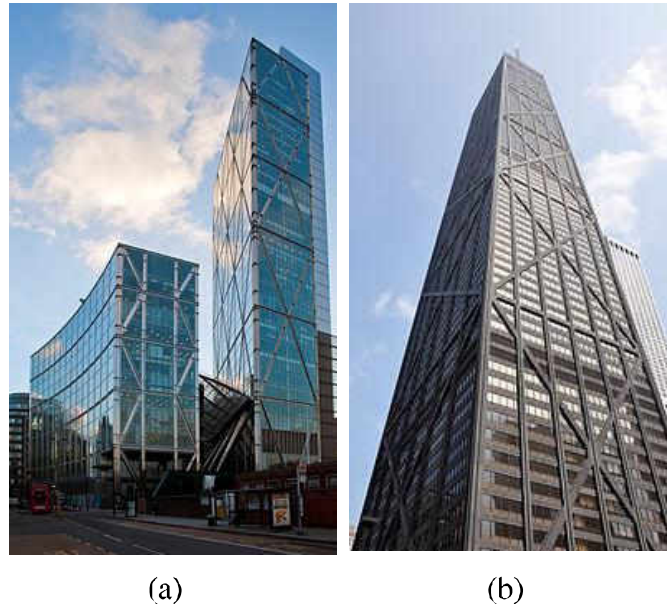
Figura 4.3 – Soluções obtidas para o edifício de 35 andares pelo método da *ground structure*: (a) Posicionamento de cargas 1 – caso A; (b) Posicionamento de cargas 2 – caso A; (c) Posicionamento de cargas 1 – caso B; (d) Posicionamento de cargas 2 – caso B; (e) Posicionamento de cargas 1 – caso C; (f) Posicionamento de cargas 2 – caso C; (g) Escala de cores para a área da seção transversal.



A Figura 4.3 evidencia que as soluções obtidas com o método de *ground structure* são mais bem definidas com elementos dispostos ao longo de todo o domínio. Embora as dimensões dos elementos na base do edifício sejam consideravelmente menores, não há prejuízo do partido arquitetônico, apresentando uma maior aplicabilidade prática. O aumento dos pontos de aplicação de carga levou a um aumento no número de elementos, pois a presença de carga em um nó torna desfavorável a eliminação, pelo algoritmo de otimização, das barras a ele conectadas. Por fim, verifica-se que, de forma semelhante ao ocorrido com as soluções do método de densidade, a modelagem do carregamento com as cargas de sobrepressão e de sucção conduziram, como esperado, à disposição de elementos nas duas faces (sotavento e barlavento).

As soluções obtidas com o método de *ground structure* guardam grande semelhança com soluções comumente adotadas pelos projetistas, como mostra a Figura 4.4.

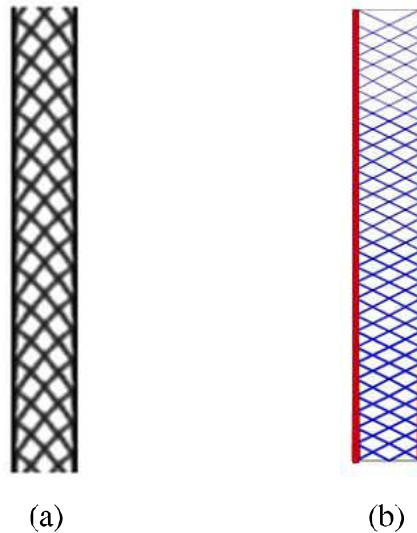
Figura 4.4 – Exemplos de sistemas de contraventamento aparente: (a) 201 Bishopsgate e Broadgate Tower, em Londres, RU (http://en.wikipedia.org/wiki/Broadgate_Tower); (b) John Hancock Center, em Chicago, EUA (http://en.wikipedia.org/wiki/John_Hancock_Center).



A Figura 4.5 apresenta os resultados obtidos impondo-se simetria em relação ao eixo vertical Y e repetição de padrão ao longo desse eixo para o carregamento da Figura 4.1(f). Para obtenção desses resultados, adotou-se o tamanho do padrão $b = 15$ m., conforme a equação (3.2).

Percebe-se, quando se aplicam cargas em muitos pontos ao longo do eixo vertical, o método de densidade e *ground structure* convergem para soluções finais semelhantes. No entanto, o método de densidade apresenta uma distribuição de material com elementos ligeiramente curvos, lembrando as soluções de Michell. Também esse resultado é consistente do ponto de vista mecânico.

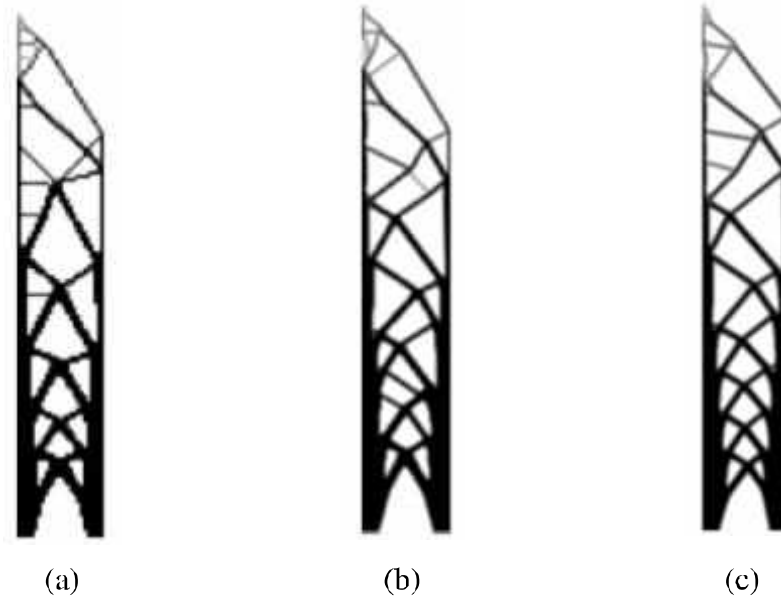
Figura 4.5 – Soluções obtidas para o edifício de 35 andares com imposição de simetria em relação ao eixo Y e repetição de padrão ao longo do eixo Y : (a) Solução obtida com o método de densidade; (b) Solução obtida com o método de *ground structure*.



4.1.2. Edifício com 100 andares

A concentração de material na base aumenta à medida que a altura do edifício aumenta e este problema pode mesmo inviabilizar o uso do método de densidade para definição da estrutura de contraventamento. Para demonstrar este ponto, analisa-se o edifício de 100 andares de dimensões 50 m x 300 m estudado por Pinho (2015) com aplicação do método de densidade. Todas as análises foram feitas considerando um carregamento unitário no topo do edifício, como o da Figura 4.1(a). Admitiu-se fração de volume $f = 30\%$ do domínio estendido e coeficiente de penalização $p = 3$. Foram analisadas 3 (três) configurações de malha: 25 x 150 elementos, com $r_{min} = 2$ elementos; 50 x 300 elementos, com $r_{min} = 4$ elementos; e 100 x 600 elementos, com $r_{min} = 8$ elementos. Ao aumentar a discretização da malha, diminui-se as dimensões do elemento, sendo que foi necessário alterar o raio mínimo a ser utilizado na técnica de projeção a fim de manter a área de projeção a mesma para os 3 exemplos. Os resultados são apresentados na Figura 4.6.

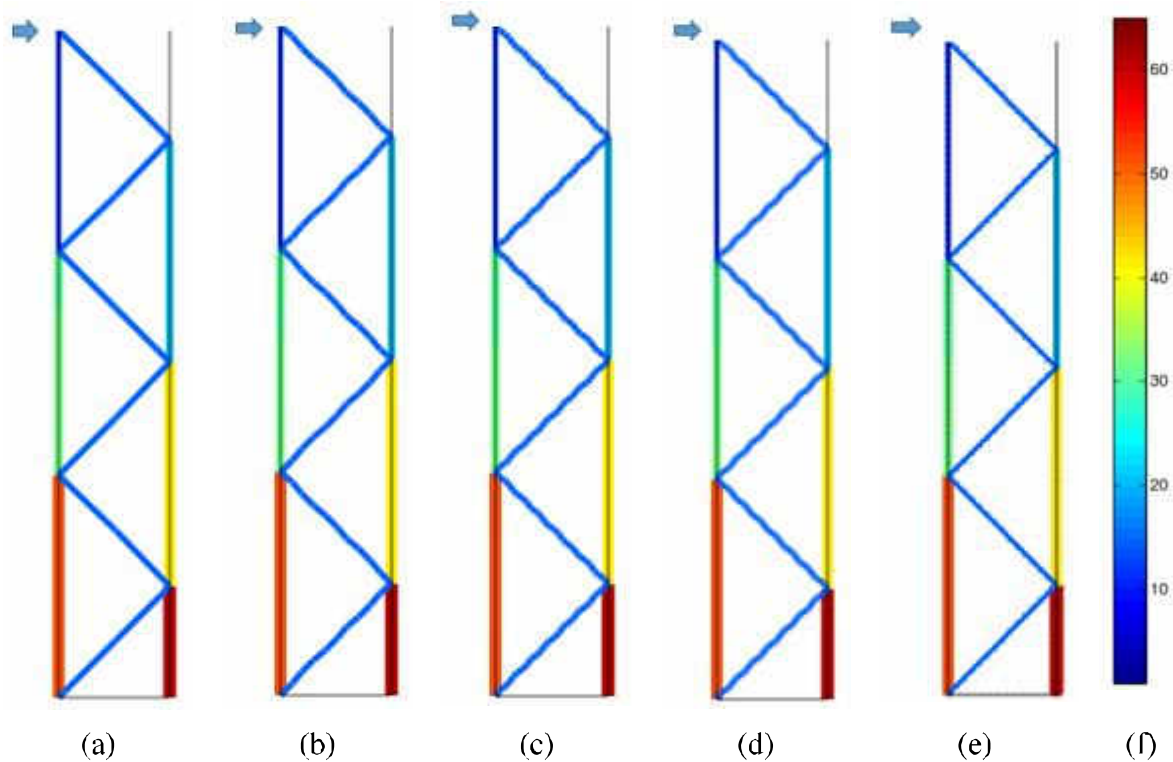
Figura 4.6 – Soluções obtidas para o edifício de 100 andares pelo método de densidade: (a) 25 x 150 elementos, com $r_{min} = 2$ elementos; (b) 50 x 300 elementos, com $r_{min} = 4$ elementos; (c) 100 x 600 elementos, com $r_{min} = 8$ elementos.



Percebe-se que o problema de acúmulo de material na base da estrutura e a formação de regiões cinzas no topo aumenta com o aumento da altura do edifício. Conforme esperado, a maior discretização do domínio estendido não altera substancialmente essa concentração. A maior concentração de material gera ainda um problema na definição dos nós da estrutura, aumentando a dificuldade de transformação da solução em uma estrutura viável para as etapas posteriores de projeto.

Para aplicação do método de *ground structure* a estrutura base foi gerada a partir de 5 (cinco) tipos de malha: 3 x 13 nós; 11 x 61 nós; 26 x 151 nós; 51 x 301 nós; e 101 x 601 nós. Em todos os casos adotou-se nível de conectividade 1 e os seguintes valores para os parâmetros do método: tolerância de colinearidade $ColTol = 0,999999$; valor de corte para plotagem da barra $Cutoff = 0.002$, tensão limite média $\sigma_0 = 1,0$, número de grupos de plotagem $N_g = 50$. Os resultados são apresentados na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Soluções obtidas para o edifício de 100 andares pelo método de *ground structure*: (a) 3 x 13 nós; (b) 11 x 61 nós; (c) 26 x 151 nós; (d) 51 x 301 nós; (e) 101 x 601 nós; (f) Escala de cores para a área da seção transversal.



Novamente o método de *ground structure* conduz a uma distribuição de material homogênea ao longo do edifício, sem formação de regiões indefinidas e com menor concentração de material na base.

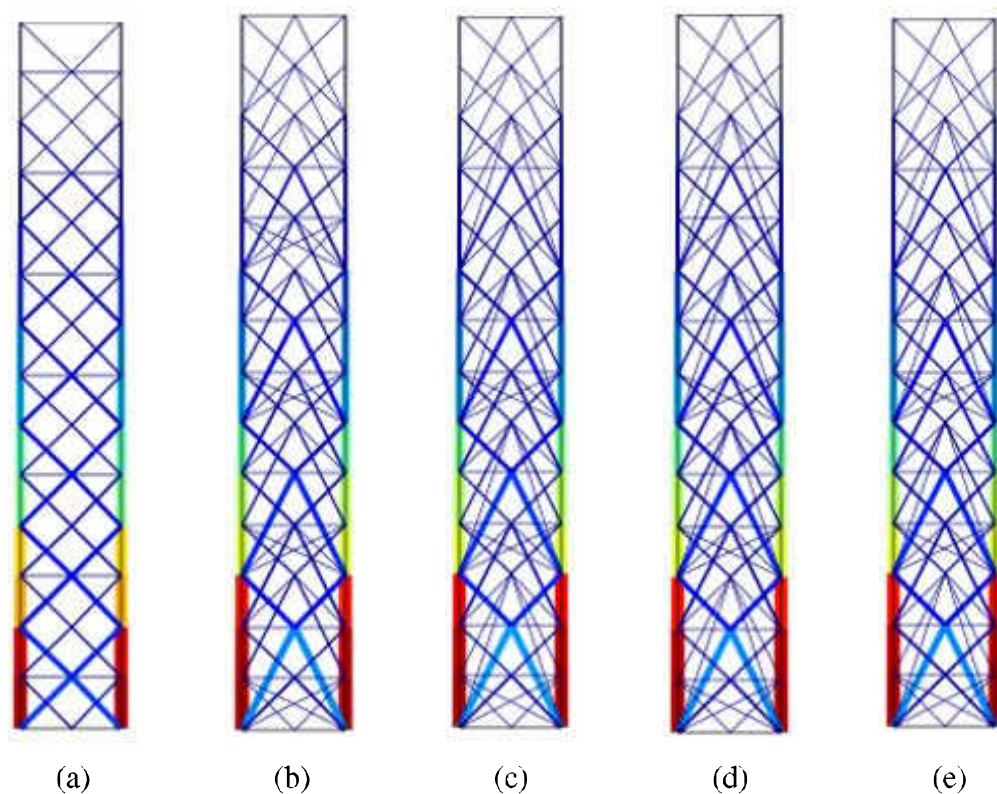
Observa-se que o refinamento da malha para o caso apresentado leva a soluções qualitativamente iguais, podendo ser utilizadas malhas muito mais esparsas que no método de densidade. Como malhas menos refinadas geram uma economia de tempo de processamento, o método de *ground structure* apresenta-se uma alternativa viável quando aplicado a projeto de edifícios em detrimento do método de densidade.

