



TÉCNICO
LISBOA

Avaliação Sísmica e Reforço de Edifícios Antigos de Alvenaria

Parte 4

Mário Lopes e Rita Bento

6 de Junho de 2013

FUNDEC

Modelação Linear

1 – Utilidade

2 – Propriedades dos materiais

3 – Modelo matemático

3.1 – Edifício exemplo

3.2 – Geometria e Elementos Finitos

3.3 – Massas

4 – Calibração

5 – Principais dificuldades



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

1 – Utilidade

Análise até à rotura: em geral a análise linear é insuficiente, a não ser que o comportamento da estrutura seja bastante frágil \Rightarrow rotura ocorre pouco depois da fase linear

Projecto: pode ser suficiente para verificar esforços e tensões em regime linear, se o comportamento não linear, caso seja relevante, possa ser considerado de forma aproximada.

Modelação linear pode ser 1º passo para a modelação em regime não linear.

2 – Propriedades dos materiais



TÉCNICO
LISBOA

Alvenaria Pedra

Propriedades dos Materiais

E [GPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	τ [MPa]	γ [kN/m ³]	Fonte	Descrição
1,02 – 1,44	2,0-3,0	0,053-0,077	0,035-0,051	20	NTC 2008	Alvenaria pedra irregular não cortada
0,69 – 1,05	1,0-1,8	0,03-0,048	0,02-0,032	19	NTC 2008	Alvenaria pedra irregular
1,23	2,5	0,065	0,04	20	Meireles 2012	Edifício Pombalino
0,9	1,3	0,039	0,026	19	Simões 2013	Edifício Gaioleiro
0,66					Lopes 1997	Ensaio monotónico até à rotura, fachada, Gaioleiro
		0,258 0,024	0,258 0,024		Jelena et al, 2013	Ensaio compressão diagonal cal hidráulica cal aérea
1,64 0,56					Jelena et al, 2012	Ensaio de compressão cal hidráulica cal aérea
1,76 0,45	0,91 0,54				Simões et al, 2012	Macacos Planos Pombalinos Gaioleiros

FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Alvenaria Pedra

Propriedades dos Materiais

E [GPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	τ [MPa]	γ [kN/m³]	Fonte	Descrição
1,02 – 1,44	2,0-3,0	0,053-0,077	0,035-0,051	20	NTC 2008	Alvenaria pedra irregular não cortada
0,69 – 1,05	1,0-1,8	0,03-0,048	0,02-0,032	19	NTC 2008	Alvenaria pedra irregular
1,0	1,3	0,039	0,026	19,4	Frazão 2013	Edifício Gaioleiro
3,2 1,1	3,0 1,5	0,077 0,048	0,050 0,026	22 19	Delgado 2013	Edifício Gaioleiro (Quartel de Bombeiros) Pedra Regular Pedra Irregular
3,0	4,0	0,08	0,051	22	Monteiro 2012	Edifício Placa
1,5	3,0	0,077	0,051	19	Miranda 2013	Edifício Placa



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Alvenaria Tijolo Maciço

Propriedades dos Materiais

E [GPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	τ [MPa]	γ [kN/m³]	Fonte	Descrição
1,2 – 1,8	2,4–4,0	0,09-0,138	0,06-0,092	18	NTC 2008	Alvenaria tijolo maciço
1,5	3,2	0,114	0,076	18	Simões 2013	Edifício Gaioleiro
-	-	-	-	-	Frazão 2013	Edifício Gaioleiro
1,7	3,2	0,13	0,076	18	Delgado 2013	Edifício Gaioleiro
1,3	4,0	0,10	0,10	15	Monteiro 2012	Edifício Placa
1,4	2,9	0,106	0,071	18	Miranda 2013	Edifício Placa



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Alvenaria Tijolo Furado

Propriedades dos Materiais

E [GPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	τ [MPa]	γ [kN/m³]	Fonte	Descrição
1,2-18				12	NTC 2008	Alvenaria tijolo furado
1,20	2,40	0,09	0,060	12	Simões 2013	Edifício Gaioleiro
1,5	2,4	0,09	0,06	12,2	Frazão 2013	Edifício Gaioleiro
1,3	2,4	0,09	0,06	12	Delgado 2013	Edifício Gaioleiro (Quartel de Bombeiros)
-	-	-	-	-	Monteiro 2012	Edifício Placa
1,1	2,4	0,09	0,06	12	Miranda 2013	Edifício Placa



TÉCNICO
LISBOA

Alvenaria Blocos Cimento Propriedades dos Materiais

E [GPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	τ [MPa]	γ [kN/m ³]	Fonte	Descrição
2,4 – 3,52	3,0-4,4	0,027-0,036	0,018-0,024	14	NTC 2008	Alvenaria blocos de cimento (furos<45%)
2,0	4,0	0,5	0,25	14	Monteiro 2012	Edifício Placa
1,8	3,0	0,5	0,18	14	Miranda 2013	Edifício Placa

FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

3 – Modelo Linear

FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

3 – Modelo linear

3.1 – Edifício exemplo —Quartel de Bombeiros (1901)



