

## **6**

### **Modelo numérico computacional**

#### **6.1**

##### **Considerações iniciais**

Os modelos numérico-computacionais foram desenvolvidos via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa Ansys (2009). As vigas e as colunas de aço dos modelos são simuladas por elementos finitos de viga tridimensionais BEAM44 (Figura 6.1), em que os efeitos de flexão e torção são considerados. A laje de concreto é simulada por meio de elementos finitos de casca SHELL63 (Figura 6.3).

Para a modelagem das ligações viga-viga flexíveis (ligações rotuladas) foi empregado o elemento COMBIN7 (Figura 6.4) e para a simulação da semi-rigidez das ligações viga-coluna e viga-viga foi empregado o elemento COMBIN39 (Figura 6.5). Finalmente, a estratégia de modelagem utiliza os elementos de mola rotacional, COMBIN39 (Figura 6.5), para representar o comportamento dos conectores de cisalhamento do sistema estrutural real.

São utilizadas, também, conexões rígidas do tipo “off-set”, de forma a se garantir a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de casca SHELL63 e os elementos de viga tridimensionais BEAM44, simulando o comportamento de um sistema estrutural misto (aço-concreto), com interação total.

Considera-se, ainda, que os materiais empregados nas estruturas em estudo, aço e concreto, trabalhem no regime linear-elástico. Assim sendo, o principal objetivo deste capítulo é o de apresentar a descrição detalhada das estratégias de modelagem utilizadas para a discretização dos modelos em elementos finitos desenvolvidos para análise do comportamento dinâmico de pisos mistos em regime de interação parcial e total.

#### **6.2**

##### **Elementos finitos utilizados**

Os modelos numéricos propostos foram elaborados a partir de quatro tipos de elementos finitos disponibilizados na biblioteca interna do programa

computacional Ansys. A seguir, descrevem-se as características dos elementos finitos empregados.

### 6.2.1 Elemento BEAM 44

O elemento BEAM44 Ansys (2009), foi utilizado para discretizar o perfil das vigas e das colunas de aço. O elemento apresentado na Figura 6.1, possui seis graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Ele permite a utilização de diferentes geometrias nas extremidades opostas da barra. A orientação do elemento vai do nó I para o nó J, sendo esse eixo o  $x$ . Os eixos principais  $y$  e  $z$  estão localizados na seção transversal.

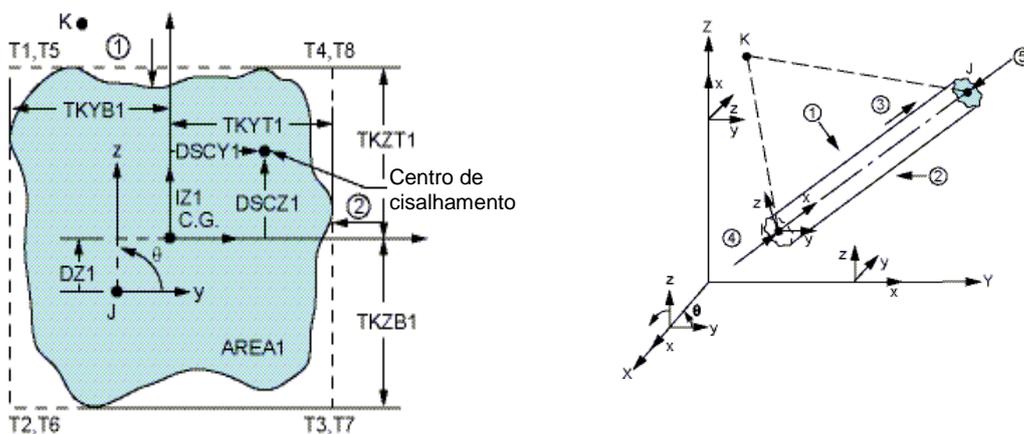


Figura 6.1 – Elemento BEAM 44 Ansys (2009).

A grande vantagem desse elemento é a possibilidade de permitir que seus nós sejam distanciados do eixo do centroide das vigas, visto que a laje e a viga não estão posicionadas no mesmo eixo, como apresentado na Figura 6.2. Essa excentricidade é de fundamental importância, pois garante a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de viga tridimensionais e os elementos de placa, como também afeta diretamente os valores das frequências naturais dos pisos.

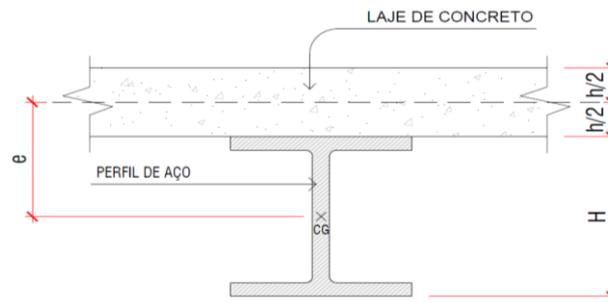


Figura 6.2 – Excentricidade entre a laje e a viga

### 6.2.2 Elemento SHELL 63

O elemento SHELL 63 Ansys (2009), foi utilizado para discretizar a laje de concreto. Trata-se de um elemento plano, definido por quatro nós, espessura e considera efeitos de membrana e/ou flexão. O elemento tem seis graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações nas direções x, y e z, conforme ilustrado na Figura 6.3. O elemento em questão admite a utilização de cargas normais e no plano, permite a consideração de não linearidade do material, além de outras características não utilizadas nesta análise.