4.1.3. Variações de soluções para o edifício com 35 andares pelo método de *ground structure*

A seguir apresentam-se resultados de experimentos nos quais se avalia a influência do nível de conectividade da estrutura base na topologia resultante. Para tanto são avaliadas soluções para o

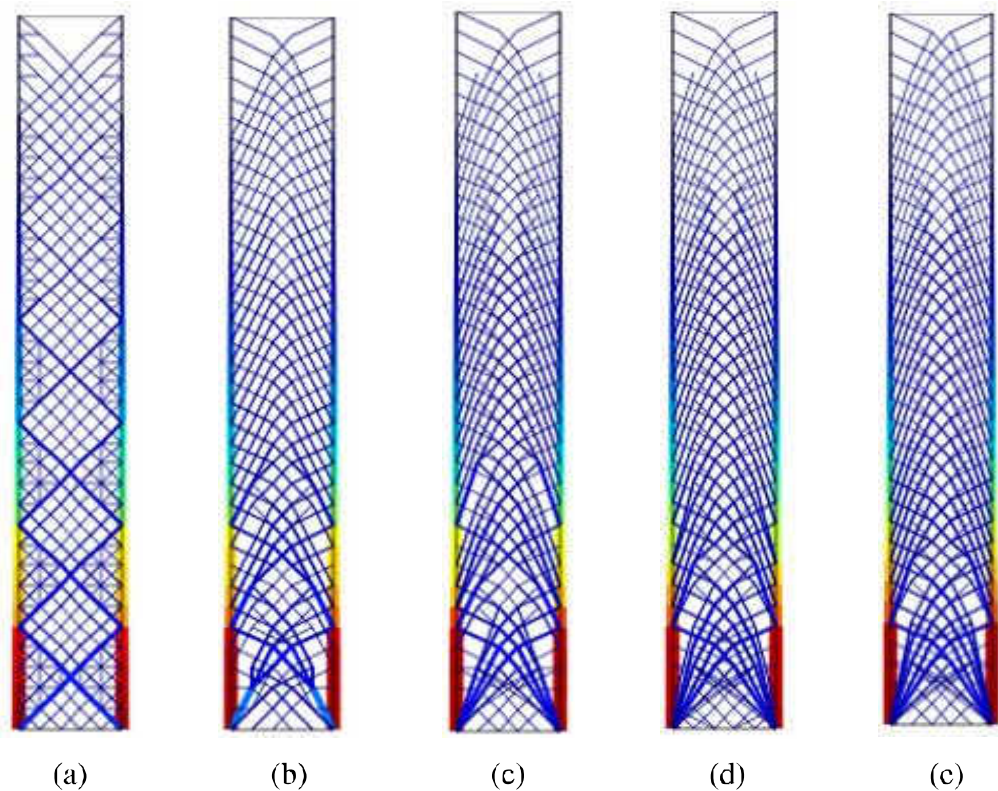
edifício de 35 andares, dimensões 15 m x 105 m e malhas com 3 x 15, 16 x 36 e 16 x 106 nós, com níveis de conectividade 1, 4 e 10 e carregamento como na Figura 4.1(g). Os demais parâmetros são os mesmos das análises anteriores.

Figura 4.8 – Soluções obtidas para o edifício de 35 andares pelo método de *ground structure* com malha de 3 x 15 nós variando o nível de conectividade: (a) Nível de conectividade 1; (b) Nível de conectividade 2; (c) Nível de conectividade 3; (d) Nível de conectividade 4; (e) Nível de conectividade 10.



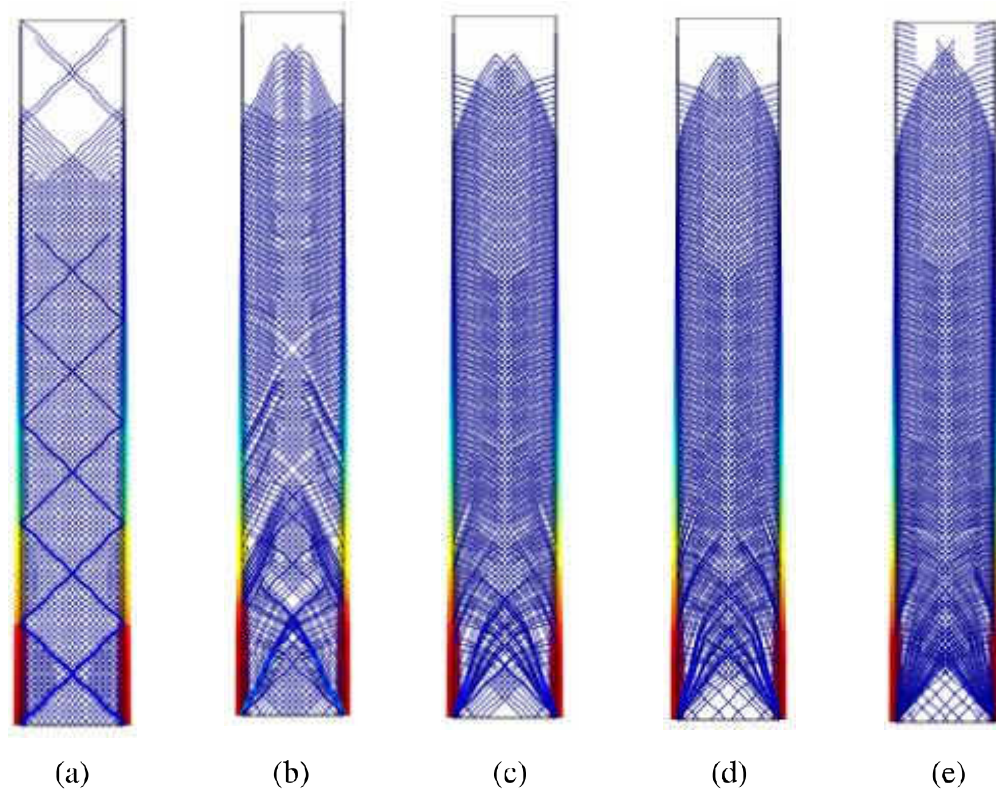
O aumento do nível de conectividade da estrutura base de 1 para 2 altera a configuração do sistema estrutural. Isso abre espaço para a adoção de sistemas estruturais em consonância com partido arquitetônico e vice-versa, tornando-se um elemento de identidade visual do edifício. Observa-se ainda que a topologia resultante não se altera para níveis de conectividade superiores a 2. Isso se dá devido à geometria do edifício em análise, retangular com uma base pequena em relação à altura. A solução é aparentemente simétrica devido ao carregamento simétrico.

Figura 4.9 – Soluções obtidas para o edifício de 35 andares pelo método de *ground structure* com malha de 16 x 36 nós variando o nível de conectividade: (a) Nível de conectividade 1; (b) Nível de conectividade 2; (c) Nível de conectividade 3; (d) Nível de conectividade 4; (e) Nível de conectividade 10.



O refinamento da malha altera a solução estrutural devido ao aumento de pontos de aplicação da carga. Da mesma forma que no caso anterior, o aumento do nível de conectividade da estrutura base de 1 para 2 altera a configuração do sistema estrutural. Mas a topologia resultante não se altera para níveis de conectividade superiores a 2. As topologias resultantes lembram as soluções de Michell.

Figura 4.10 – Soluções obtidas para o edifício de 35 andares pelo método de *ground structure* com malha de 16×106 nós variando o nível de conectividade: (a) Nível de conectividade 1; (b) Nível de conectividade 2; (c) Nível de conectividade 3; (d) Nível de conectividade 4; (e) Nível de conectividade 10.



Novamente, o refinamento da malha altera a solução estrutural devido ao aumento de pontos de aplicação da carga que impede a retirada de barras do sistema estrutural, gerando uma trama de elementos poucos espessos. Tal solução apresenta-se pouco viável em termos práticos devido ao grande número de elementos finos a serem construídos. As topologias resultantes lembram as soluções de Michell. Da mesma forma que nos casos anteriores, o aumento do nível de conectividade da estrutura base de 1 para 2 altera substancialmente a configuração do sistema estrutural, mas há pouca alteração na topologia resultante para níveis de conectividade superiores a 2, devido a convergência do problema de otimização.

4.2. EDIFÍCIO TIPO CAIXA

Esta seção apresenta a aplicação do método de *ground structure* para uma estrutura tridimensional em formato de caixa. O sistema de contraventamento estará na periferia do

edifício e as análises serão feitas considerando apenas as cargas devidas ao vento. Admite-se que sistemas no interior do edifício serão responsáveis por suportar as cargas verticais. Analisa-se um edifício com dimensões de 20 m x 10 m x 84 m, discretizado em uma malha de 5x3x29 nós com nível de conectividade 1. Em todas as análises desta seção adotou-se tolerância de colinearidade $ColTol = 0,999999$, valor de corte para plotagem da barra $Cutoff = 0.005$, tensão limite média $\sigma_0 = 1,0$, número de grupos de plotagem $N_g = 50$.

4.2.1. Soluções obtidas com aplicação de cargas de vento separadamente

Para modelar as cargas devidas ao vento, foram consideradas duas direções preferenciais de incidência, X e Y do sistema de eixos apresentado na Figura 4.11(a), e cargas de sobrepressão e sucção nas fachadas de sotavento e barlavento de cada caso. A pressão na fachada de sotavento foi modelada como uma carga unitária em cada nó da fachada e na fachada de barlavento como uma carga igual a 0,3 em cada nó da fachada. A Figura 4.11 apresenta os carregamentos aplicados no primeiro experimento com o edifício tipo caixa e as Figuras 4.12 e 4.13 apresentam as soluções obtidas para o carregamento nas direções X e Y, respectivamente.

Figura 4.11 – Dados da análise do edifício em forma de caixa: (a) Sistema de eixos e geometria do edifício; (b) Cargas para vento incidindo na direção do eixo X; (c) Cargas para vento incidindo na direção do eixo Y.

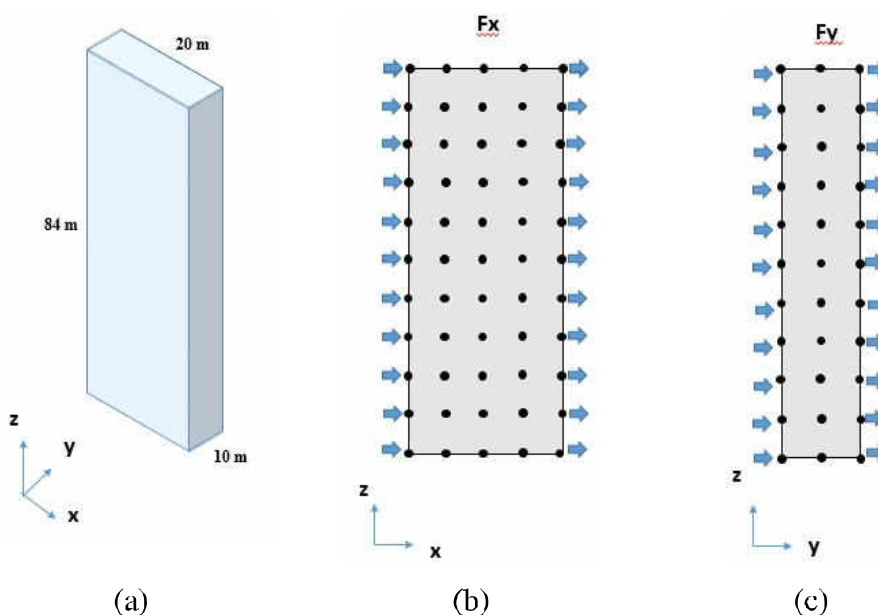


Figura 4.12 – Solução obtida no primeiro experimento para o edifício tipo caixa para vento na direção X utilizando o método de *ground structure*: (a) Perspectiva; (b) Vista lateral no plano X - Z ; (c) Vista lateral no plano Y - Z ; (d) Vista em planta no plano X - Y .