Avaliação Sísmica e Reforço de Edifícios Antigos de Alvenaria



TÉCNICO
LISBOA

3.1 Descrição do Quartel

- Duas paradas ao mesmo nível (Parada Inferior e Parada das Oficinas) e outra a Poente e a cota superior (suportada por terrapleno de 6 metros de altura)
- As Paradas Inferior e das Oficinas comunicam-se através de um túnel
- Viaturas operacionais albergadas na zona Este do Aquartelamento
- Num patamar superior à Parada Superior encontram-se uma piscina, um balneário e um campo de jogos



FUNDEC

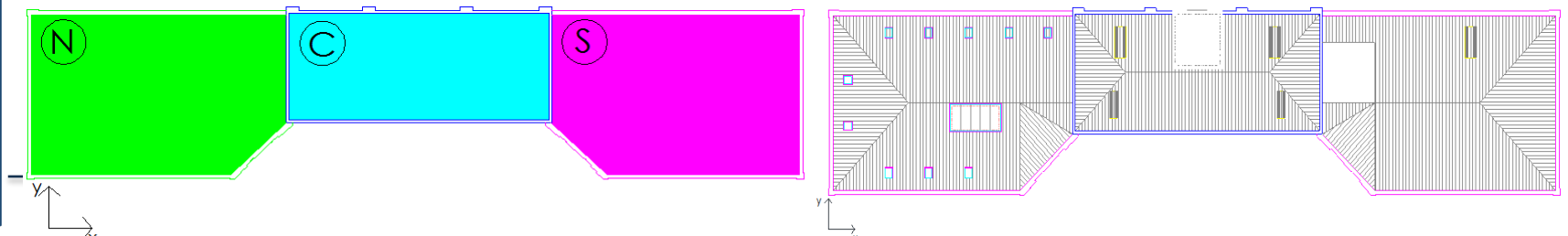


TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

3.1 Descrição do Quartel

- Formado por três “blocos independentes”: Norte, Central e Sul
- “Bloco” Norte ($h=19,8$ m): Sub-Cave, Piso Térreo, Dois Elevados e Mansarda
- “Bloco” Central ($h=26,5$ m): Piso Térreo, Quatro Elevados, Mansarda e Claraboia
- “Bloco” Sul ($h=18,8$ m): Piso Térreo, Dois Elevados e Mansarda
- Exteriormente, o edifício é simétrico em relação à direção y . Interiormente, a disposição dos elementos estruturais é muito assimétrica





TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

3.2 Geometria e elementos Finitos

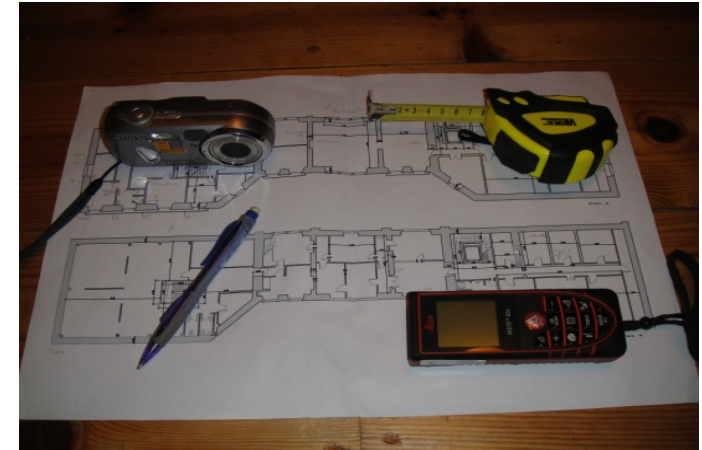


TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Antes da Modelação do Edifício

- Deslocação ao local para um 1º contacto
- Consulta bibliográfica sobre história do edifício
- Consulta nos Arquivos Municipais: não há memória descritiva de acesso público
- Realização de ensaios in situ (não destrutivos no caso, pois o edifício está em serviço)
- Visitas ao edifício para uma melhor percepção do edifício e dos materiais



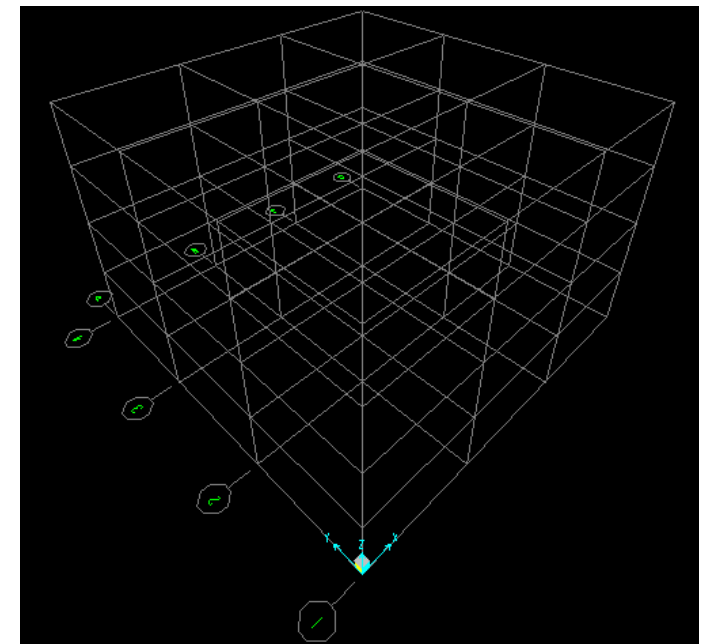


TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Modelação do Edifício (Análise Linear)