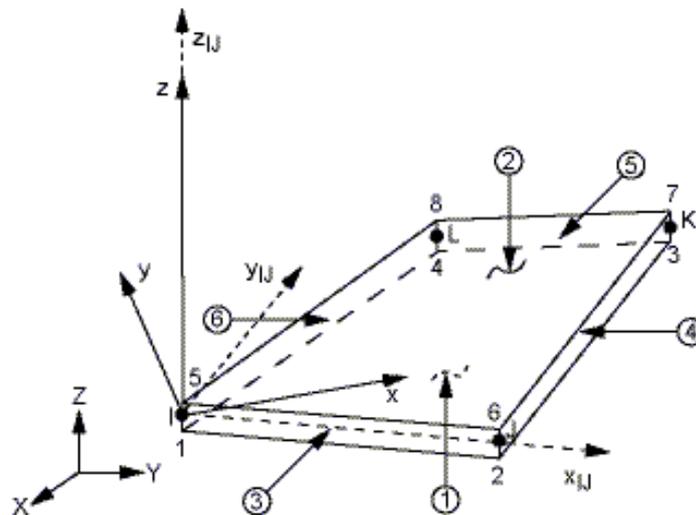


Figura 6.3 – Elemento SHELL 63 Ansys (2009).

### 6.2.3 Combin 7

O elemento COMBIN7 Ansys (2009), Figura 6.4 é um elemento de ligação 3-D que pode ser utilizado para conectar duas ou mais partes de um modelo em um nó comum. O elemento possui capacidade de flexão, sendo definido por um

sistema de coordenadas locais fixados, pode ser usado para a simulação de rótulas em sistemas estruturais.

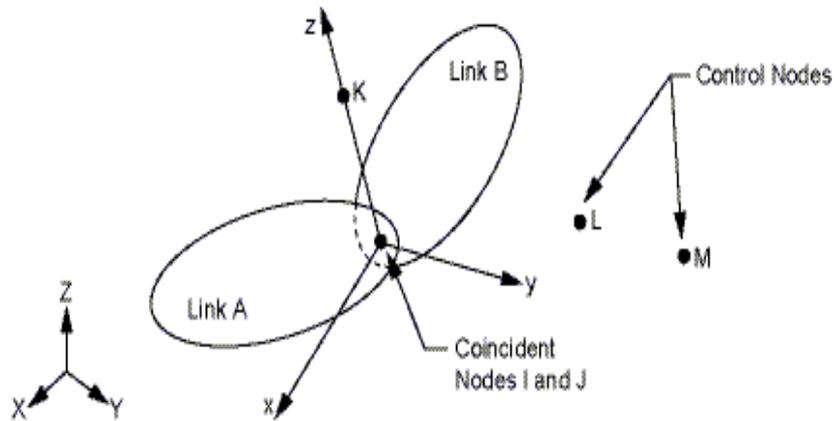


Figura 6.41 – Elemento COMBIN7 Ansys (2009).

#### 6.2.4 Combin 39

Uma das estratégias de modelagem foi substituir o conector por molas. Para isso foi utilizado o elemento Combin39 Ansys (2009). Esse elemento é não linear unidirecional com capacidade de força-deflexão generalizada que pode ser usado em qualquer análise. O elemento possui grande capacidade de torção longitudinal com até três graus de liberdade em cada nó, possuindo ainda grande capacidade de deslocamento (ver Figura 6.5).

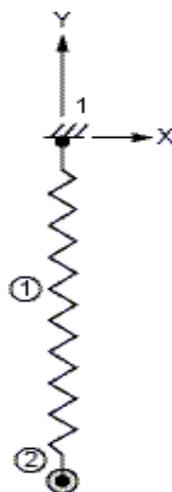


Figura 6.5 – Elemento COMBIN39 Ansys (2009).

### 6.3 Hipóteses simplificadoras

Objetivando-se a implementação computacional de um modelo matemático, mediante o emprego do método dos elementos finitos, via o programa computacional Ansys (2009), de forma a traduzir mais realisticamente o efeito da interação aço-concreto (parcial e total) e das ligações viga-viga (rígidas, semirrígidas e flexíveis) e viga-coluna (semirrígidas), em pisos mistos aço-concreto, são adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras na presente análise:

- a) Assume-se a hipótese clássica de Bernoulli em que se considera que a seção transversal dos elementos permanece plana e normal ao eixo baricentro destes, antes e após as deformações. Os efeitos de empenamento e distorção das seções não são considerados nesta modelagem;
- b) Considera-se que as tensões impostas não causam plastificação na seção transversal dos elementos. Todavia, efeitos de segunda ordem são levados em conta na análise, sendo esta do tipo não linear geométrica;
- c) O material é considerado elástico e isotrópico. As não linearidades do sistema são provenientes da flexibilidade das ligações viga-viga e das modificações na geometria do modelo;
- d) Considera-se que a rigidez das ligações pode ser aproximada de forma conveniente por funções matemáticas;
- e) O elemento de mola rotacional, representativo das ligações viga-viga, possui comprimento zero;
- f) Postula-se que a curva momento versus rotação utilizada na análise dinâmica de todos os modelos estudados é a mesma utilizada na análise estática;
- g) Para a análise dos modelos investigados neste trabalho foi considerado um comportamento elástico-linear para os materiais aço e concreto armado.