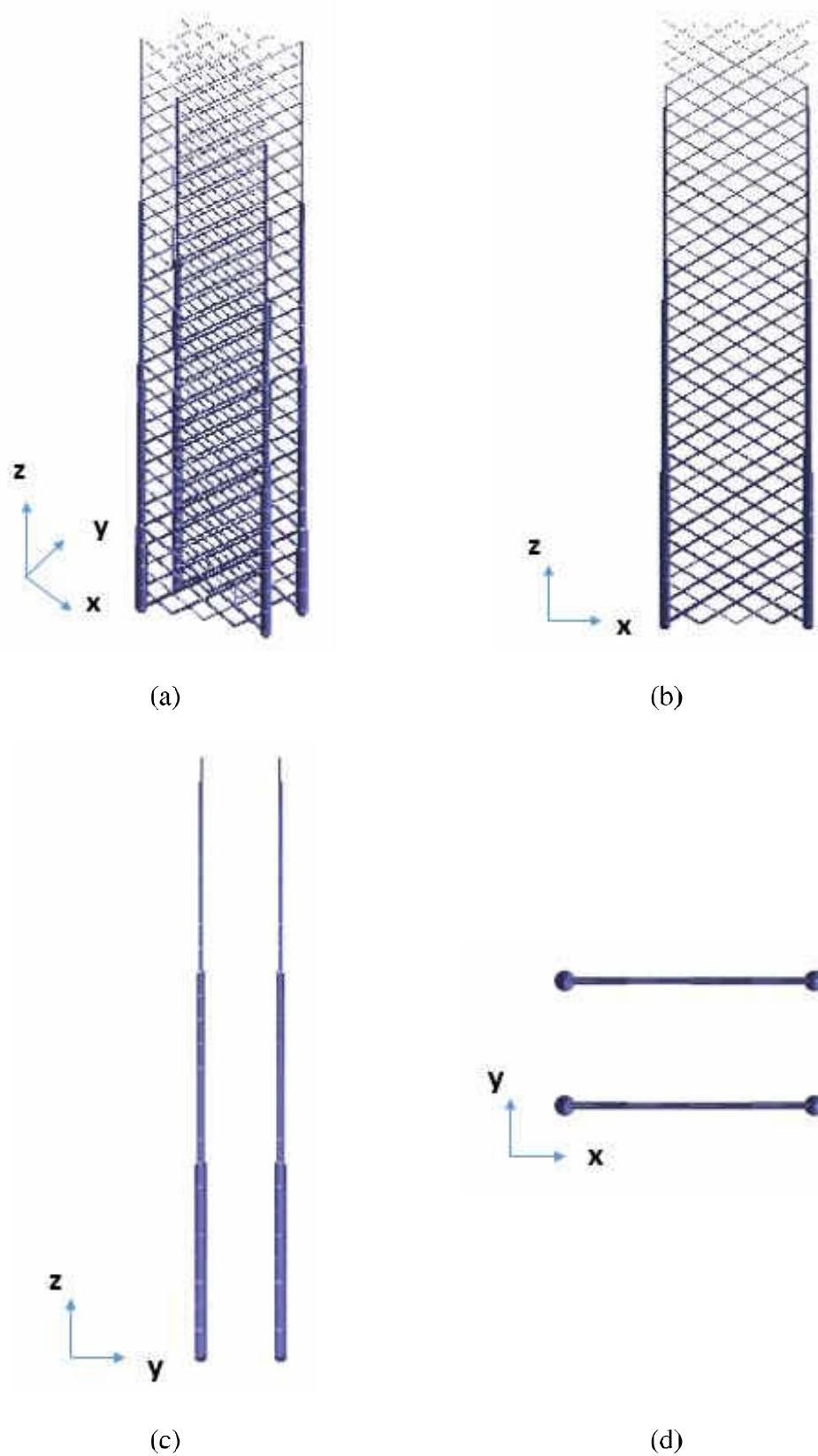
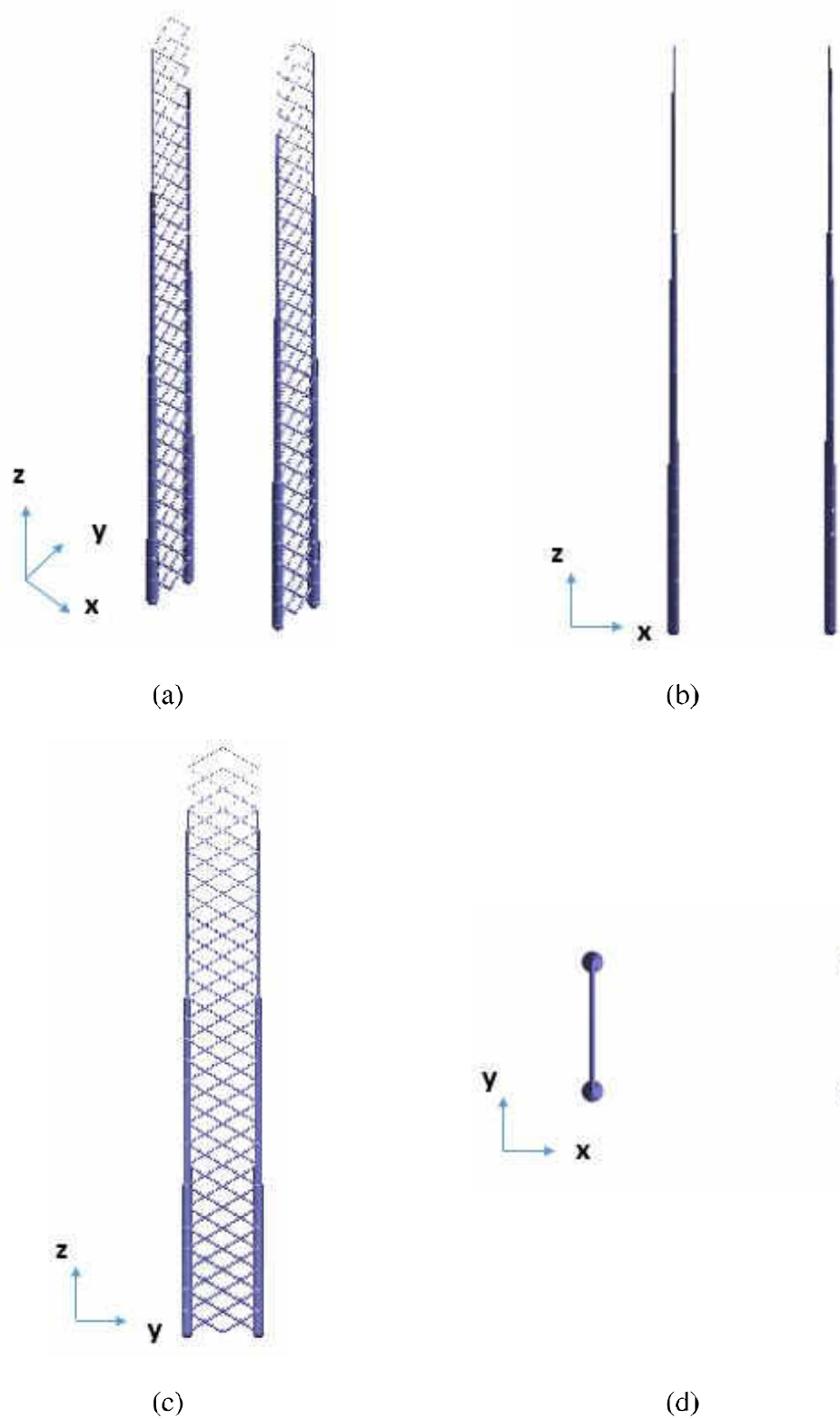


Figura 4.13 – Solução obtida no primeiro experimento para o edifício tipo caixa para vento na direção Y utilizando o método de *ground structure*: (a) Perspectiva; (b) Vista lateral no plano X - Z ; (c) Vista lateral no plano Y - Z ; (d) Vista em planta no plano X - Y .



As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam as soluções para os mesmos carregamentos com imposição de simetria em relação ao plano $Y-Z$ e repetição de padrão ao longo do eixo Z . Para obtenção desses resultados, adotou-se o tamanho do padrão $b = 15$ m (5 pavimentos), conforme a equação (3.8).

Figura 4.14 – Solução para o edifício tipo caixa para vento na direção X utilizando o método de *ground structure* com imposição de simetria e repetição de padrão: (a) Perspectiva; (b) Vista lateral no plano $X-Z$; (c) Vista lateral no plano $Y-Z$; (d) Vista em planta no plano $X-Y$.

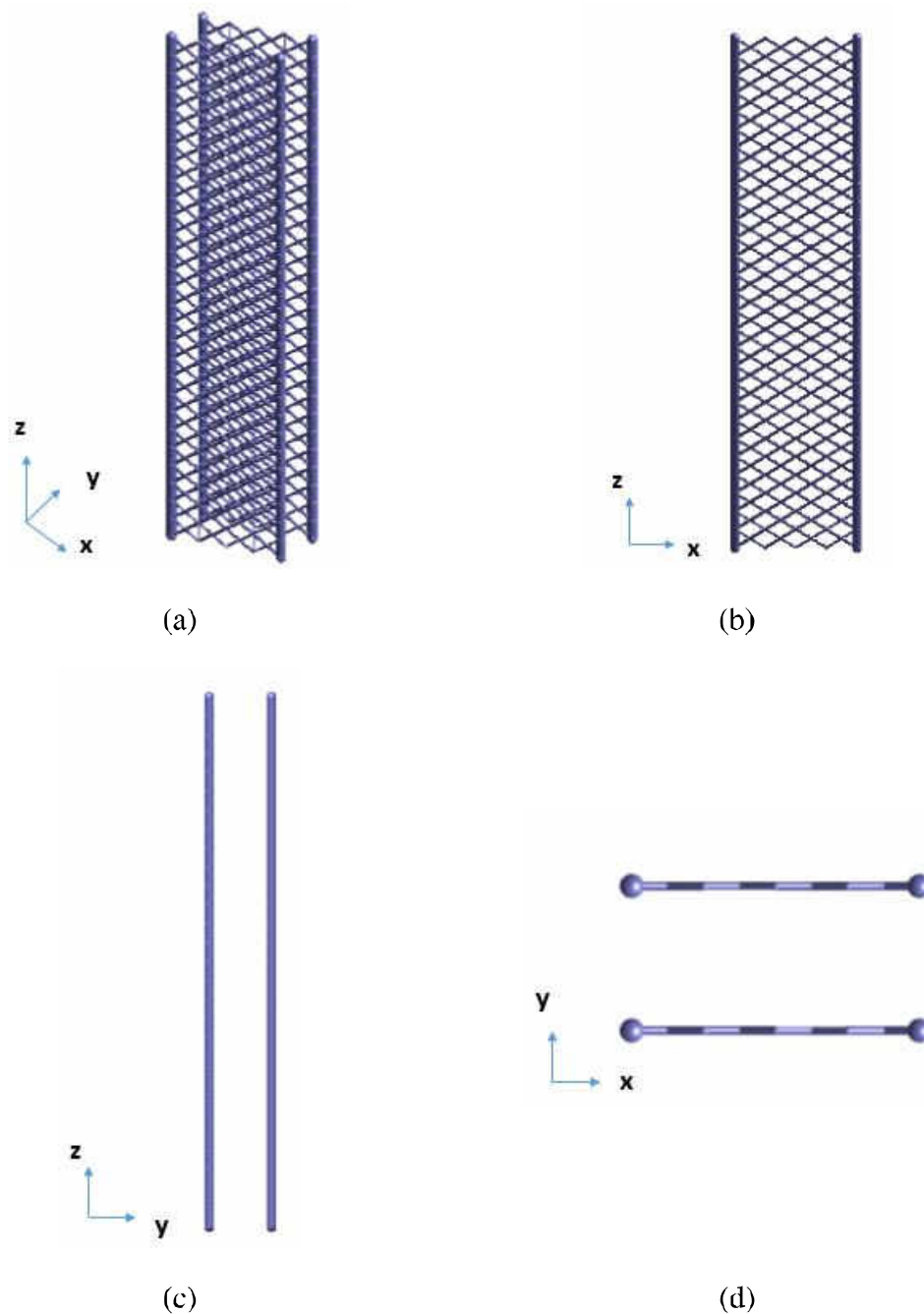
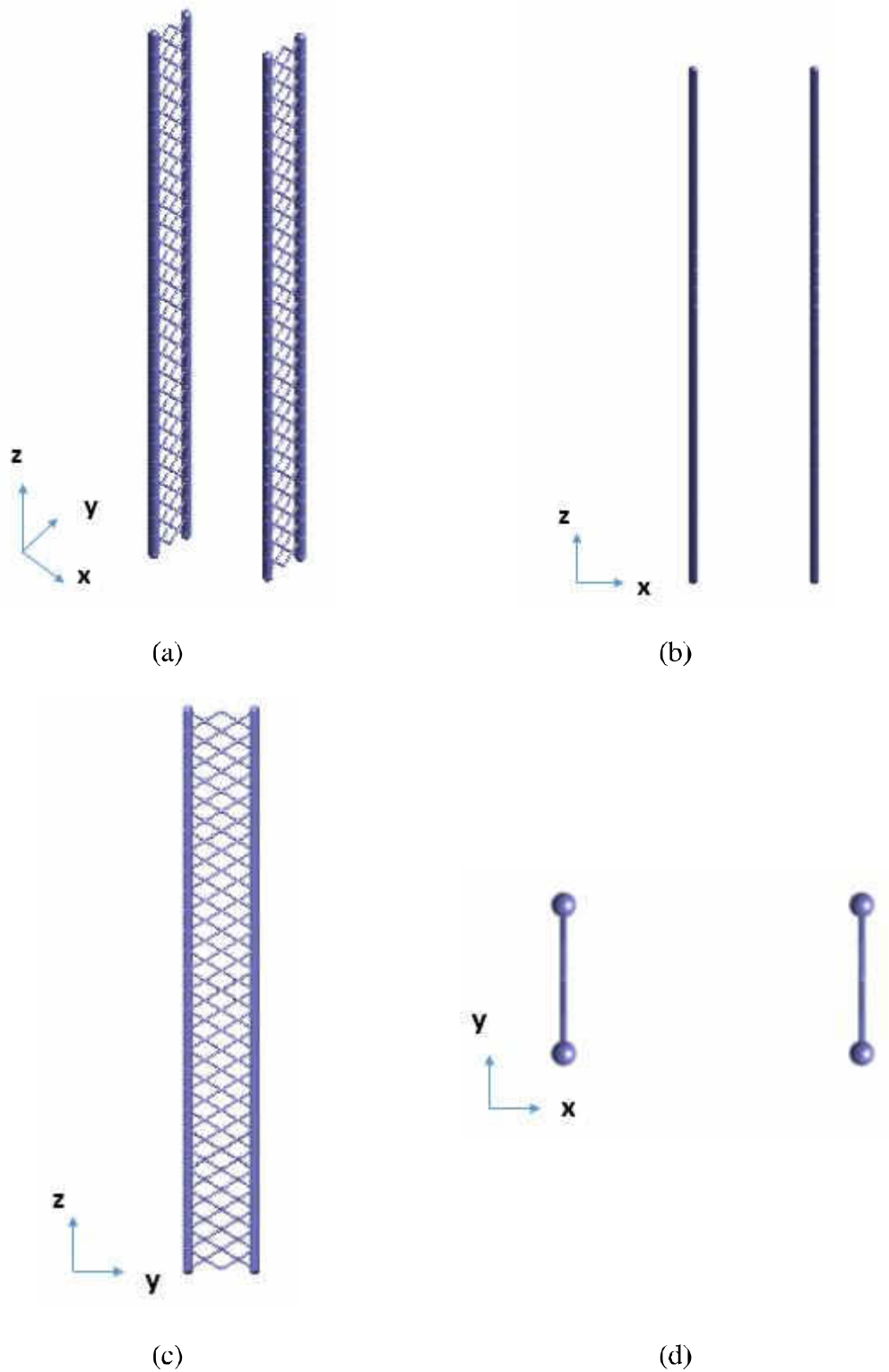
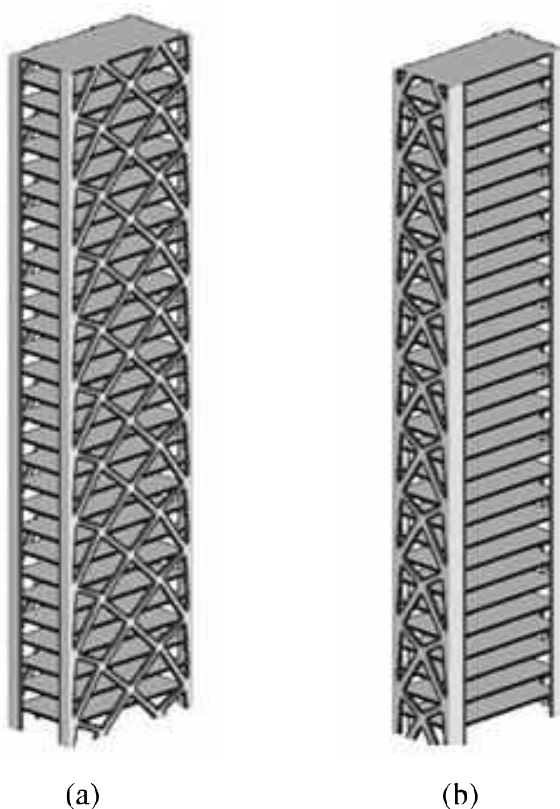


Figura 4.15 – Solução para o edifício tipo caixa para vento na direção Y utilizando o método de *ground structure* com imposição de simetria e repetição de padrão: (a) Perspectiva; (b) Vista lateral no plano X - Z ; (c) Vista lateral no plano Y - Z ; (d) Vista em planta no plano X - Y .



Torres (2014) analisou o mesmo edifício submetido às mesmas condições de carregamento através do método de densidade. A malha de elementos finitos foi formada por $50 \times 25 \times 210$ elementos e utilizou-se a projeção direta com função peso quadrática, raio de regularização $r_{min} = 1,7$ elementos e fração de volume $f = 30\%$. Os resultados podem ser observados na Figura 4.15.