- **Estudo criterioso das plantas de Arquitetura do edifício, identificando os elementos estruturais e sua localização**
- **Escolha dos elementos finitos a utilizar**
- **Definição das paredes estruturais e suas aberturas**
- **Definição dos pavimentos tendo em conta a malha das paredes e o facto do pavimento não ser rígido**
- **Definição das paredes não estruturais**



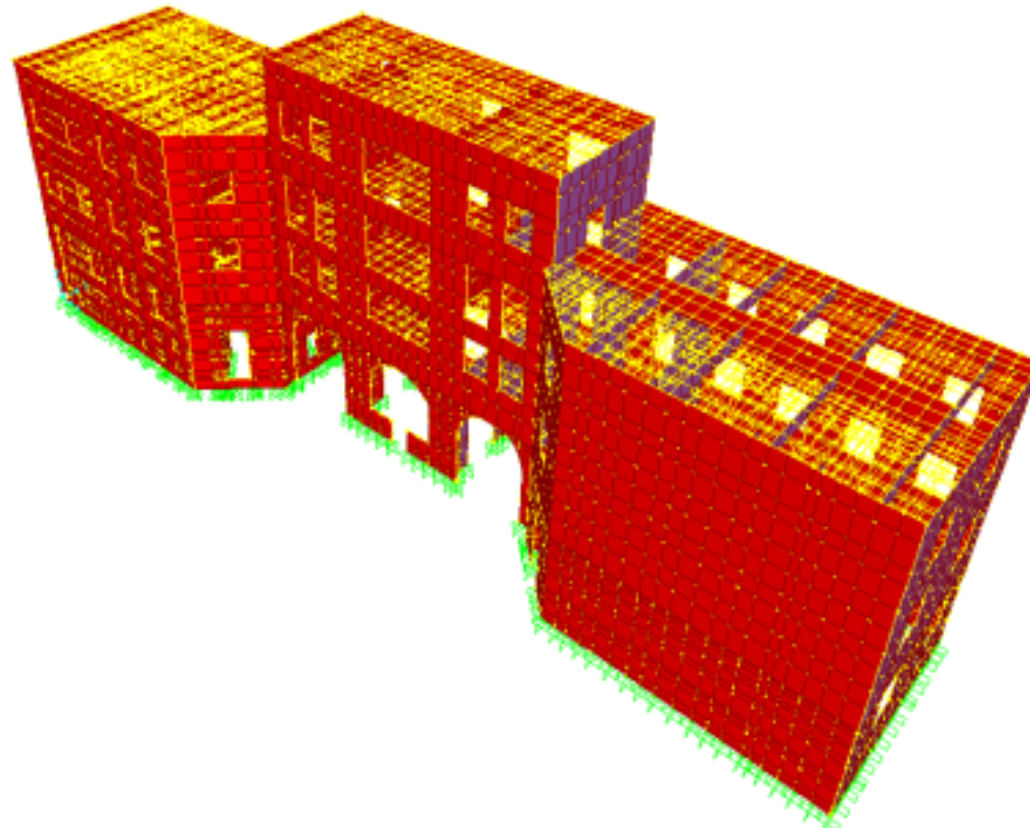


TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Modelação do Edifício (Análise Linear)

Simplificação de partes do edifício em que não haja conhecimento detalhado da sua construção e características. Por exemplo: cobertura, escadas, elevador, fundações.





TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

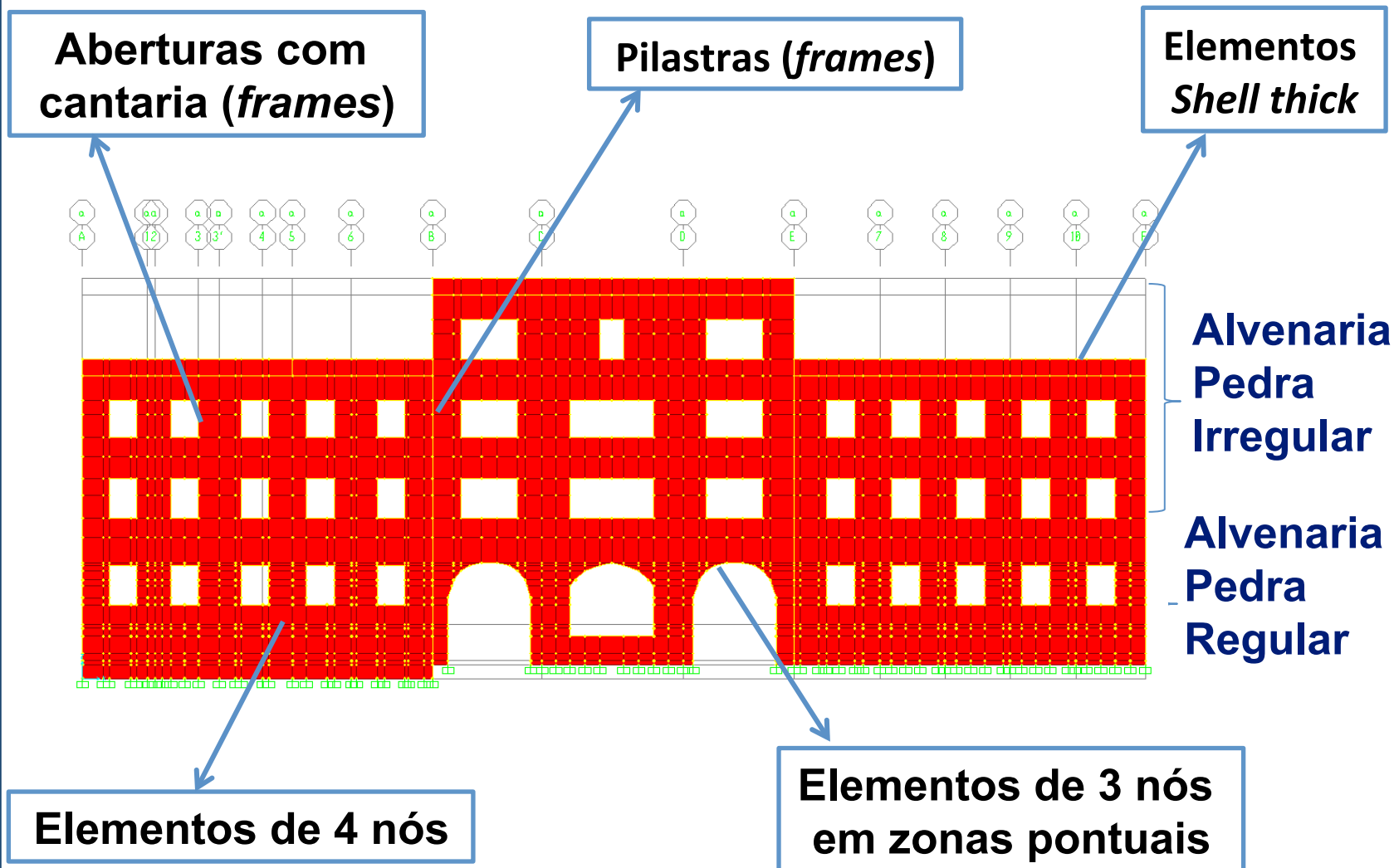
Definição das Paredes de Alvenaria

- Utilização dos elementos **Shell** (engloba o comportamento de membrana e placa, simultaneamente)
- Elementos **Shell** permitem simular a extensão no próprio plano e flexão na direção perpendicular
- **Shell thick** tem ainda em conta a deformação por esforço transversal
- Utilização de elementos com **4 nós** (melhores resultados)
- Poder-se-ia também usar elementos **Solid** mas o modelo ficaria demasiado complexo
- Contornos de aberturas em elementos **frame**, para representar as cantarias (em outros edifícios, no topo das aberturas existem arcos embutidos).



TÉCNICO
LISBOA

Definição das Paredes Exteriores



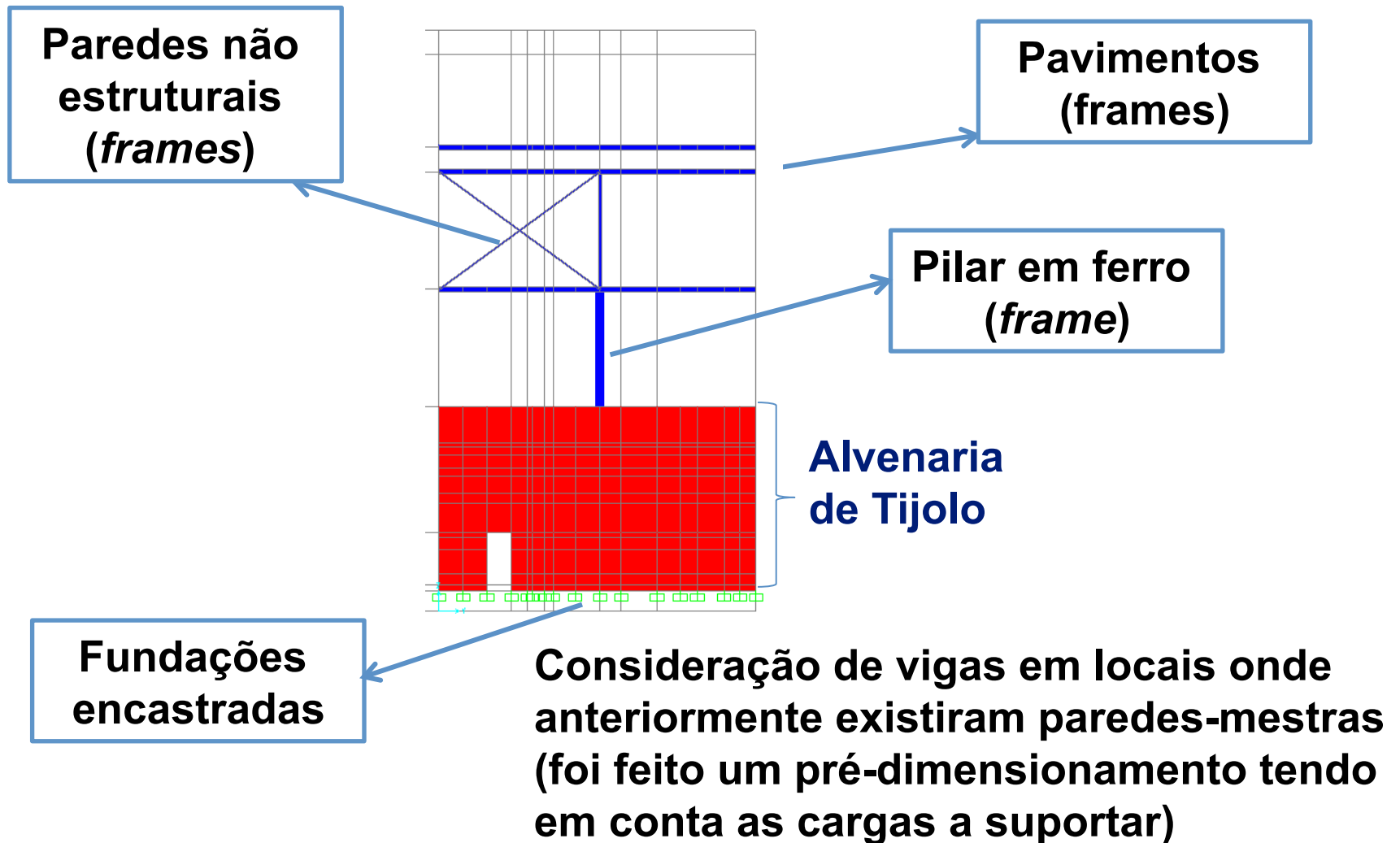
FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Definição das Paredes Interiores