Considera-se, também, interação completa (interação total) e interação parcial (50%) entre os dois materiais.

## 6.4 Modelagem numérico-computacional

Antes de se iniciar a avaliação do comportamento dinâmico dos pisos, segundo critérios de conforto humano, é necessário definir o refinamento da malha de elementos finitos a ser utilizada para validar a resposta dinâmica da estrutura. Para definição dessa malha foram realizadas análises de vibração livre, com o objetivo de obter os valores das frequências naturais dos sistemas estruturais em estudo. Mediante a variação das respostas (frequências naturais e modos de vibração) dos modelos estudados, a malha de elementos é refinada até o momento em que as respostas passem a convergir. Pela Figura 6.6 é possível observar essa convergência, a partir dos resultados obtidos para as frequências naturais, em função da variação do tamanho da malha de elementos finitos. Para tal, foi considerado o Modelo Estrutural II, Figura 5.1. Para esta análise, o tamanho da malha foi considerado o mesmo tanto para as lajes quanto para os elementos definidos para as vigas.

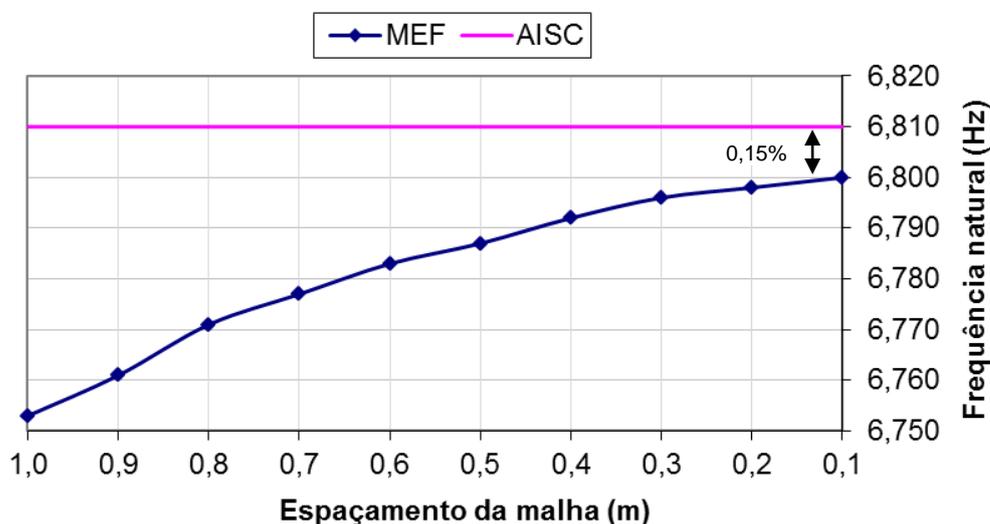


Figura 6.6 – Refinamento da malha.

Nota-se através da Figura 6.6, que o tamanho inicial da malha foi definido no comprimento de 1,0m para os elementos de pórtico (vigas e colunas) e 1,0m x 1,0m para os elementos de placa (laje). À medida que se reduz o tamanho da malha, os resultados das frequências naturais obtidas para o modelo de piso misto (aço/concreto) proposto, começam a variar. Observa-se que para malhas

com tamanhos a partir de 25cm, os resultados da frequência natural do modelo de piso misto (aço/concreto), começam a convergir para o valor de aproximadamente 6,80Hz. Tomando por base o valor calculado para a frequência natural para este mesmo modelo estrutural, segundo o procedimento simplificado recomendado pelo AISC (2003), encontra-se o valor de 6,81Hz, ou seja, uma diferença muito pequena. A partir desta conclusão, obtido através do estudo da convergência da malha, foi adotada a dimensão de 0,25m para os elementos de viga e pilar, e 0,25m x 0,25m para os elementos de laje. Essa escolha também levou em consideração a distribuição das pessoas sobre os pisos, ou seja, buscou atender à distribuição e à variação do número de pessoas aplicadas, definido na seção anterior.

É conveniente ressaltar que estas análises foram realizadas para os outros modelos estruturais estudados nesta tese, permanecendo os resultados com uma diferença muito pequena entre os obtidos pelo procedimento simplificado AISC (2003) e os obtidos com auxílio do programa Ansys (2009), porém esses resultados não são aqui apresentados. Nas Figuras 6.7 a 6.10 podem ser visualizados os modelos estruturais de piso discretizado em elementos finitos, com o auxílio do programa Ansys (2009).

Os modelos desenvolvidos foram constituídos pelos seguintes conjuntos de elementos: laje de concreto, vigas e colunas de aço, conectores de cisalhamento na interface laje-viga e molas. Cada conjunto foi discretizado separadamente, porém organizadas, de forma a coincidir os nós da interface, possibilitando o acoplamento entre tais conjuntos por meio desses nós. As Figuras 6.7 a 6.10 apresentam os modelos analisados nesta pesquisa (Modelos I, II, III e IV), discretizado via elementos finitos, por meio do emprego do programa computacional Ansys (2009) e na Figura 6.11 apresenta-se o detalhe da malha do Modelo Estrutural II.