Figura 4.16 Soluções para o edifício tipo caixa utilizando o método de densidade: (a) Vento na direção X; (b) Vento na direção Y. [Fonte: TORRES, 2014]



Os resultados obtidos utilizando o método de *ground structure* reproduzem qualitativamente os obtidos por Torres (2014) utilizando o método de densidade. Observa-se que há formação de estruturas bidimensionais na direção do carregamento, não existindo conexão entre elas. A formação de pórticos isolados deixa clara a necessidade de buscar modelar melhor a carga devida ao vento.

A norma brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988) prevê nos edifícios tipo caixa a existência de uma pressão de sucção nas fachadas que se encontram na direção de incidência do vento, além das já mencionadas pressões de sobrepressão e sucção nas fachadas perpendiculares à direção do vento. A Figura 4.17 apresenta os carregamentos aplicados no segundo experimento com o edifício tipo

caixa e as Figuras 4.18 e 4.19 apresentam as soluções obtidas para o carregamento nas direções X e Y , respectivamente.

Figura 4.17 Dados da análise do edifício em forma de caixa: (a) Sistema de eixos e geometria do edifício; (b) Cargas para vento incidindo na direção do eixo X ; (c) Cargas para vento incidindo na direção do eixo Y .

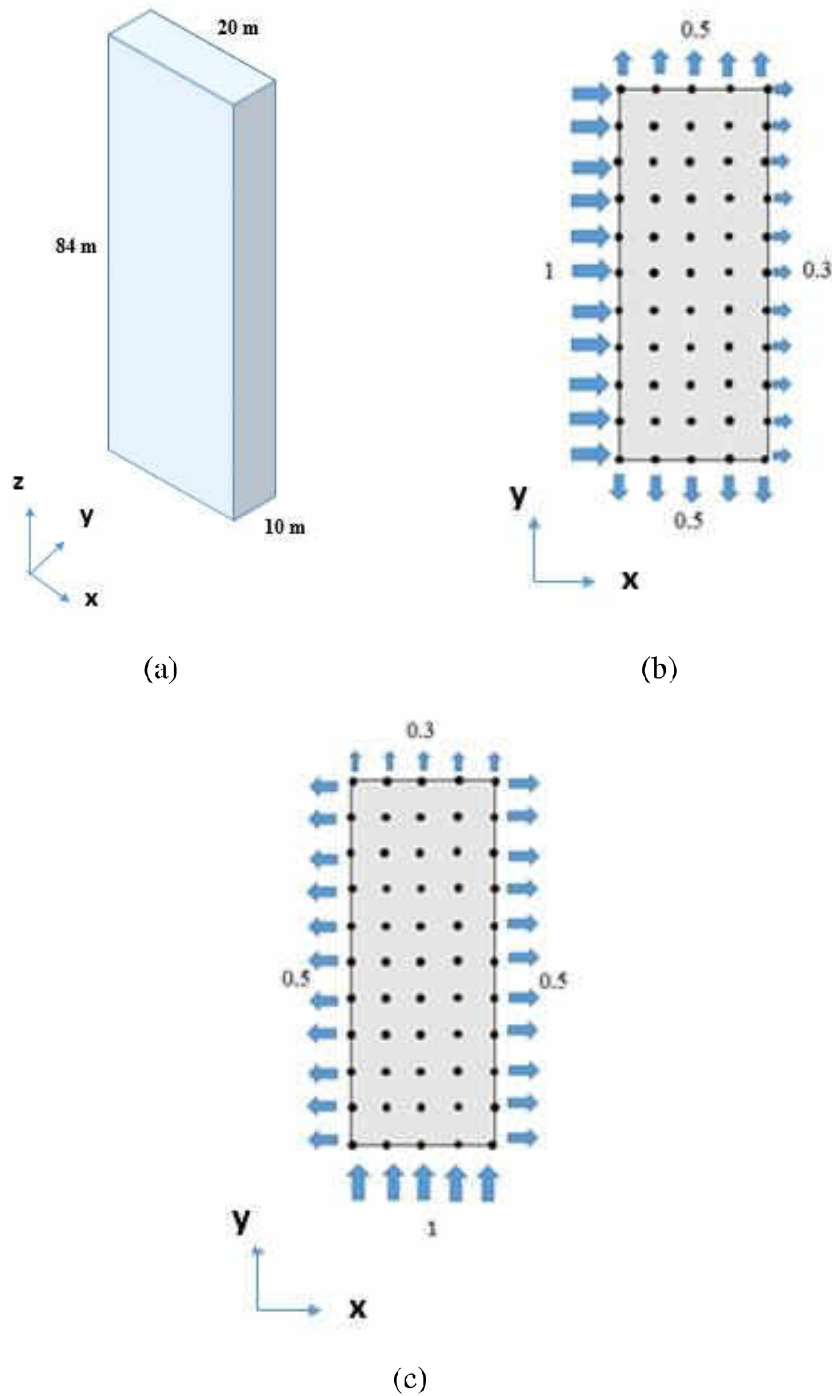


Figura 4.18 – Solução obtida no segundo experimento para o edifício tipo caixa para vento na direção X utilizando o método de *ground structure*: (a) Perspectiva; (b) Vista lateral no plano X - Z ; (c) Vista lateral no plano Y - Z ; (d) Vista em planta no plano X - Y .

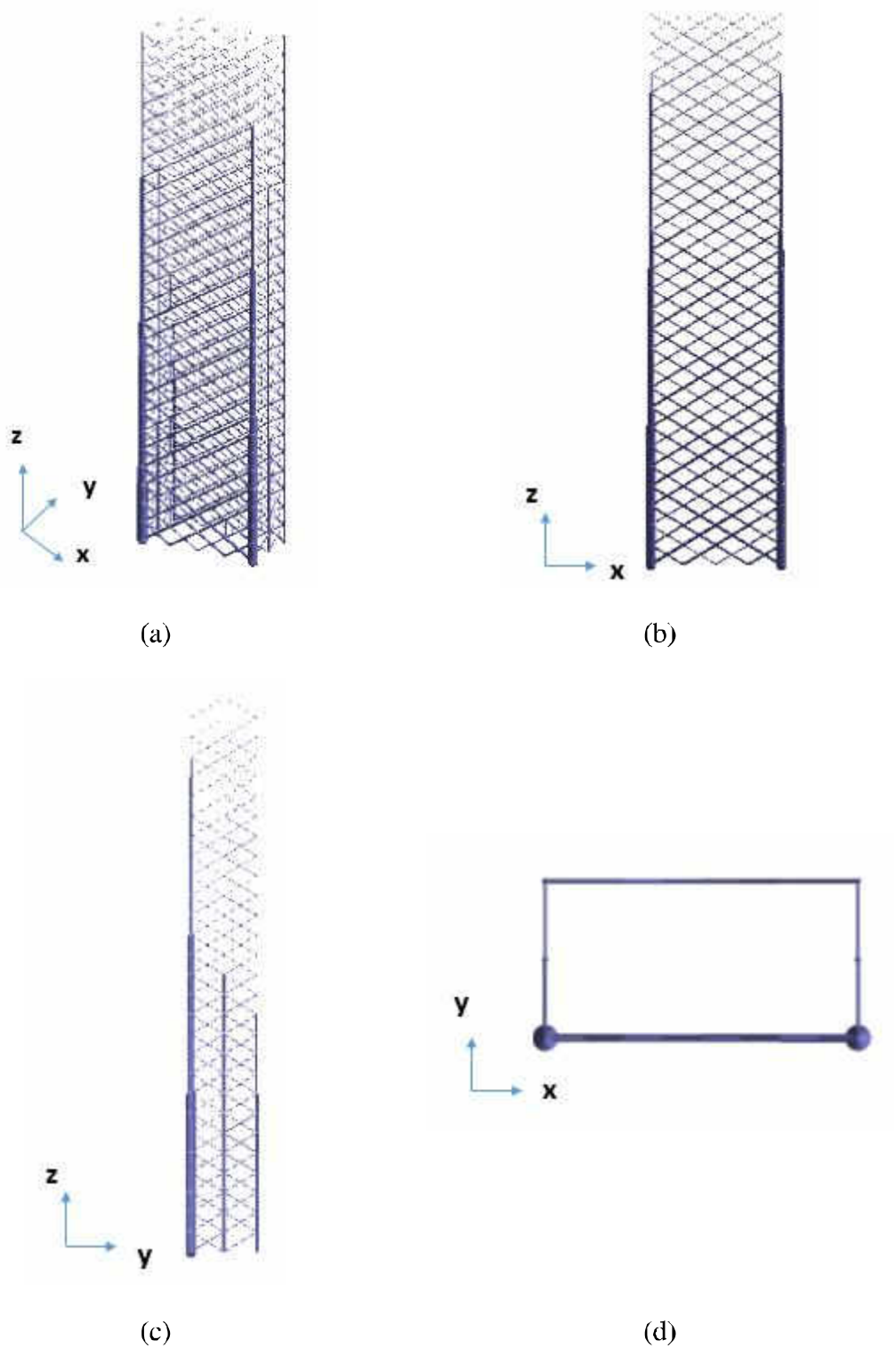
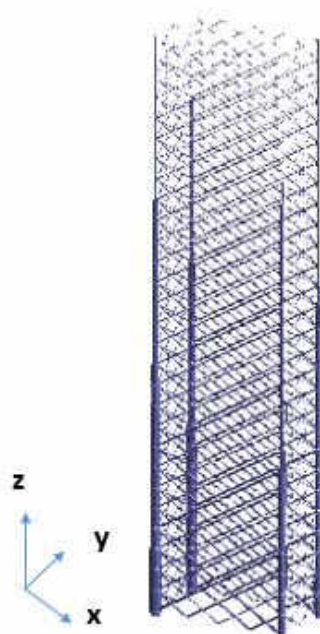
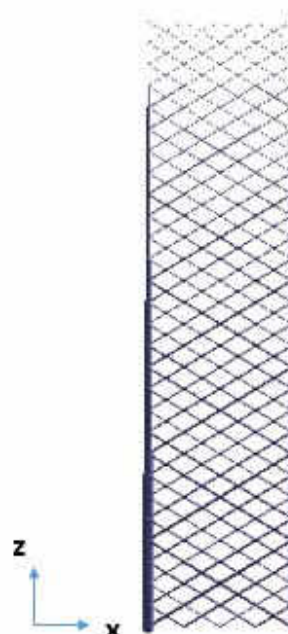


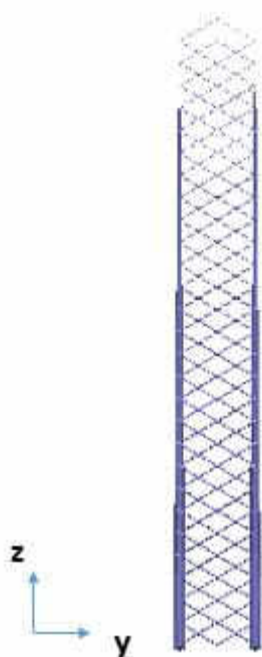
Figura 4.19 – Solução obtida no segundo experimento para o edifício tipo caixa para vento na direção Y utilizando o método de *ground structure*: (a) Perspectiva; (b) Vista lateral no plano X - Z ; (c) Vista lateral no plano Y - Z ; (d) Vista em planta no plano X - Y .



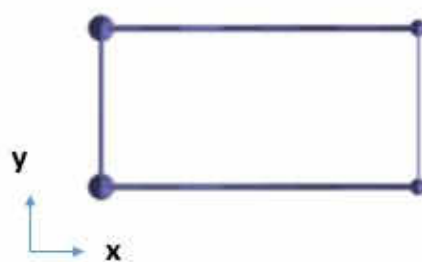
(a)



(b)



(c)



(d)

As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam as soluções para os mesmos carregamentos anteriores, com imposição de simetria em relação aos planos $X-Z$ e $Y-Z$, conforme as equações (3.11) e (3.12) e repetição de padrão. Adotou-se o tamanho do padrão $b = 15$ m., conforme a equação (3.8).

Figura 4.20 – Solução obtida para o edifício tipo caixa para vento na direção X utilizando o método de *ground structure* com imposição de simetria e repetição de padrão: (a) Perspectiva; (b) Vista lateral no plano $X-Z$; (c) Vista lateral no plano $Y-Z$; (d) Vista em planta no plano $X-Y$.

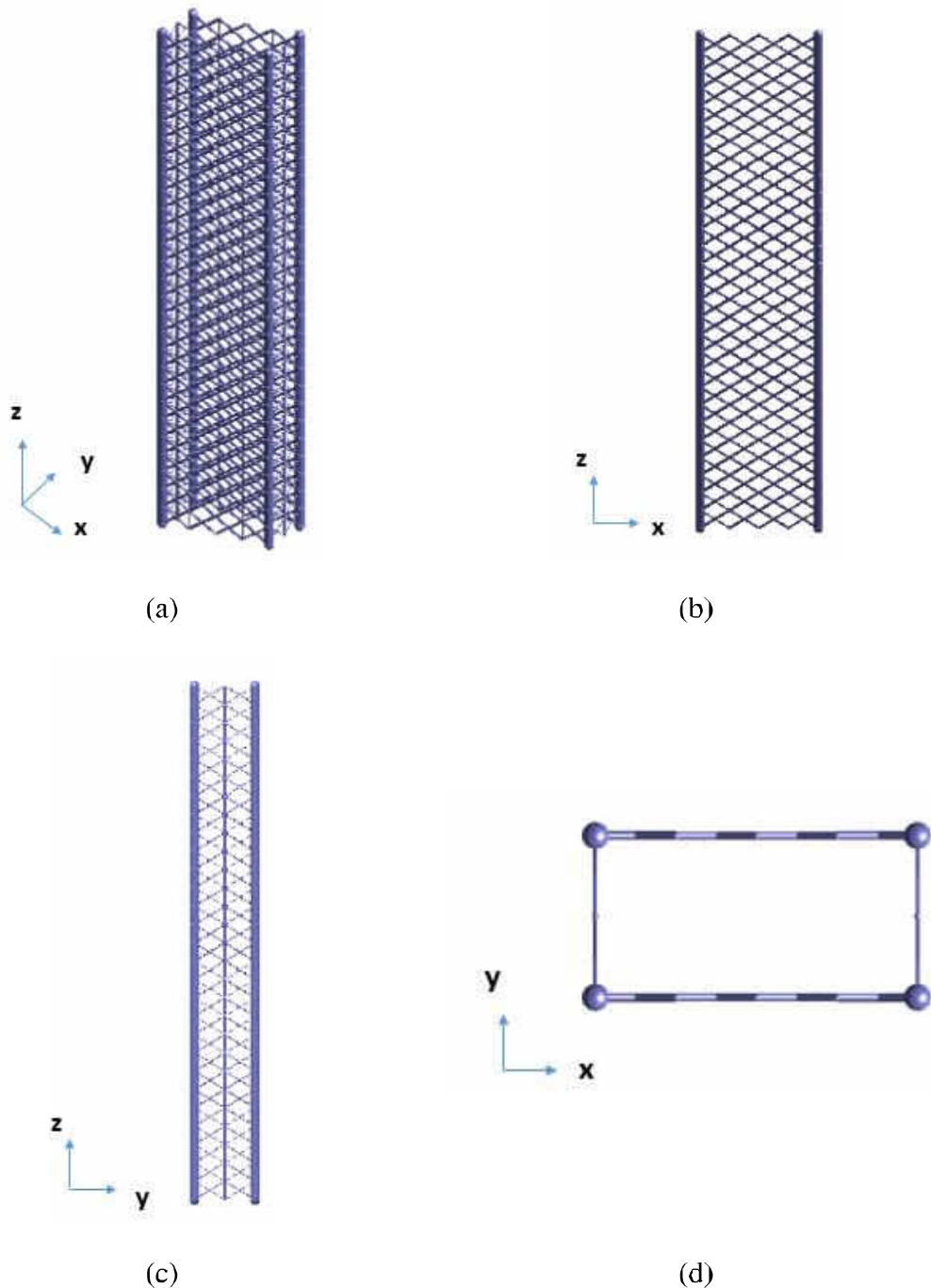


Figura 4.21 – Solução obtida para o edifício tipo caixa para vento na direção Y utilizando o método de *ground structure* com imposição de simetria e repetição de padrão: (a) Perspectiva; (b) Vista lateral no plano X - Z ; (c) Vista lateral no plano Y - Z ; (d) Vista em planta no plano X - Y .