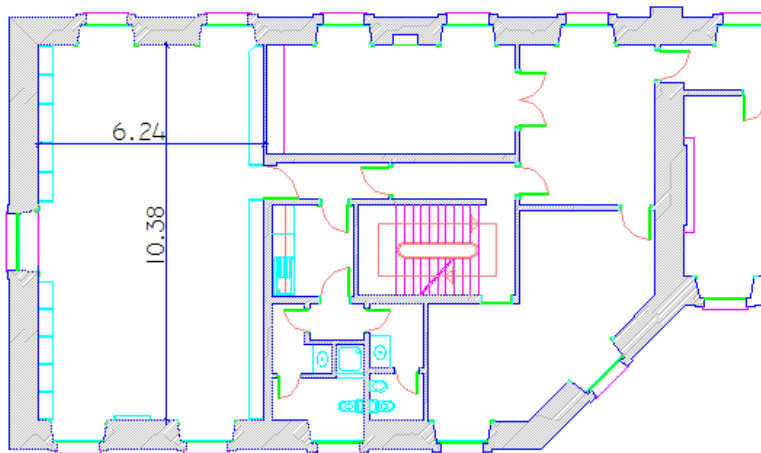


TÉCNICO
LISBOA

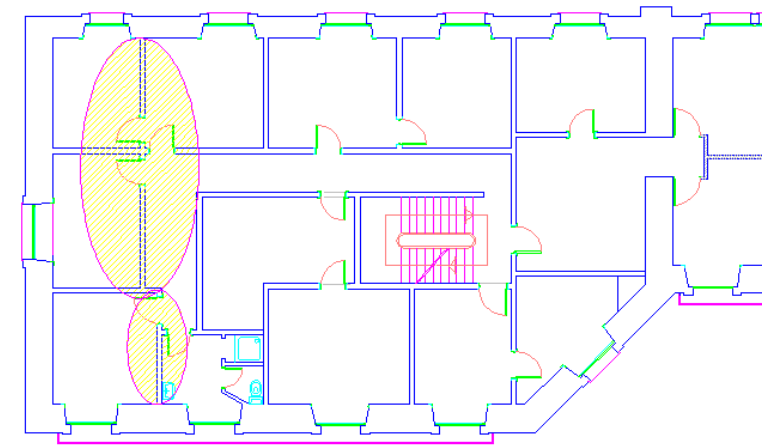
Definição das Paredes Interiores

O que fazer com a descontinuidade das paredes entre pisos?

Modos locais: será a sua eliminação importante?



Pormenor da Planta do Piso 1



Pormenor da Planta do Piso 2

**Colocação de vigas sob as paredes \Rightarrow confirmar no local
(implica remover tectos falsos)**

FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Pavimentos – Uma Modelação Questionável...

Considerar os barrotes como elementos *frame* de inércias nulas?

Simular apenas a rigidez axial?

Grande debilidade das ligações entre vigamentos e paredes exteriores e interiores nos edifícios “gaioleiros” (Appleton, 2007)

Como modelar os tarugos?

Elementos *frame* são uma boa opção para os pavimentos não rígidos?