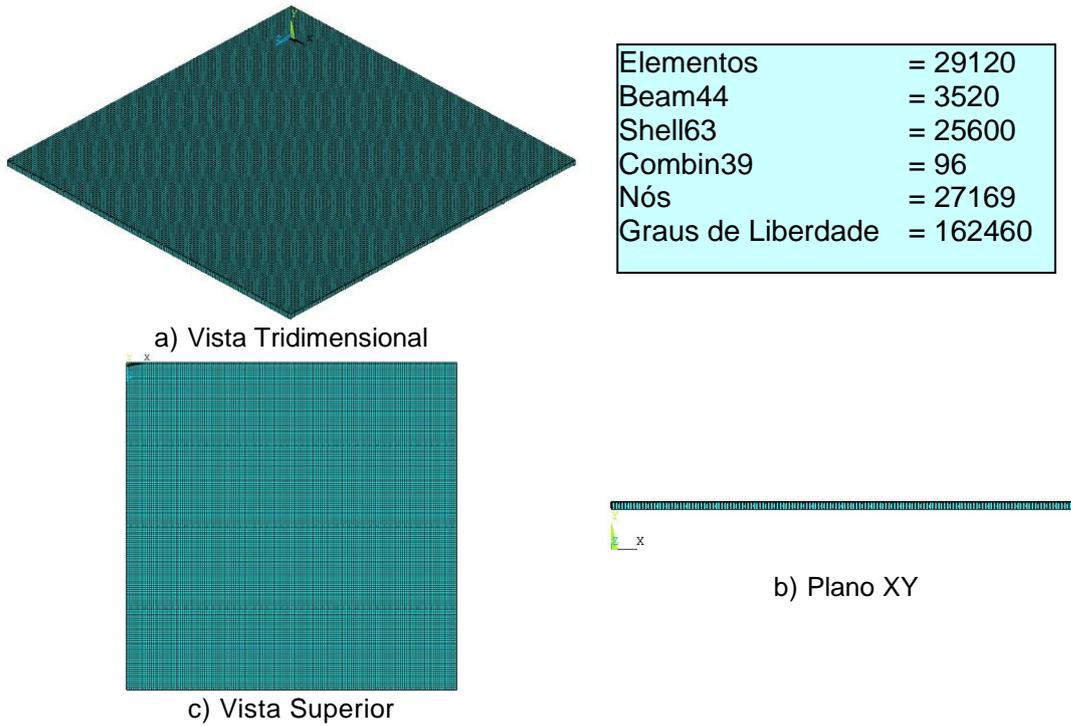


Figura 6.7 - Malhas de elementos finitos representativas do modelo estrutural I.

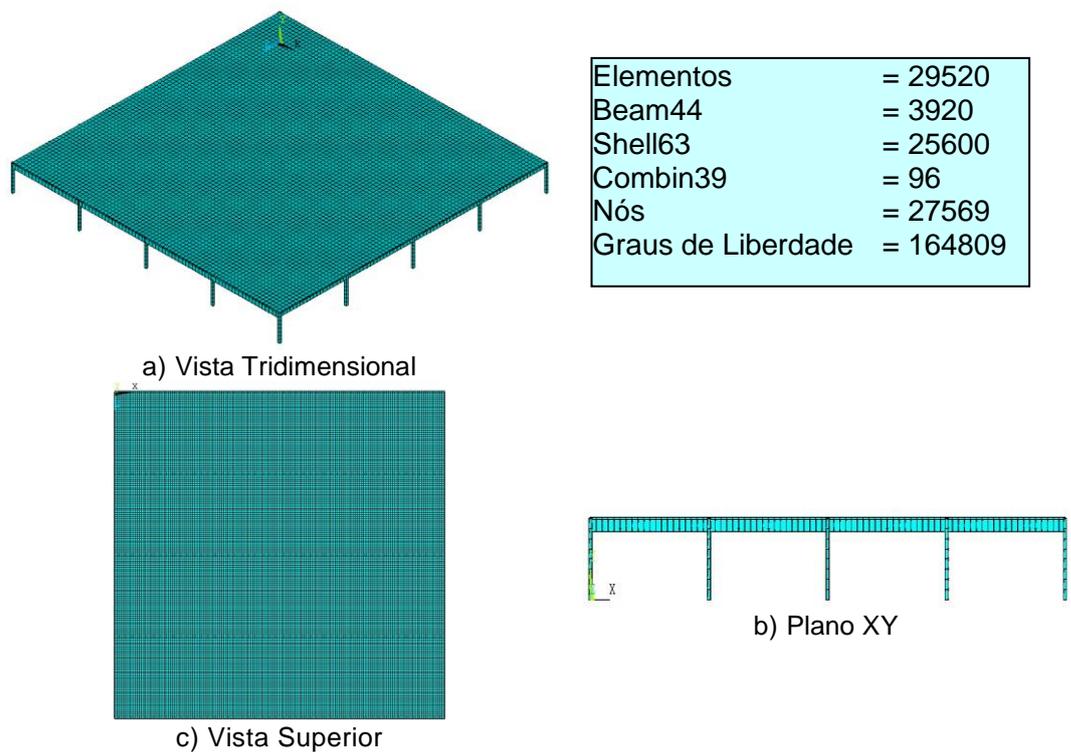


Figura 6.8 - Malhas de elementos finitos representativas do modelo estrutural II.