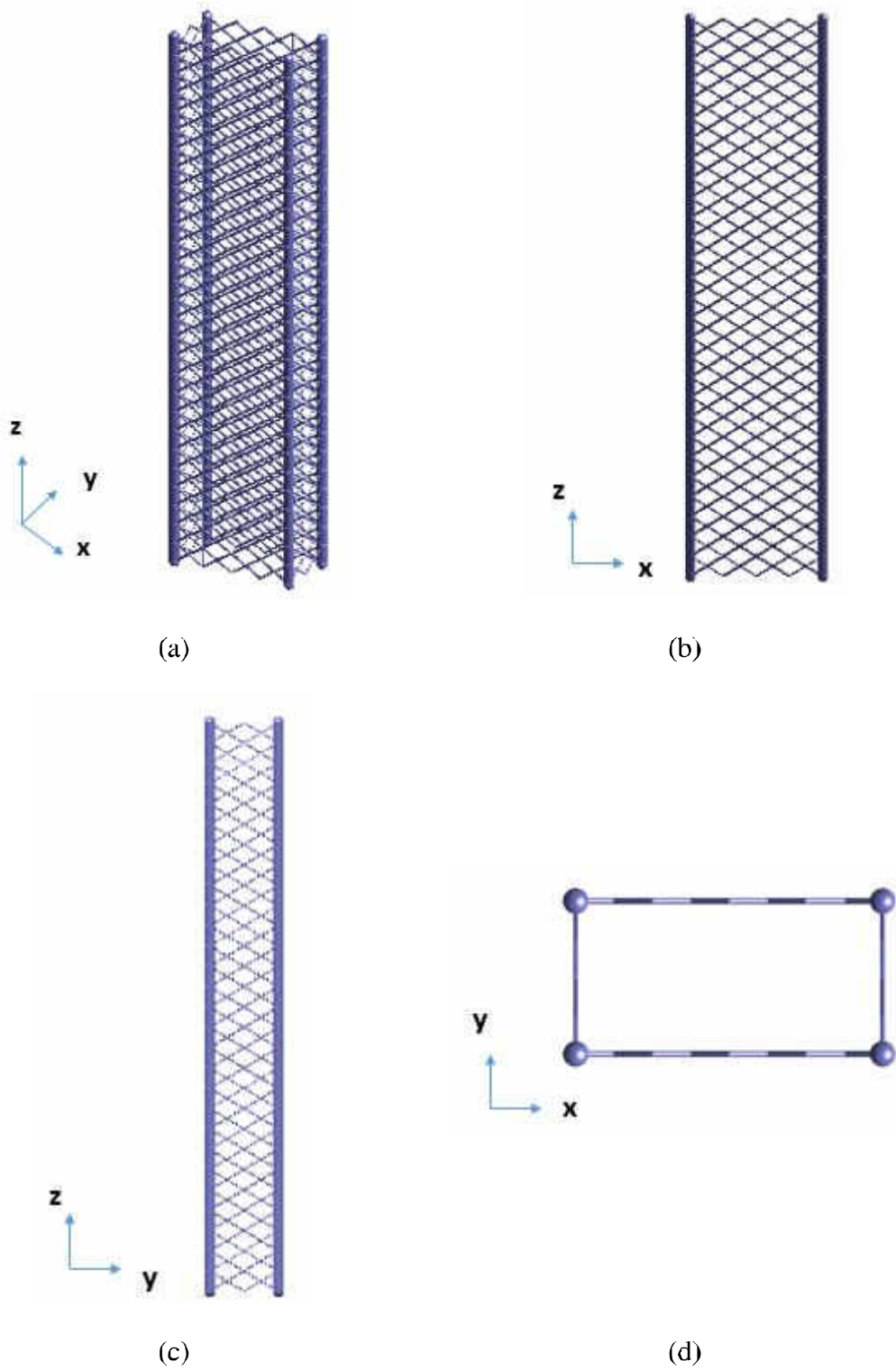
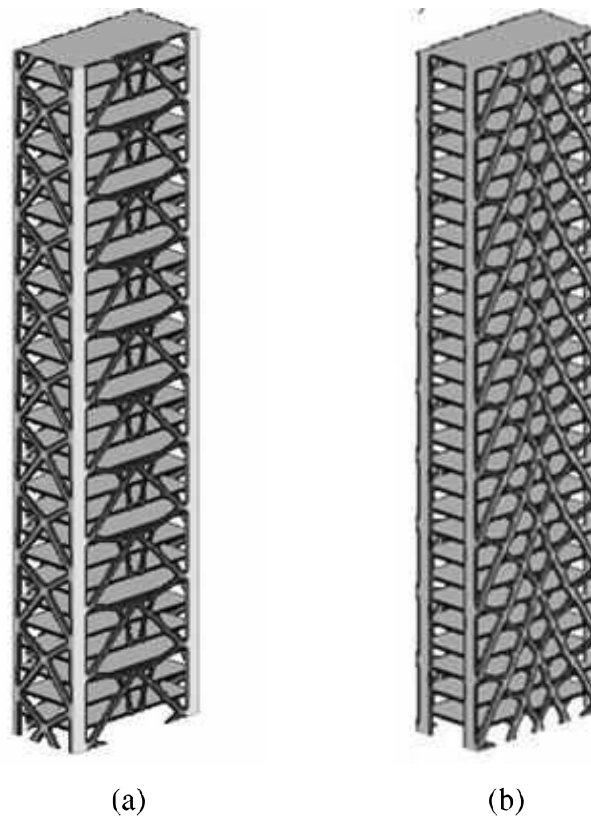


Figura 4.22 – Soluções para o edifício tipo caixa utilizando o método de densidade: (a) Vento na direção X ; (b) Vento na direção Y . [Fonte: TORRES, 2014]

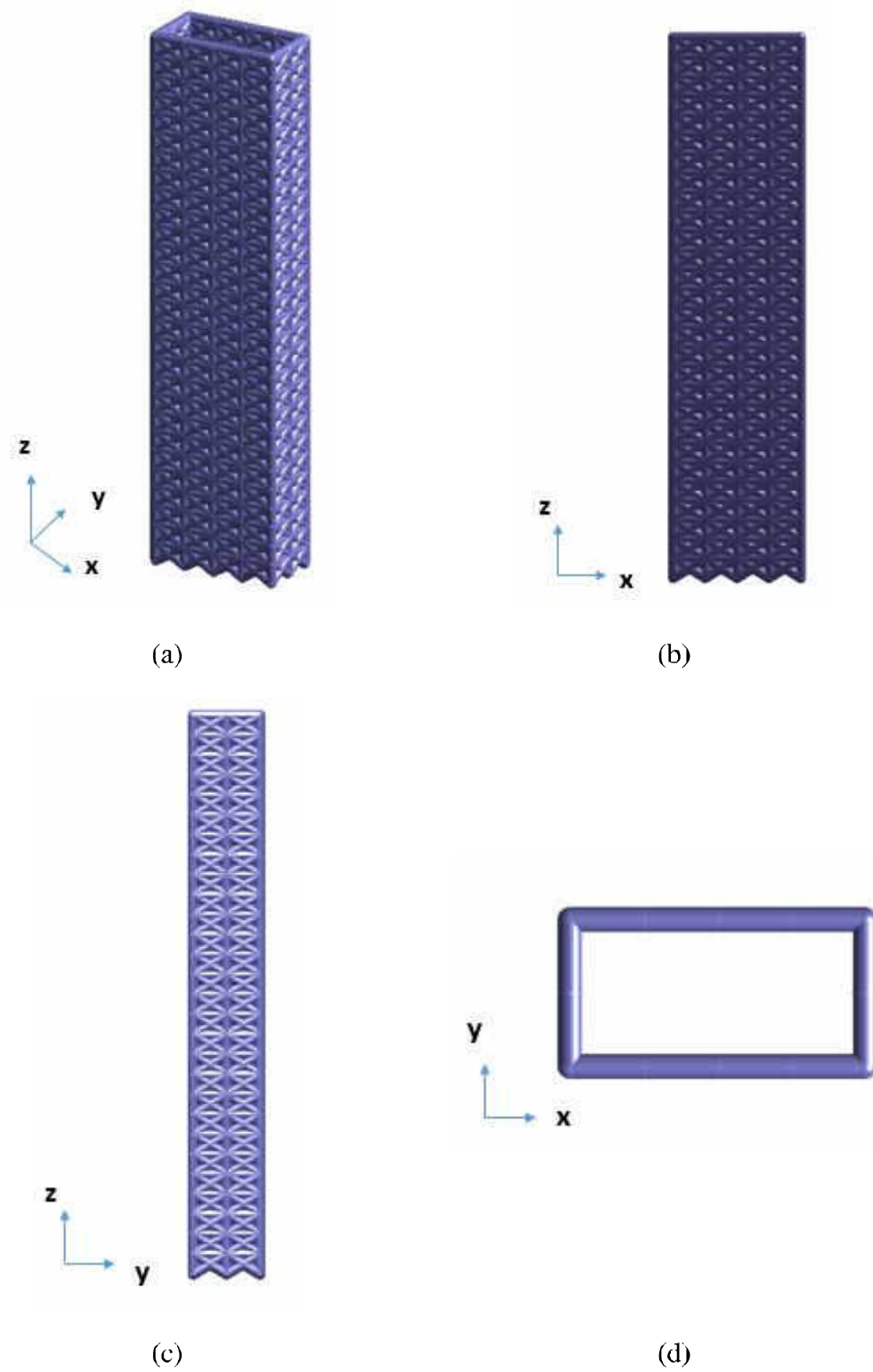


Os resultados obtidos no segundo experimento utilizando o método de *ground structure* reproduzem qualitativamente os obtidos por Torres (2014) utilizando o método de densidade conforme Figura 4.22. Observa-se que, conforme esperado, há formação de estruturas tridimensionais.

4.2.2. Soluções obtidas com aplicação de cargas de vento não simultâneas

Por fim, no terceiro experimento com o edifício tipo caixa quatro possibilidades de carregamento são consideradas: vento na direção X^+ ; vento na direção X^- ; vento na direção Y^+ ; e vento na direção Y^- . Os carregamentos são aplicados de forma não simultânea e é imposta repetição de padrão ao longo do eixo vertical Z . O resultado pode ser observado na Figura 4.23.

Figura 4.23 – Solução obtida no terceiro experimento para o edifício tipo caixa para quatro carregamentos não simultâneos e nível de conectividade 1: (a) Perspectiva; (b) Vista lateral no plano X-Z; (c) Vista lateral no plano Y-Z; (d) Vista em planta no plano X-Y.



4.3. VARIAÇÃO ARQUITETÔNICA EM EDIFÍCIO TIPO CAIXA

A evolução do conhecimento tem levado à busca de formas arquitetônicas mais ousadas e fluidas, fugindo dos clássicos edifícios tipo caixa. Com isso, a engenharia estrutural busca novas soluções para atender as ambições arquitetônicas. Um exemplo de um edifício arquitetonicamente desafiador pode ser visto nas Figuras 4.24 e 4.25. Neste exemplo é considerada um edifício de 40x40x180 metros, composto de 60 andares de 3 m. O edifício sofre uma rotação de modo que ao atingir o topo os cantos do edifício sofreram uma rotação de 45°. A cada pavimento é aplicada uma rotação de 0.75°. O carregamento é aplicado no topo de modo a simular torsão. A primeira malha adotada para a resolução foi de 4x4x60 elementos aplicando os níveis de conectividade 1 e 2.

Figura 4.24 – Experimento para o edifício tipo caixa modificado com malha de 5x5x61 nós: (a) Perspectiva; (b) Resultado para nível de conectividade 1; (c) Vista em planta no plano X-Y.