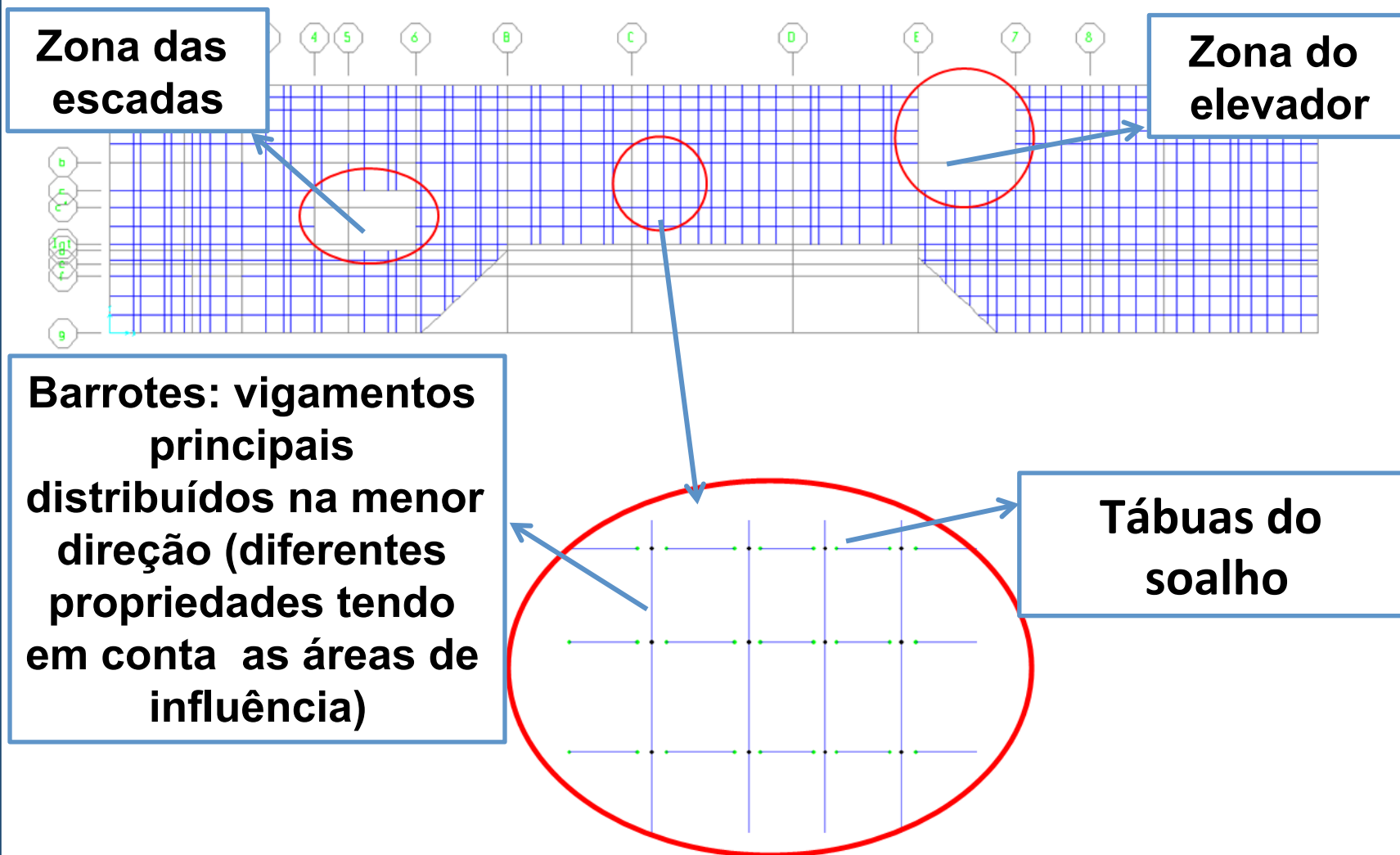
Transmissão de momentos deficitária: preferível simular os elementos como treliças?



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Pavimentos – Solução Adotada





TÉCNICO
LISBOA

Cobertura

- Pouco conhecimento da sua morfologia e não foi feita qualquer avaliação do seu estado
- Apenas interessa a sua rigidez axial (travamento das fachadas)



- Despreza-se a resistência/ rigidez que poderia conferir à estrutura, apenas participando em termos de massa

FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Escadas

Que efeitos se pretendem modelar? Como modelar?...

Não são relevantes na análise da estrutura

Definidas apenas pela massa nos nós das paredes que as rodeiam





TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Elevador

Que efeitos se pretendem modelar? Como modelar?...