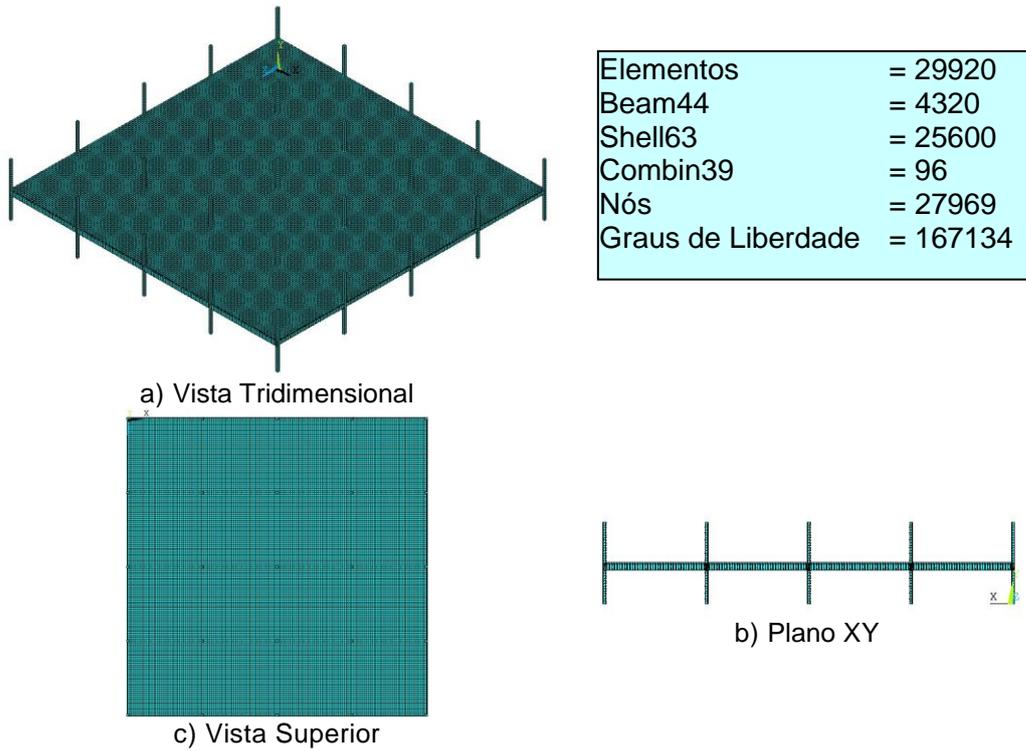


Figura 6.9 - Malhas de elementos finitos representativas do modelo estrutural III.

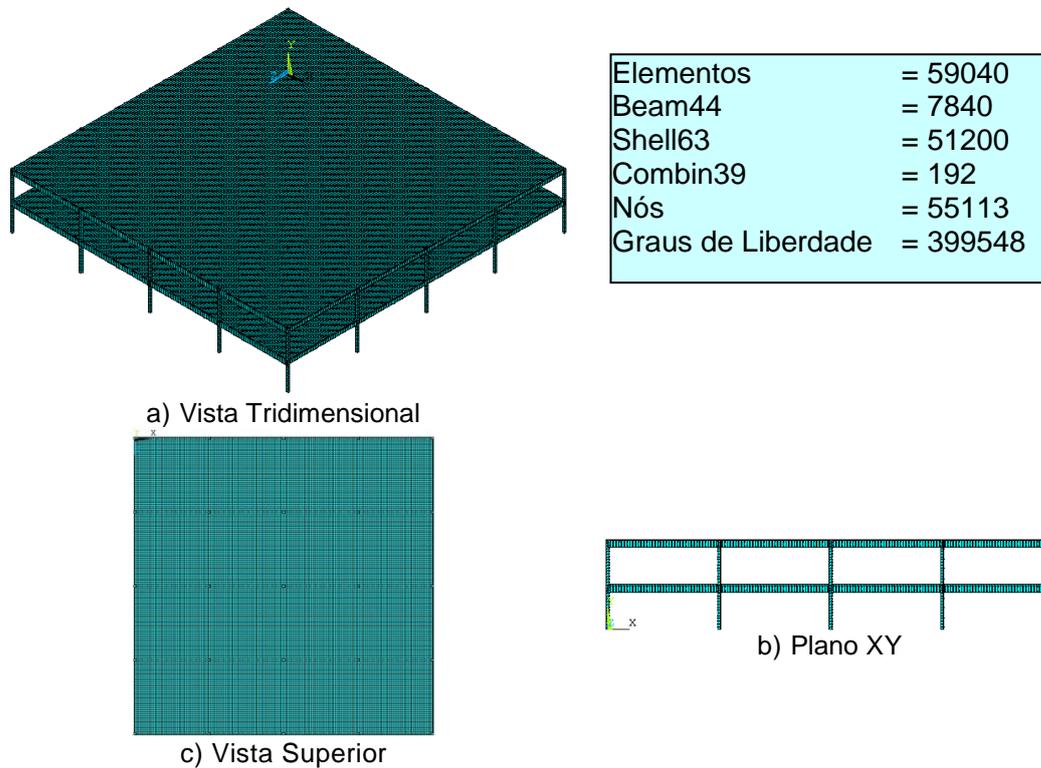


Figura 6.10 - Malhas de elementos finitos representativas do modelo estrutural IV.