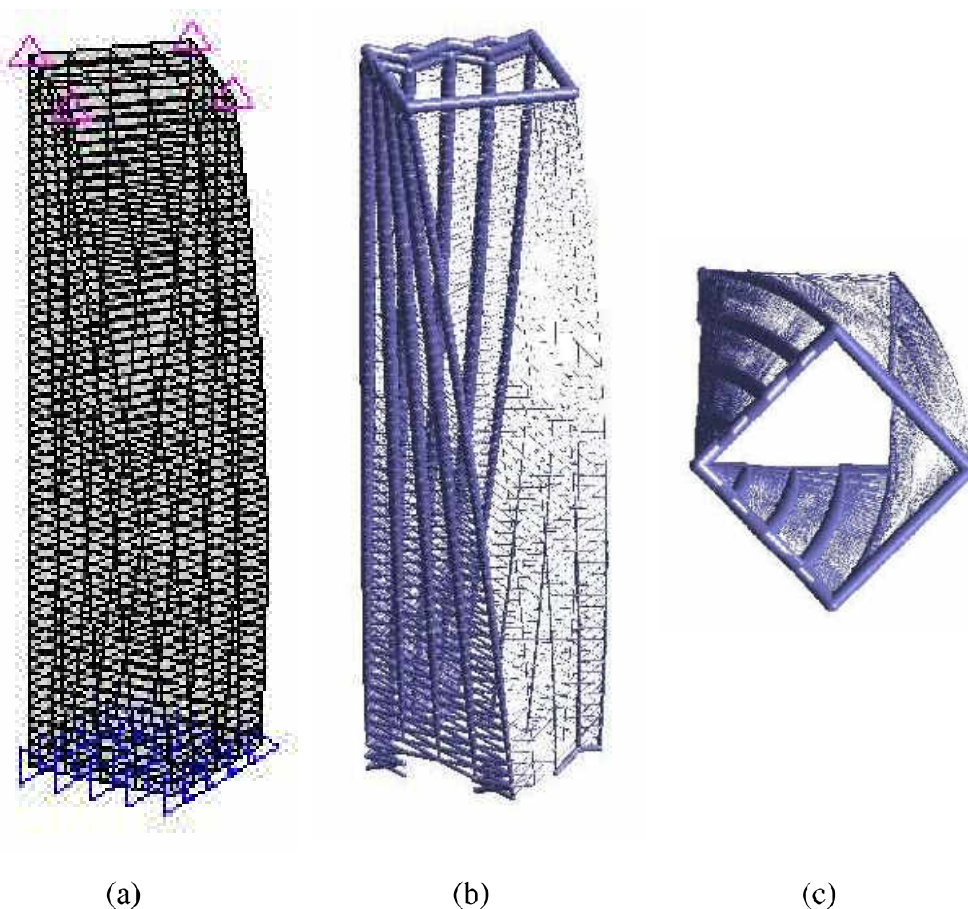
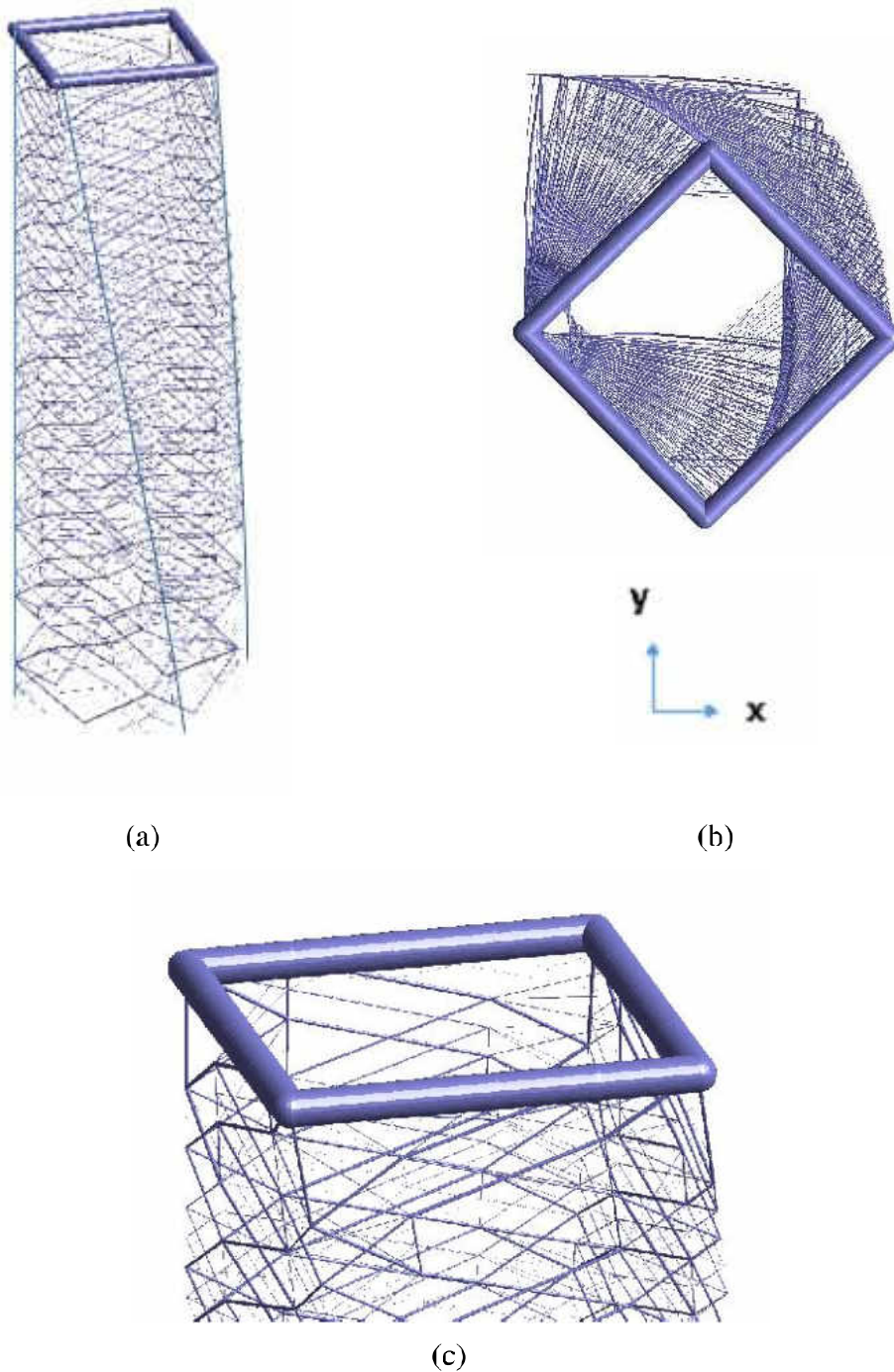
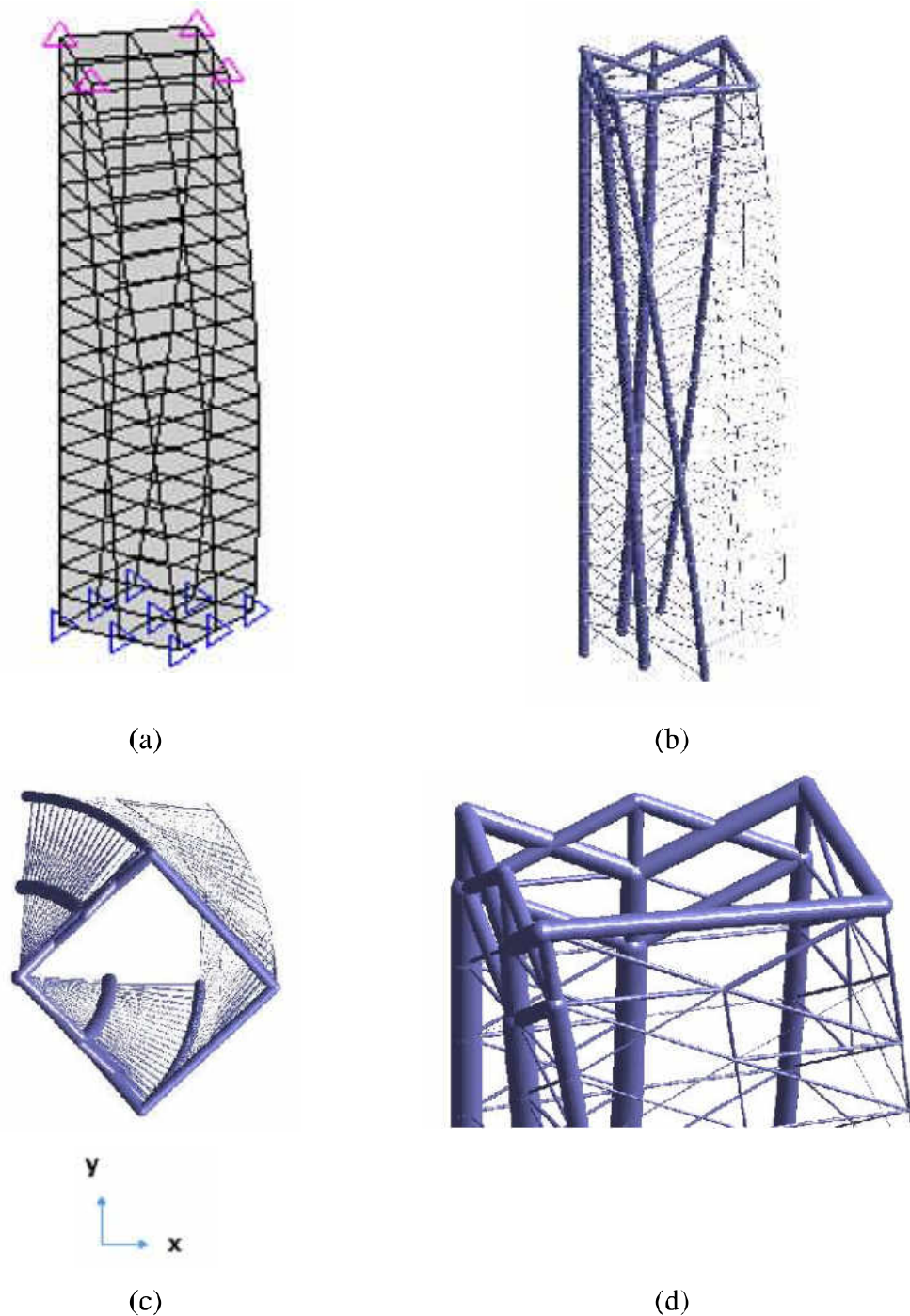


Figura 4.25 – Experimento para o edifício tipo caixa modificado com malha de 5x5x61 nós: (a) resultado para nível de conectividade 2; (b) Vista em planta no plano X-Y; (c) Detalhe da malha obtida.



Percebe-se que com a malha adotada houve a formação de muitas barras com pouca definição o que não levaria a uma solução prática e aplicável. Com isso, estudou-se uma nova malha conforme figuras 4.26.

Figura 4.26 – Experimento para o edifício tipo caixa modificado com malha de 3x3x21 nós: (a) Perspectiva; (b) Resultado para nível de conectividade 1; (c) Vista em planta no plano X-Y; (d) Detalhe da malha obtida.



É possível constatar que à medida que as malhas se tornam menos refinadas há uma maior definição das conectividades o que leva a soluções práticas que atendam as ambições arquitetônicas ao mesmo tempo que levam a uma solução ótima. Logo, dependendo das

características arquitetônicas que se deseja obter é possível encontrar a melhor solução estrutural para cada caso específico.

4.4. EDIFÍCIO COM SEÇÃO CIRCULAR

Seguindo a mesma linha de edifícios com arquiteturas diferenciadas buscou-se resolver o exemplo de um edifício com formato cilíndrico, que começa com um raio na base de 50 m, na metade da sua altura possui raio de 25 m e no topo volta a ter um raio de 50 m. O edifício tem altura de 240 m, dividido em 80 andares. As Figuras 4.27 e 4.28 mostram os resultados para o carregamento aplicado em todos os nós do topo simulando torsão com vários níveis de conectividade. A Figura 4.29 mostra o resultado para o carregamento aplicado lateralmente na direção X .

Figura 4.27 – Experimento para o edifício com seção circular: (a) Perspectiva; (b) Resultado para nível de conectividade 1; (c) Vista em planta no plano X - Y ; (d) Detalhe da malha obtida.

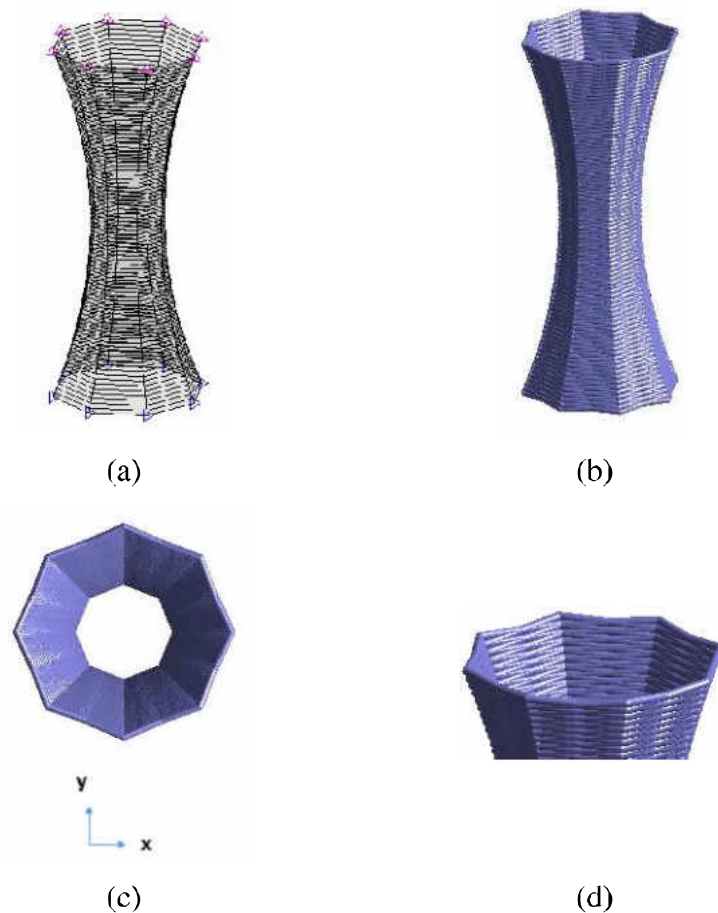


Figura 4.28 – Experimento para o edifício com seção circular: (a) Resultado para nível de conectividade 2; (b) Resultado para nível de conectividade 5; (c) Resultado para nível de conectividade 10; (d) Detalhe da malha obtida para nível de conectividade 2; (e) Detalhe da malha obtida para nível de conectividade 5; (f) Detalhe da malha obtida para nível de conectividade 10;

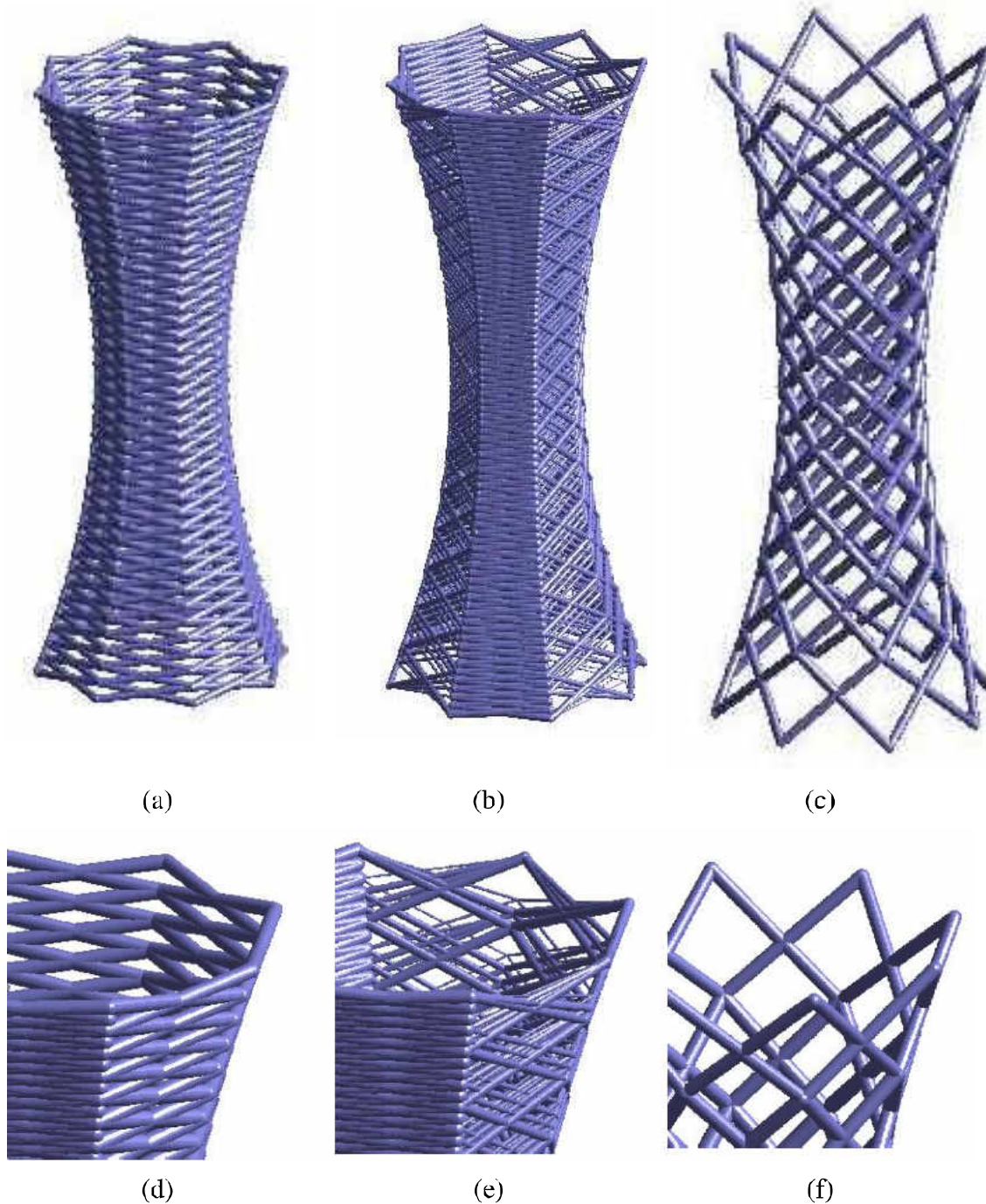


Figura 4.29 – Experimento para o edifício com seção circular aplicando carregamento lateralmente da direção X: (a) Perspectiva; (b) Resultado para nível de conectividade 1; (c) Vista em planta no plano X-Y; (d) Resultado