Este elemento não é da construção de origem

Se houver falta de rigidez do pavimento, a caixa de elevador pode vibrar independentemente da estrutura

Optou-se por não modelar o elevador





TÉCNICO
LISBOA

3.3 Massas

Hipóteses debatidas:

- **Colocação das massas (distribuídas nos pisos do edifício real) apenas nos nós das paredes**
- **Consideração das massas distribuídas no pavimento**

FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

3.3 Massas

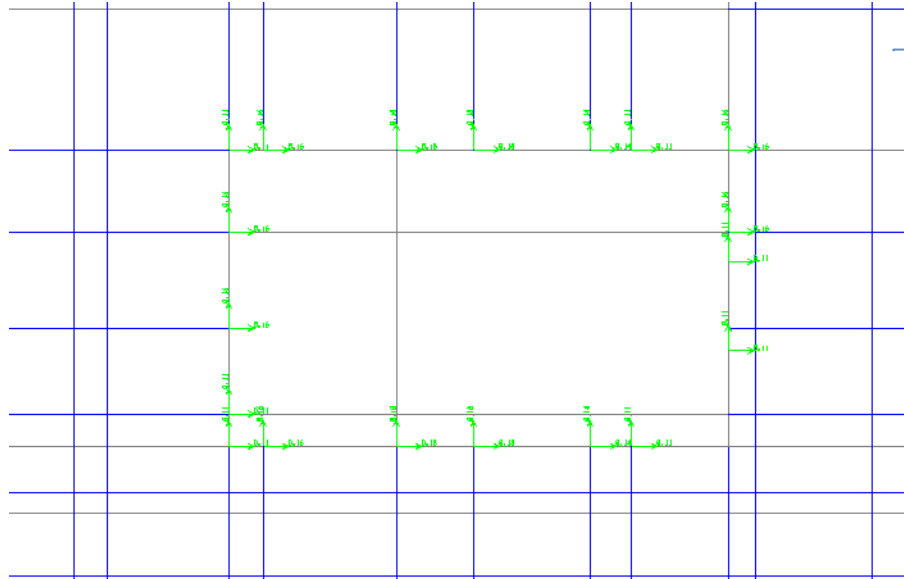
Decisões :

- A massa das paredes resistentes é modelada de forma distribuída a partir da massa volúmica dos materiais
- As massas de alguns elementos verticais não modelados explicitamente (escadas e estrutura de suporte da clarabóia) foram definidas nos nós constituintes das paredes
- As massas das paredes não estruturais foram distribuídas apenas nos nós de intersecção destas com os pavimentos para evitar modos locais sem significado físico.



TÉCNICO
LISBOA

3.3 Massas



Pormenor na planta na zona das escadas: localização das massas nos nós das paredes das escadas

Pavimentos: massas (apenas nas direções horizontais) distribuídas nos nós dos pavimentos. Poderiam ter sido concentradas apenas nos nós de intersecção com as paredes

FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

4 – Calibração

FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

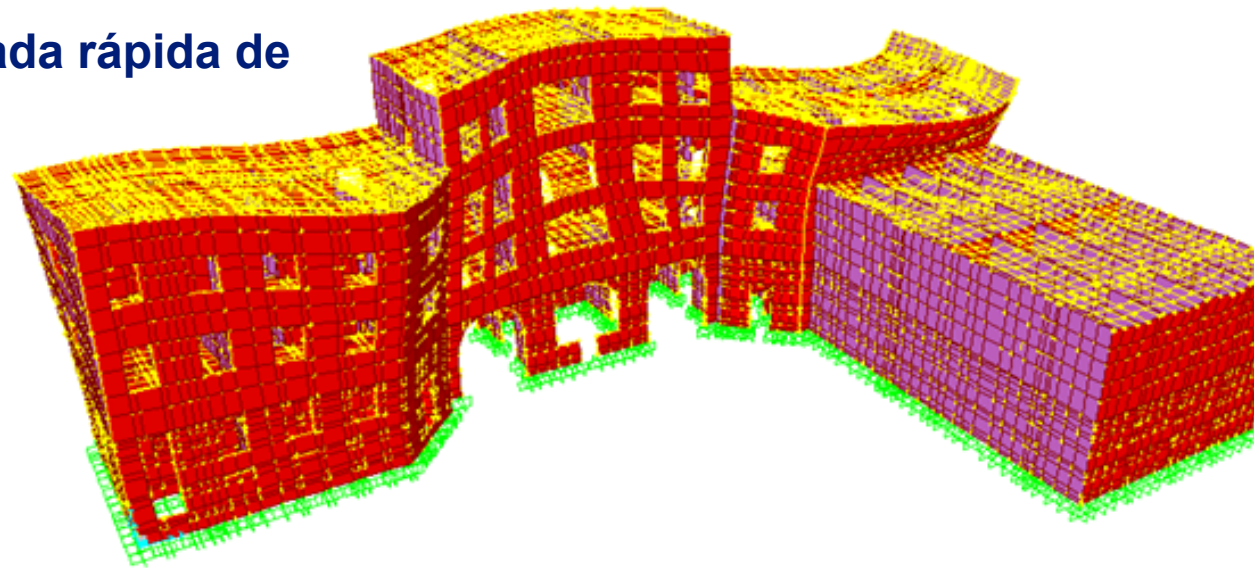
Calibração do Modelo

Como reduzir os erros dos resultados face à realidade?