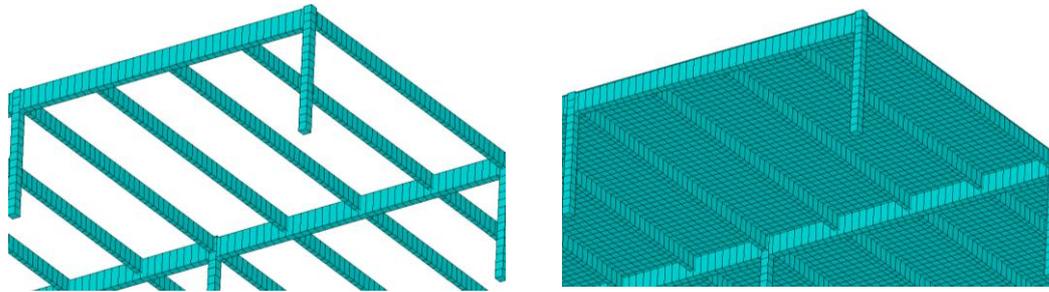


Figura 6.11 – Detalhe da malha de elementos finitos do modelo estrutural II.

## 6.5

### Modelagem da interação aço-concreto: interação total e parcial

Outro ponto importante a ser considerado na discretização do modelo numérico-computacional refere-se à metodologia utilizada para modelar a interação parcial e total ou completa. Neste caso a força de cisalhamento a ser transmitida na interface aço/concreto é o menor valor entre as forças resistidas pela laje de concreto em compressão ou pelo perfil de aço em tração. Para garantir que não haja deslizamento na interface entre os dois materiais, o número de conectores de cisalhamento utilizado deve ser capaz de resistir a essa força gerando o que se denomina de interação total ou completa.

O estudo proposto irá considerar alterações no número de conectores visando simular outros tipos de interações. Deste modo será utilizado um número de conectores menor do que o necessário, de forma a simular o comportamento da interação parcial. Para tal o um elemento de mola rotacional não linear será utilizado, para simular os conectores de cisalhamento studs bolts e os perfobond. A estrutura será modelada de forma que os nós da laje de concreto armado sejam coincidentes com os nós da viga de aço. Para melhor entendimento, a Figura 6.12 procura esclarecer o procedimento adotado.

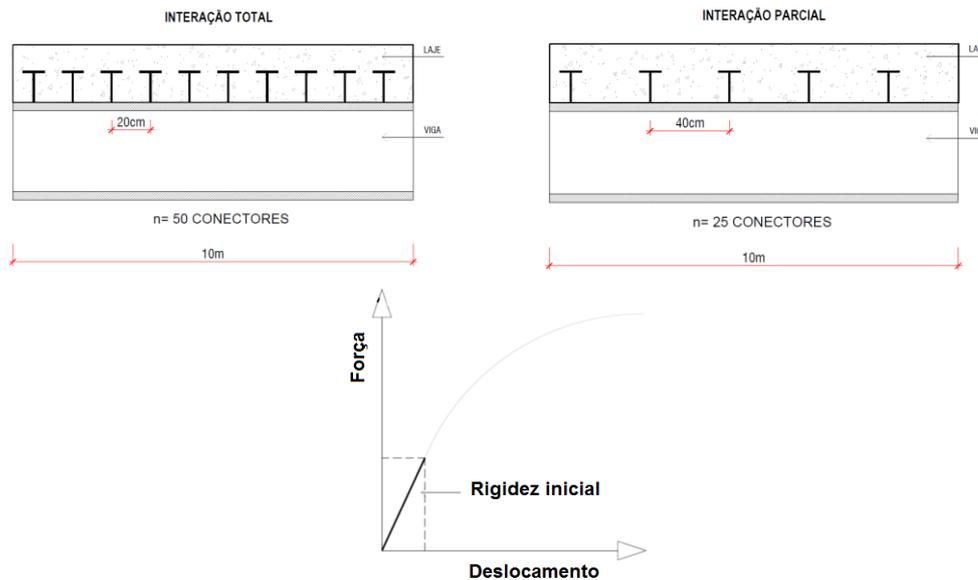


Figura 6.12 - Metodologia inicial proposta na modelagem das interações (parcial e total).

A partir do elemento finito COMBIN 39, Ansys (2009), realiza-se o acoplamento, vinculando o nó na mesa superior do perfil ao nó existente na parte inferior da laje de concreto. Esse acoplamento foi realizado sem que todos os graus de liberdade fossem compatibilizados, ou seja, o grau de liberdade na direção correspondente ao deslizamento da laje sobre o perfil foi liberado, conforme ilustrado na Figura 6.13. Dessa forma, foi possível, a partir das curvas, força *versus* deslizamento, obtidas a partir de ensaios experimentais realizados por (Tristão 2002; Ellobody 2005; Lam *et al.* 2005; e Vianna 2009), Figuras 5.10 a 5.13 do capítulo 5, implementar a rigidez real do conector na direção do deslizamento da laje sobre o perfil.