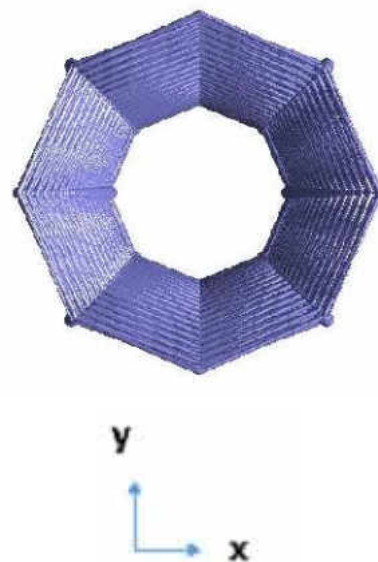
para nível de conectividade 2; (e) Resultado para nível de conectividade 5; (f) Resultado para nível de conectividade 10



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

4.5. LOTTE TOWER

Outro exemplo estudado foi a Lotte Tower, construída em Seul, Coreia do Sul onde possui 556 m de altura e 123 andares, conforme Figura 4.30. A base do edifício é quadrada com lado 70 m e o topo é circular com raio 35 m. O exemplo foi discretizado em 12 elementos de superfície na direção Z e 16 elementos ao redor da base. A Figura 4.31 mostra os resultados para o carregamento aplicado lateralmente no topo e a Figura 4.32 o carregamento no topo simulando torção.

Figura 4.30 – Aplicação: (a) Lotte Tower (<http://skyscrapercenter.com/building/lotte-world-tower/88>); (b) Malha de apoio; (c) carregamento aplicado no topo da torre em um sentido; (d) carregamento aplicado no topo da torre simulando torção.

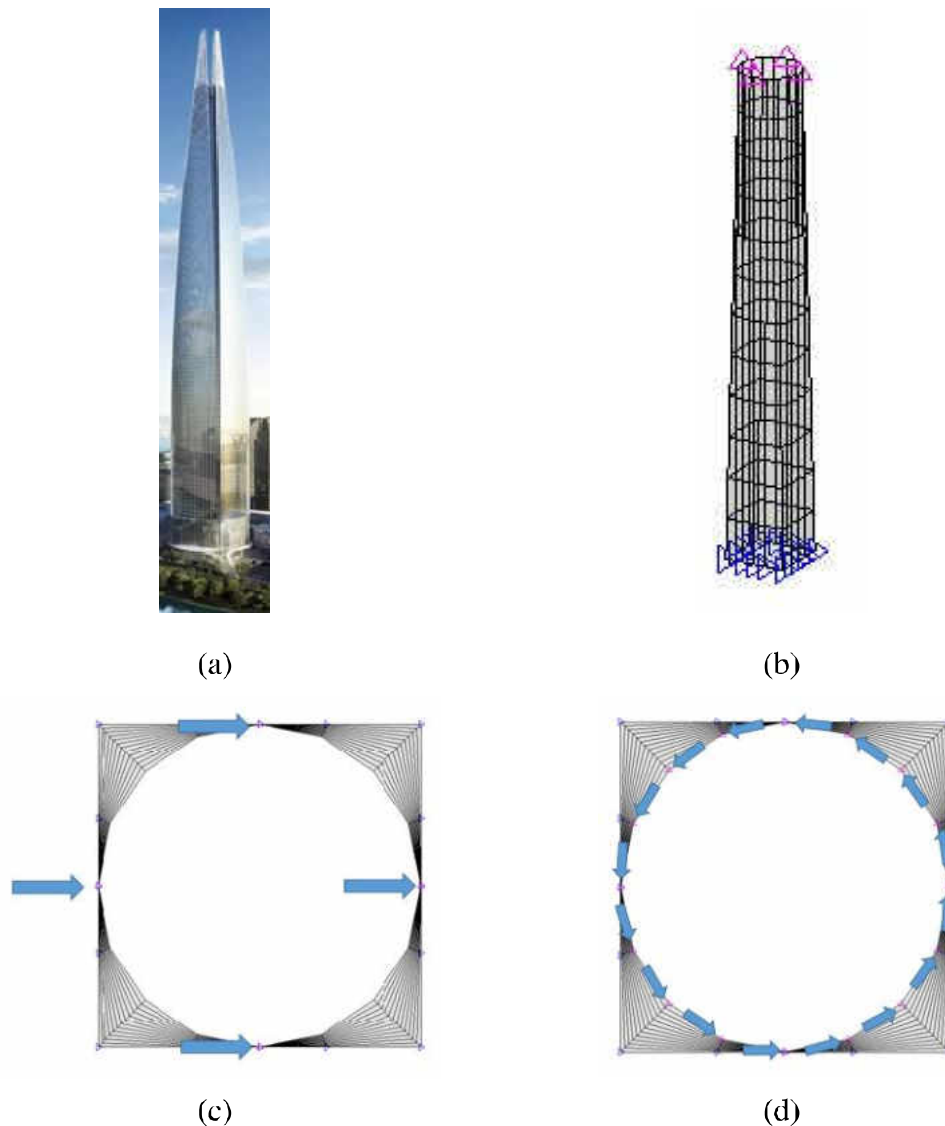


Figura 4.31 – Experimento para a Lotte Tower com aplicação da carga lateral no topo do edifício: (a) Resultado para nível de conectividade 1; (b) Resultado para nível de conectividade 2; (c) Resultado para nível de conectividade 3; (d) Resultado para nível de conectividade 10.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.32— Experimento para a Lotte Tower com carregamento aplicado no topo simulando torsão:
(a) Resultado para nível de conectividade 1; (b) Resultado para nível de conectividade 2; (c) Resultado para nível de conectividade 3; (d) Resultado para nível de conectividade 10.



(a)



(b)



(c)



(d)

Os resultados obtidos evidenciam que a modelagem do carregamento é fundamental para análise do sistema de contraventamento, já que altera qualitativamente o resultado ótimo obtido. Além disso, as estruturas obtidas para o exemplo apresentado anteriormente mostram-se viáveis em termos de aplicabilidade prática.

4.6. ONE WORLD TRADE CENTER

O último exemplo estudado foi o One World Trade Center, construído em Nova York, Estados Unidos onde possui 417 m de altura e 104 andares, conforme Figura 4.33. A base do edifício é quadrada com lado 100 m e o topo é um quadrado rotacionado com lado 70,7 m. O exemplo foi discretizado em 104 elementos de superfície na direção Z e 8 elementos ao redor da base. A Figura 4.34 mostra os resultados para o carregamento aplicado lateralmente no topo e a Figura 4.35 o carregamento no topo simulando torção.

Figura 4.33 – Aplicação: (a) One World Trade Center (<http://www.panynj.gov/wtcprogress/index.html>); (b) Malha de apoio; (c) carregamento aplicado no topo da torre em um sentido; (d) carregamento aplicado no topo da torre simulando torção.

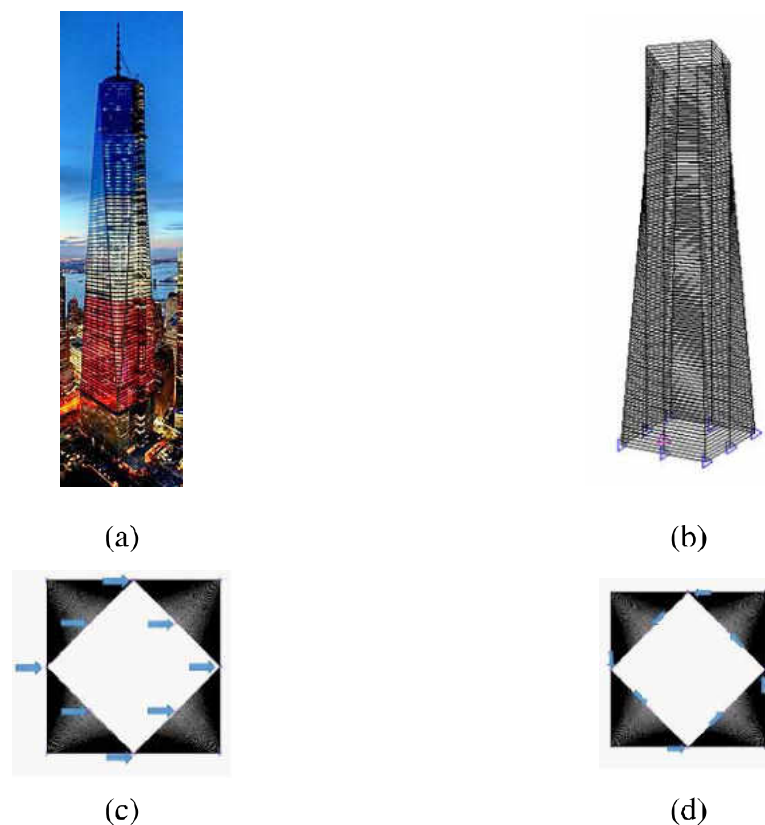


Figura 4.34 – Experimento para o One World Trade Center com carregamento aplicado lateralmente no topo do prédio: (a) Resultado para nível de conectividade 1; (b) Resultado para nível de conectividade 2; (c) Vista em planta no plano X-Y para o nível de conectividade 1; (d) Vista em planta no plano X-Y para o nível de conectividade 2



(a)



(b)

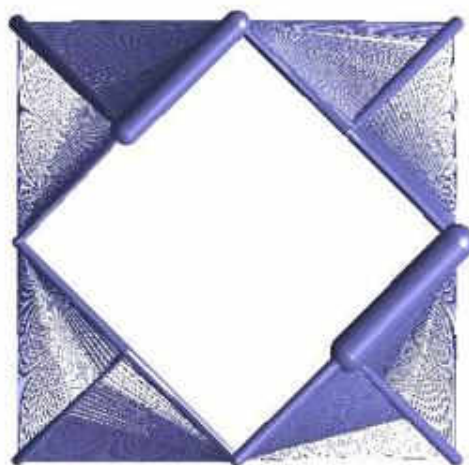
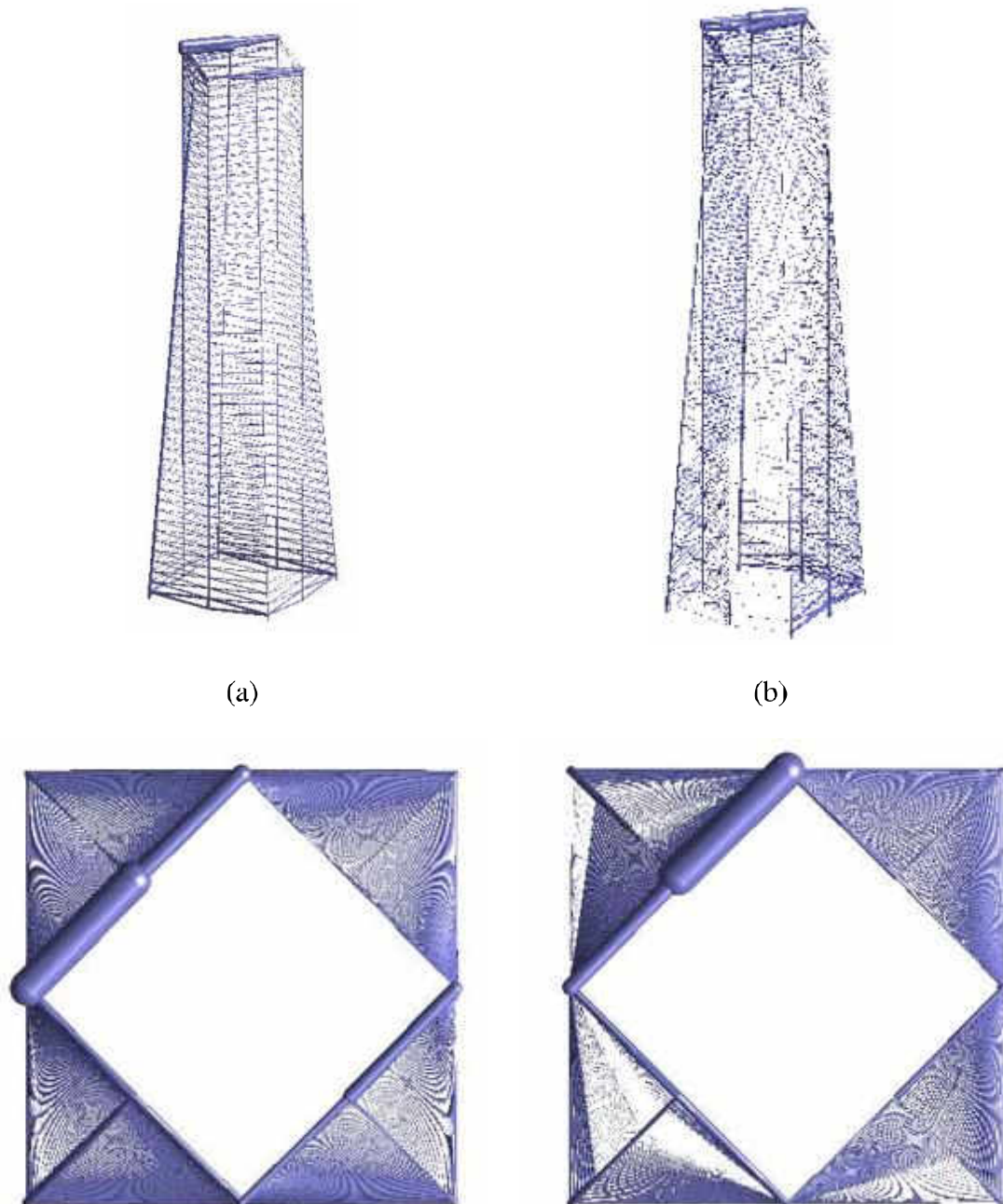


Figura 4.35 – Experimento para o One World Trade Center com carregamento aplicado no topo do edifício aplicando torção; (a) Resultado para nível de conectividade 1; (b) Resultado para nível de conectividade 2; (c) Vista em planta no plano $X-Y$ para o nível de conectividade; (d) Vista em planta no plano $X-Y$ para o nível de conectividade 2



Percebe-se nos resultados apresentados na Figura 4.35 a formação de barras mais espessas no topo do edifício de forma assimétrica. Tal comportamento apresenta-se como uma anomalia do problema de otimização sendo necessário uma análise mais profunda do experimento.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como enfoque a aplicação do método da *ground structure* na obtenção dos sistemas de contraventamento de edifícios. Foram comparados resultados bidimensionais obtidos pelo método da *ground structure* com resultados obtidos pelo método de densidade, podendo assim validar as soluções em termos conceituais. Para a aplicação em projetos de edifícios foram impostas condições de manufatura e múltiplos carregamentos.