Ensaio *in situ* de caracterização dinâmica

Determinação das frequências próprias fundamentais com base no método transformada rápida de

Fourier



Calibração do modelo tendo em conta as frequências do edifício real

FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

5 – Principais dificuldades

FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Dificuldades tidas em conta no Estudo do Edifício

- Degradação dos materiais (tempo de vida útil da estrutura já ultrapassado)
- Não existência de regulamentos definidores das propriedades dos materiais, apenas estudos anteriores de estruturas com esses materiais
- Escolha subjetiva sobre a forma mais adequada de modelar os elementos estruturais
- Os pavimentos não são rígidos e a massa distribuída em vãos muito compridos leva a modos locais
- Complexidade do edifício (mais difícil de modelar o que torna o modelo mais “pesado”)
- Quatro grandes alterações ao edifício e a existência de tectos falsos impede o conhecimento aprofundado do edifício



TÉCNICO
LISBOA

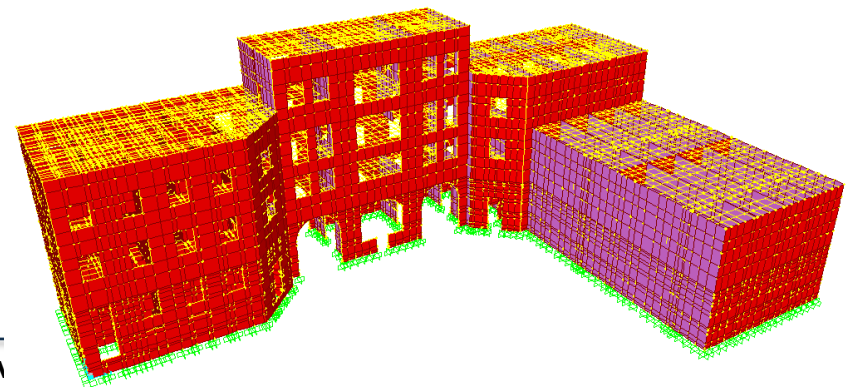
Dificuldade em Calibrar o Modelo

a) Qual a influência do edifício adjacente sobre a estrutura? Como modelá-lo?...

Considerou-se o edifício adjacente uma cópia do edifício estudado mas de apenas 2 pisos (porque são da mesma época de construção, semelhança de materiais e métodos construtivos)

Na modelação linear não há forma de os edifícios vibrarem independentemente

A possível utilização de molas entre as paredes dos 2 edifícios é difícil de calibrar



FUNDEC



TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Dificuldade em Calibrar o Modelo

b) Pisos Nobres têm paredes de qualidade superior?

- O levantamento fotográfico aponta para alvenaria de pedra regular nas paredes exteriores
- Conhecimento prestado pelos Bombeiros aponta na utilização de paredes de tijolo maciço no Piso Térreo
- Paredes interiores da Sub-cave são de grande espessura e de alvenaria de pedra
- Num projecto real estas questões têm de ser resolvidas com inspecções detalhadas, com remoção de rebocos, tectos falsos, etc.

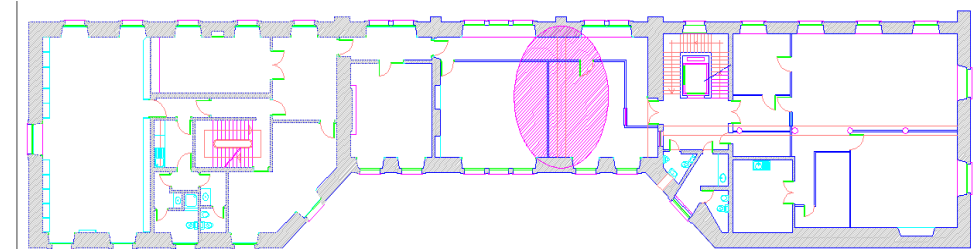
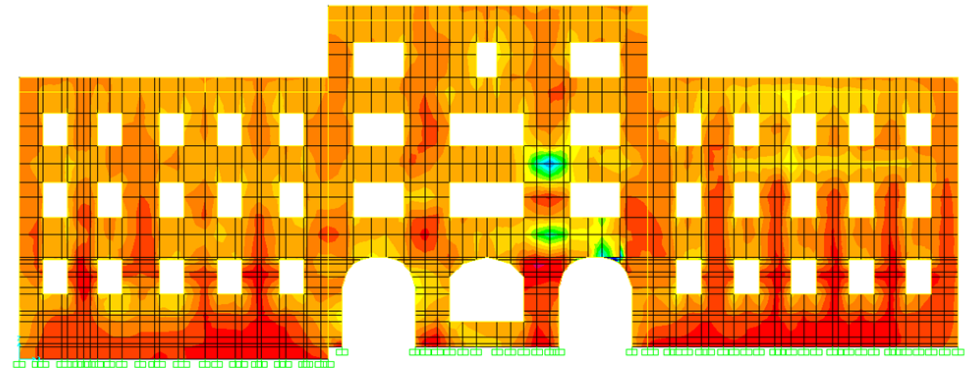


TÉCNICO
LISBOA

FUNDEC

Nó de Ligação da Viga à Parede de Fachada

- O modelo é apenas uma representação da realidade e não a própria realidade
- A concentração de tensões num único nó é pouco realista
- Há um problema de condições de fronteira entre a parede e a viga
- Na realidade as tensões não são tão intensas mas há um espalhamento pelos elementos em redor da viga



Planta do Piso 1



TÉCNICO
LISBOA

Avaliação Sísmica e Reforço de Edifícios Antigos de Alvenaria

Parte 4

Mário Lopes e Rita Bento

6 de Junho de 2013

FUNDEC