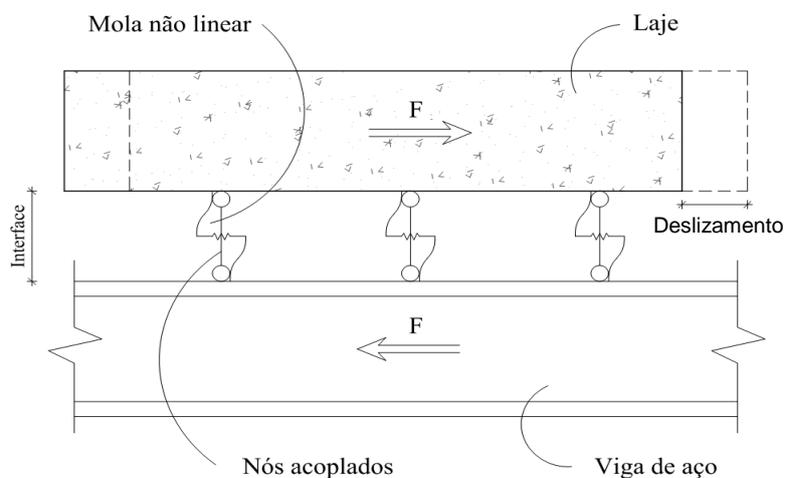


Figura 6.13 - modelagem dos conectores.

No que concerne ao espaçamento entre os conectores, esse varia de acordo com o tipo de conector utilizado. No modelo com conectores Studs de 19mm de diâmetro, foram utilizados 200 conectores de cisalhamento nas vigas secundárias, simulando uma interação total e espaçados a cada 200mm. Quando se considera as vigas principais, o espaçamento é de 125mm. A Tabela 6.1 apresenta o tipo de conector considerado, a quantidade e o espaçamento entre os mesmos simulando os efeitos de uma interação total.

Tabela 6.1 – Espaçamento entre os conectores

Tipo de Conector	Número de Conectores por Viga		Espaçamento (mm)	
	Vigas Secundárias	Vigas Principais	Vigas Secundárias	Vigas Principais
Stud 13mm	112	180	178	111
Stud 16mm	72	116	278	172
Stud 19mm	50	80	200	125
Perfobond	16	26	625	384

## 6.6

### Modelagem das ligações viga-coluna e viga-viga

Para simular o comportamento das ligações semirrígidas e flexíveis entre as vigas principais e as vigas secundárias, bem como, as ligações semirrígidas entre as vigas principais e as colunas no eixo de maior inércia, as ligações nos modelos computacionais foram criadas a partir da superposição de nós, sendo que um nó pertence à viga principal e outro à viga secundária, para as ligações viga-viga. No caso de ligações viga-coluna um nó pertence à viga principal e outro à coluna, Figura 6.14.

No caso das ligações semirrígidas, é feito o acoplamento nas direções x, y e z, porém não compatibilizando todos os graus de liberdade. Para tanto, o grau de liberdade referente à rotação no eixo onde se dá a flexão da viga foi liberado, e inserido entre os nós, um elemento finito de mola rotacional, COMBIN39, Ansys (2009), Figura 6.5, que incorpora os efeitos da não linearidade geométrica e da rigidez real da ligação, conforme apresentado nas Figuras 5.7 e Figura 5.8 do capítulo 5, obtidos a partir de ensaios experimentais realizados por Oliveira. (2005) e Carvalho (2007).

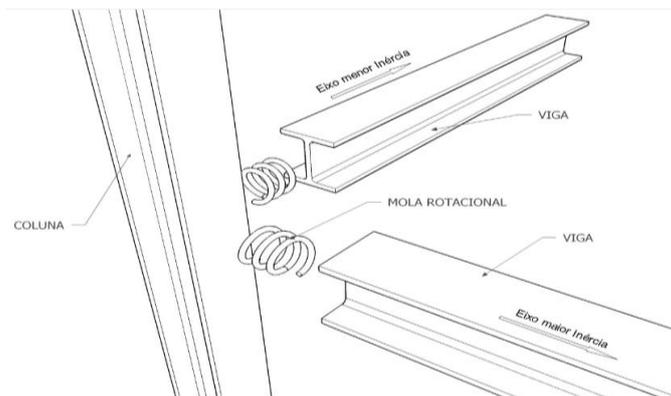


Figura 6.14 - Representação esquemática da ligação viga-coluna.

## 6.7 Modelagem do amortecimento estrutural

Denomina-se amortecimento o processo pelo qual a energia do movimento vibratório é dissipada. Todavia, a avaliação do amortecimento estrutural é uma tarefa complexa que não pode ser determinada através da geometria da estrutura, das dimensões dos elementos estruturais e do amortecimento dos materiais, segundo Clough e Penzien (1993).

Segundo Chopra (2007), é impossível determinar a matriz de amortecimento de um sistema estrutural através das propriedades de amortecimento de cada elemento que compõe a estrutura da maneira como é determinada a matriz de rigidez, por exemplo. Isso ocorre porque, ao contrário do módulo de elasticidade, que é utilizado na computação da rigidez, as propriedades de amortecimento dos materiais não são bem estabelecidas.

Ainda que essas propriedades fossem conhecidas, de acordo com Chopra (2007), a matriz de amortecimento resultante não levaria em conta uma parte significativa da energia dissipada através do atrito nas ligações em estruturas metálicas, abertura e fechamento de micro fissuras no concreto, atrito entre a estrutura e outros elementos que estejam acoplados à mesma, tais como alvenaria, divisórias, equipamentos mecânicos, proteção contra incêndio, etc. Algumas dessas fontes de dissipação de energia são extremamente difíceis de serem identificadas.