Os exemplos bidimensionais implementados neste trabalho evidenciam a convergência dos métodos em torno de uma solução viável em termos da mecânica da estrutura. No entanto, os resultados obtidos pelo método de densidade apresentam um acúmulo de material na base do edifício, além da formação de regiões mal definidas no topo, fatos que inviabilizam a utilização das soluções na prática. Em contrapartida o método de *ground structure* apresenta um resultado mais bem definido com elementos dispostos em forma de grade ao longo de todo o domínio, apresentando uma maior aplicabilidade prática.

Os resultados obtidos para o edifício tipo caixa para o método de *ground structure*, impondo condições de simetria e repetição de padrão, estão de acordo com os obtidos por Torres (2014) para o método de densidade. A modelagem das cargas de vento considerando, além da sobrepressão na fachada de sotavento, as cargas de sucção nas fachadas laterais e na fachada de barlavento mostrou-se importante e necessárias. Ao observar os resultados obtidos sem a devida modelagem percebeu-se a formação de pórticos isolados que não condizem com o comportamento real da estrutura.

As soluções obtidas para o edifício tipo caixa com rotação, para o edifício com seção circular e para o One World Trade Center mostram a larga aplicabilidade da técnica, evidenciando a possibilidade de se utilizar a estrutura como um elemento arquitetônico. No entanto, nesses casos é necessária uma melhor modelagem das cargas de vento. Os resultados obtidos para a Lotte Tower estão de acordo com as obtidas por Zegard e Paulino (2014).

Este trabalho é um estudo inicial sobre a aplicação do método da *ground structure* para obtenção dos sistemas de contraventamento de edifícios, evidenciando diversas vertentes a serem pesquisadas. Assim, sugere-se:

- Estudar uma melhor modelagem das cargas de vento nos edifícios em outros formatos que não a caixa.
- Estudar a aplicação de níveis de conectividade diferentes em relação às dimensões em planta e a altura.
- Estudar a modelagem de um edifício real com a inclusão de elementos lineares que representem vigas e pilares contraventados aliados ao domínio.
- Implementar a eliminação de barras cujo comprimento exceda um determinado limite de fabricação quando da geração da estrutura base e estudar formas de impedir o surgimento dessas soluções durante o processo de otimização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988, 66 p.

ALLAIRE, G.; JOUVE, F.; TOADER, A. A level-set method for shape optimization. **Comptes Rendus Mathematique**, [s.l.], v.334, n.12, p.1125-1130, 2002.

ALLAIRE, G.; JOUVE, F.; TOADER, A. Structural optimization using sensitivity analysis and a level set method. **Journal of Computational Physics**, [s.l.], v.194, n.1, p.363-393, 2004.

ALMEIDA, S. R. M.; PAULINO, G. H.; SILVA, E. C. N. A simple and effective inverse projection scheme for void distribution control in topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.39 n.4, p. 359-371, 2009.

ALMEIDA, S. R. M.; PAULINO, G. H.; SILVA, E. C. N. Layout and material gradation in topology optimization of functionally graded structures: a global-local approach. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.42 n.1, p. 855-868, 2010.

ACHTZIGER, W. On simultaneous optimization of truss geometry and topology. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.33 n.2, p. 285-304, 2007.

ACHTZIGER, W.; STOLPE, M. Truss topology optimization with discrete design variables – Guaranteed global optimality and benchmark examples. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.34 n.2, p. 1-20, 2007.

BENDSØE, M. P. Optimal shape design as a material distribution problem. **Structural Optimization**, Berlin, v.1, n.4, p.193-202, 1989.

BENDSØE, M. P.; BEN-TAL, A.; ZOWE, J. 1994

BENDSØE, M. P.; KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s.l.], v.71, n.2, p. 197-224, 1988.

BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization**: theory, methods, and applications. 2.ed. New York: Springer, 2004. 370 p.

BRUNS, T. E. A reevaluation of the SIMP method with filtering and an alternative formulation for solid-void topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.30, n.6, p. 428-436, 2005.

CHEN, L. Q. Phase-field models for microstructure evolution. **Annual Review of Materials Research**, [s.l.], v.32, n.1, p.113-140, 2002.

CHENG, U. Some aspects of truss topology optimization. **Structural Optimization**, Berlin, v.10, n.1, p.173-179, 1995.

CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. **An introduction to structural optimization**. New York: Springer, 2009. 211 p.

COHN, M. Z. Theory and practice of structural optimization. **Structural Optimization**, Berlin, v.7, n.1, p.20-31, 1994.

DEATON, J. D.; GRANDHI, R. V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.49, n.1, p. 1-38, 2014.

DÍAZ, A.; SIGMUND, O. Checkerboard patterns in layout optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.10, n.1, p. 40-45, 1995.

DORN, W.; GOMORY, R.; GREENBERG, H. Automatic design of optimal structures. **Journal Mecanique**, [s.l.], v.3, n.1, p.25-52, 1964.

ESCHENAUER, H. A.; KOBELEV, V. V.; SCHUMACHER, A. A bubble method for topology and shape optimization of structures. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.8, n.1, p. 42-51, 1994.

GUEST, J. K.; PRÉVOST, J. H.; BELYTSCHKO, T. Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [s.l.], v.61, n.2, p. 238-254, 2004.

HAGISHITA, T.; OHSAKI, M. Topology optimization of trusses by growing ground structure method. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.37, n.1, p. 377-393, 2009.

HEMP, W. **Optimum structures**. 1.ed. Oxford: Oxford press, 1973. 123p.

HUANG, X.; ZUO, Z. H.; XIE, Y. M. Evolutionary optimization of vibrating continuum structures for natural frequencies. **Computers & Structures**, [s.l.], v.88, n.5-6, p.357-364, 2010.

JOG, C. S.; HABER, R. Stability of finite element models for distributed-parameter optimization and topology design. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s.l.], v.130, n.3-4, p. 203-226, 1996.

KARMARKAR, N. A new polynomial-time algorithm for linear programming. **Combinatorica**, [s.l.], v.4, n.4, p.373-395, 1984.

KIRSCH, U. On singular topologies in optimum structural design. **Structural Optimization**, Berlin, v.2, n.1, p.133-142, 1990a.

KIRSCH, U. On the relationship between optimum structural topologies and geometries. **Structural Optimization**, [s.l.], v.2, n.1, p.39-45, 1990b.

KIRSCH, U. **Structural optimization: fundamentals and applications** 1.ed. Berlin: Springer, 1993. 302p.

- KOBAYASHI, M. H. On a biologically inspired topology optimization method. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, [s.l.], v.15, n.3, p.787-802, 2010.
- KOHN, R. V.; STRANG, G. Optimal design and relaxation of variational problems, II. **Communications on Pure and Applied Mathematics**, [s.l.], v.39, n.2, p. 139-182, 1986.
- LEWINSKI, T.; ROZVANY, G. I. N.; SOKØL, T.; BOLBOTOWSKI, K. Exact analytical solutions for some popular benchmark problems in topology optimization III: L-shaped domains revisited. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.47, n.6, p. 937-942, 2013.
- LIU, K.; TOVAR, A. An efficient 3D topology optimization code written in Matlab. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.50, n.1, p. 1175-1196, 2014.
- MATSUI, K.; TERADA, K. Continuous approximation of material distribution for topology optimization. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [s.l.], v.59, n.14, p. 1925-1944, 2004.
- MICHELL, A. G. M. The limits of economy of material in frame-structures. **Phil Mar Ser**, [s.l.], v.47, n.1, p.589-597, 1904.
- NGUYEN, T. H.; PAULINO, G. H.; SONG, J.; LE, C. H. A computational paradigm for multiresolution topology optimization (MTOP). **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.41, n.4, p. 525-539, 2010.
- OHSAKI, M. **Optimization of finite dimensional structures**. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. 420 p.
- OSHER, S.; SETHIAN, J.A. Fronts propagating with curvature dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. **Journal of Computational Physics**, [s.l.], v.79, n.1, p.12-49, 1988.
- PAULINO, G. H.; LE, C. H. A modified Q4/Q4 element for topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.37, n.3, p. 255-264, 2009.
- PINHO, F. A. X. C. **Métodos de densidade em otimização de topologia aplicada a sub-sistemas de edifícios**. 2015. 133 f. (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- QUERIN, O. M.; STEVEN, G. P.; XIE, Y. M. Evolutionary structural optimization (ESO) using a bidirectional algorithm. **Engineering Computations**, [s.l.], v.15, n.8, p.1031-1048, 1998.
- QUERIN, O. M.; YOUNG, V.; STEVEN, G. P.; XIE, Y. M. Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s.l.], v.189, n.2, p. 559-573, 2000.
- RAHMATALLA, S. F.; SWAN, C. C. A Q4/Q4 continuum structural topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.27, n.1-2, p. 130-135, 2004.

RICHARDSON, J. N.; ADRIAENSSENS, S.; BOUILLARD, P.; COELHO, R. F. Multiobjective topology optimization of truss structures with kinematic stability repair. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.46, n.1, p. 513-532, 2012

ROZVANY, G. I. N. A critical review of established methods of structural topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.37, n.3, p. 217-237, 2009.

ROZVANY, G. I. N.; HILL, R. H. Optimal plastic design: superposition principles and bounds on the minimum cost. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s.l.], v.13, n.2, p. 151-173, 1978.

ROZVANY, G. I. N.; BIRKER, T. On singular topologies in exact layout optimization. **Structural Optimization**, Berlin, v.8, n.1, p.228-235, 1994.

ROZVANY, G. I. N.; QUERIN, O. M.; GASPAR, Z.; POMEZANSKY, V. Extended optimality in topology design. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.24, n.1, p. 257-261, 2002.

ROZVANY, G. I. N.; QUERIN, O. M.; GASPAR, Z.; POMEZANSKY, V. Extended optimality in topology design. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.24, n.1, p. 257-261, 2002.

ROZVANY, G. I. N.; SOKÓL, T.; POMEZANSKY, V. Fundamentals of exact multi-load topology optimization – stress based least-volume trusses (generalized Michell trusses) – Part I: Plastic design. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.50, n.1, p. 1051-1078, 2014.

SETHIAN, J. A. **Level Set Methods and Fast Marching Methods**: involving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials Science. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press. 1999. v.3. p.320.

SIGMUND, O. A 99 line topology optimization code written in Matlab. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.21, n.1, p. 120-127, 2001.

SIGMUND, O. Morphology-based black and white filters for topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.33, n.4-5, p. 401-424, 2007.

SIGMUND, O.; MAUTE, K. Topology optimization approaches: A comparative review. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.48, n.6, p. 1031-1055, 2013.

SIGMUND, O.; PETERSSON, J. Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealign with checkerboards, mesh-dependencies and local-minima. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.16, n.1, p. 68-75, 1998.

SMITH, O. S. Generation of ground structures for 2D and 3D design domains. **Engineering Computations**, [s.l.], v.15, n.4, p. 464-500, 1988.

SOKÓL, T. Topology optimization of large-scale trusses using ground structure approach with selective subsets of active bars. **Computers Methods in Mechanics**, Poland, v.1, n.1, p. 9-12, 2011a.

SOKÓL, T. A 99 line code for discretized Michell truss optimization written in Mathematica. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.43, n.1, p. 181-190, 2011b.

SOKÓL, T.; ROZVANY, G. I. N. On the adaptive ground structure approach for multi-load truss topology optimization. *In*: 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, 2013, Florida, USA. **Proceedings...** Berlin: Structural and Multidisciplinary, 2013.

STOLPE, M.; SVANBERG, K. An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.22, n.2, p. 116,124, 2001.

STROMBERG, L. L.; BEGHINI, A; BAKER, W. F.; PAULINO, G. H. Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.43, n.1, p. 165-180, 2011.

SVED, G.; GINOS, Z. Structural optimization under multiple loading. **International Journal of Mechanical Sciences**, [s.l.], v.10, n.10, p. 803-805, 1968.

TALISCHI, C.; PAULINO, G. H.; PEREIRA, A.; MENEZES, I. F. M. PolyMesher: a general-purpose mesh generator for polygonal elements written in Matlab. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.45, n.1, p. 309-328, 2012.

TORRES, I. A. **Otimização de topologia aplicada ao projeto de edificios altos**. 2014. 98 f. (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

VAN DIJK, N. P.; MAUTE, K.; LANGELAAR, M.; VAN KEULEN, F. Level-set methods for structural topology optimization: a review. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.48, n.3, p. 437-472, 2013.

WANG, M. Y.; LI, L. Shape equilibrium constraint: a strategy for stress-constrained structural topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.47, n.1, p. 335-352, 2013.

WANG, M. Y.; WANG, X. GUO, D. A level set method for structural topology optimization. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s.l.], v.192, n.1-2, p. 227-246, 2003.

XIE, Y. M.; STEVEN, G. P. A simple evolutionary procedure for structural optimization. **Computers & Structures**, [s.l.], v.49, n.5, p.885-896, 1993.

XIE, Y. M.; STEVEN, G. P. **Evolutionary structural optimization**. 2. ed. London: Springer. 1997. v.1. p.129.

ZEGARD, T; PAULINO, G. H. GRAND – Ground structure based topology optimization for arbitrary 2D domains using MATLAB. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.50, n.1, p. 861-882, 2014.

ZEGARD, T; PAULINO, G. H. GRAND3 – Ground structure based topology optimization for arbitrary 3D domains using MATLAB. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v.52, n.1, p. 1161-1184, 2015.

ZHOU, M.; ROZVANY, G. I. N. The COC algorithm, part II: topological, geometrical and generalized shape optimization. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s.l.], v.89, n.1-3, p. 309-336, 1991.