A avaliação física do amortecimento de uma estrutura só é considerada corretamente medida se seus valores são obtidos através de ensaios experimentais. Entretanto, a realização destes ensaios muitas das vezes demanda tempo e custo, que na maioria dos casos é muito elevado. Por essa

razão, o amortecimento é geralmente obtido em termos de taxas de contribuição, ou taxas de amortecimento modal, Clough e Penzien (1993).

Com este intuito, é habitual utilizar-se a matriz de amortecimento de Rayleigh, que considera duas parcelas, uma relativa à taxa de contribuição da matriz de massa ( $\alpha$ ) e outra relativa à taxa de contribuição da matriz de rigidez ( $\beta$ ), conforme pode ser observado a seguir. Define-se  $M$  a matriz de massa e  $K$  a matriz de rigidez do sistema, Craig Jr.(1981), Clough e Penzien (1993) e Chopra (2007).

$$C = \alpha M + \beta K \quad (6.1)$$

A equação anterior pode ser reescrita, em termos de taxa de amortecimento modal e frequência natural circular (rad/s), como:

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2 \omega_{0i}} + \frac{\beta \omega_{0i}}{2} \quad (6.2)$$

Em que:

$\xi_i$  = Taxa de amortecimento do  $i$ -ésimo modo;

$\omega_{0i}$  = Frequência natural circular referente ao  $i$ -ésimo modo.

Isolando  $\alpha$  e  $\beta$  da equação 6.2, para duas frequências naturais mais importantes, obtêm-se as equações 6.3 e 6.4.

$$\alpha = 2 \xi_1 \omega_{01} - \beta \omega_{01} \omega_{01} \quad (6.3)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2 \omega_{02} - \xi_1 \omega_{01})}{\omega_{02} \omega_{02} - \omega_{01} \omega_{01}} \quad (6.4)$$

A partir de duas frequências naturais mais importantes é possível descobrir os valores de  $\alpha$  e  $\beta$ . Em geral, a frequência natural  $\omega_{01}$  é tomada como a menor frequência natural, ou frequência fundamental da estrutura, e  $\omega_{02}$  como a segunda frequência mais importante no carregamento.

Na literatura, encontram-se diversos valores e dados sobre o amortecimento estrutural. Muitas vezes, entretanto, estes valores aparecem com grande variabilidade, o que dificulta sua utilização em projetos estruturais nos

quais se deseja atingir certo grau de sistematização. Além disso, face à grande variedade de formas de se considerar o amortecimento estrutural nos programas de análise numérica, as quais, caso sejam utilizadas de forma incorreta, fornecem resultados que não correspondem a uma situação real.

O AISC (2003) apresenta valores recomendados de amortecimento viscoso para estruturas, conforme apresentado na Tabela 6.2. Com base em ensaios numéricos realizados em trabalhos de pesquisas anteriores (Vianna 2009; Mello 2009 e Gonçalves 2012), foi utilizado um coeficiente de amortecimento de 1,0% ( $\xi = 1,0\%$  ou 0,01) em todos os modelos. Essa taxa leva em conta a existência de poucos elementos que contribuem com o amortecimento da estrutura e, o intervalo de tempo utilizado para integração das equações de movimento foi de 0,05s para as análises harmônicas e 0,002s para as análises transientes.

Tabela 6.2 – Valores recomendados de taxas de amortecimento  $\xi$  AISC (2003).

Tipo de construção	Amortecimento $\xi$
Escritórios, residências e igrejas	0,02 – 0,05
Shopping centers	0,02
Passarelas internas	0,01
Passarelas externas	0,01

A que ressaltar também, que a modelagem numérica foi validada com base nas análises numéricas realizadas em trabalhos de pesquisas anteriores apresentadas por Vianna (2009) e Mello (2009), em que foi usada a mesma estratégia de modelagem e com resultados satisfatoriamente concordantes com os sinais experimentais obtidos por Oliveira (2005) e Queiroz *et al.*(2007). Os testes numéricos executados com êxito por Oliveira (2005) e Queiroz *et al.*(2007), ilustram o comportamento do sistema misto que foi aqui investigado.

## 6.8 Desempenho computacional

Com o intuito de relatar as experiências adquiridas acerca do desempenho computacional obtido durante o desenvolvimento do referido trabalho de pesquisa, são apresentados os tempos médios de processamento necessário para obtenção dos resultados numéricos dos modelos de piso misto em estudo.

As análises computacionais foram realizadas em um computador com processador Intel (R) Core (TM) i7, com 16 GB de memória RAM e disco rígido

de 1 TB. O software utilizado nas análises foi o Ansys (2009) na versão 12.1, rodando sobre o sistema operacional Windows 7 profissional.

O tempo gasto para obtenção dos resultados das análises estática e modal para o modelo de piso misto (Modelo Estrutural II), variando o tipo de ligações viga-coluna e viga-viga (rígida, semirrígida e flexível), foi inferior a 5 minutos. Na análise harmônica esse tempo foi de 50 minutos. Na análise transiente o tempo gasto para obtenção dos resultados variou em torno de 10 horas.

No capítulo a seguir, serão apresentadas as análises de frequências e modos de vibração dos modelos numérico-computacionais adotados no presente estudo e suas respectivas características, considerando-se os regimes de interação parcial e total.