

MODELAÇÃO NÃO LINEAR DE EDIFÍCIOS

**Modelação por
Pórtico Equivalente**

**Rita Bento, António Gago,
Helena Meireles, Ana Simões**

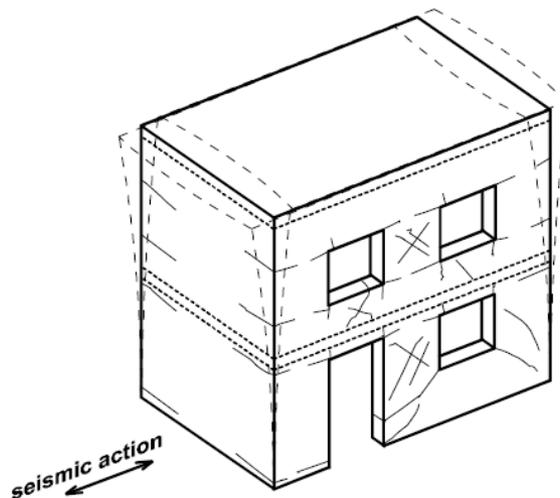
Modelação Não Linear de Edifícios

1. Modelação por Pórtico Equivalente
2. Programa 3Muri
 - 2.1. Discretização da Estrutura – Geometria
 - 2.2. Discretização da Estrutura – Elementos
 - 2.3. Análise Global da Estrutura
 - 2.4. Exemplos de Aplicação
3. Exemplo de modelação e análise estática não linear de uma Parede de Alvenaria em SAP2000
4. Referências

1. Modelação por Pórtico Equivalente

Observação de danos provocados por sismos passados em edifícios de alvenaria indica que a fendilhação se concentra essencialmente nos **nembos** (colunas) e **lintéis** (vigas). As zonas de ligação entre os elementos permanecem intactas.

(Tomažević e Weiss, 1990; D'Asdia e Viskovic, 1995; Brencich e Lagomarsino, 1998; Magenes e Della Fontana, 1998; Galasco et al., 2004)



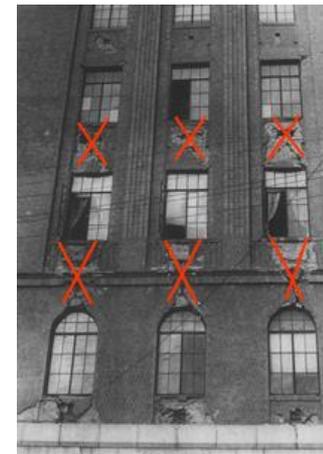
Comportamento Global do Edifício

(Magenes, 2007)



Nembos

(Lagomarsino e Cattari, 2009)

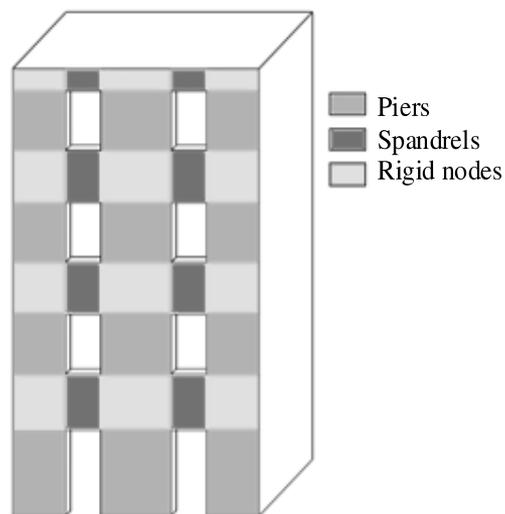


Lintéis

1. Modelação por Pórtico Equivalente

Observação de danos provocados por sismos passados em edifícios de alvenaria indica que a fendilhação se concentra essencialmente nos **nembos** (colunas) e **lintéis** (vigas). As zonas de ligação entre os elementos permanecem intactas.

(Tomažević e Weiss, 1990; D'Asdia e Viskovic, 1995; Brencich e Lagomarsino, 1998; Magenes e Della Fontana, 1998; Galasco et al., 2004)



Painéis de uma fachada

(Cattari et al., 2005)



Nembos (*piers*)

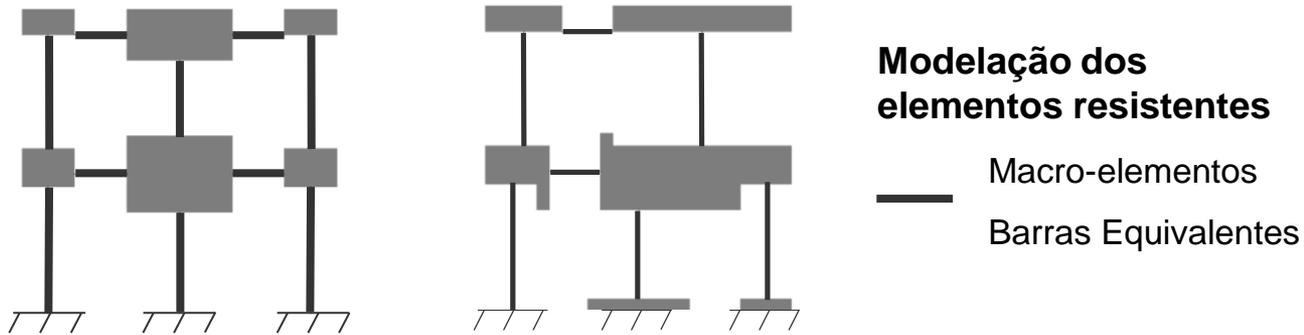
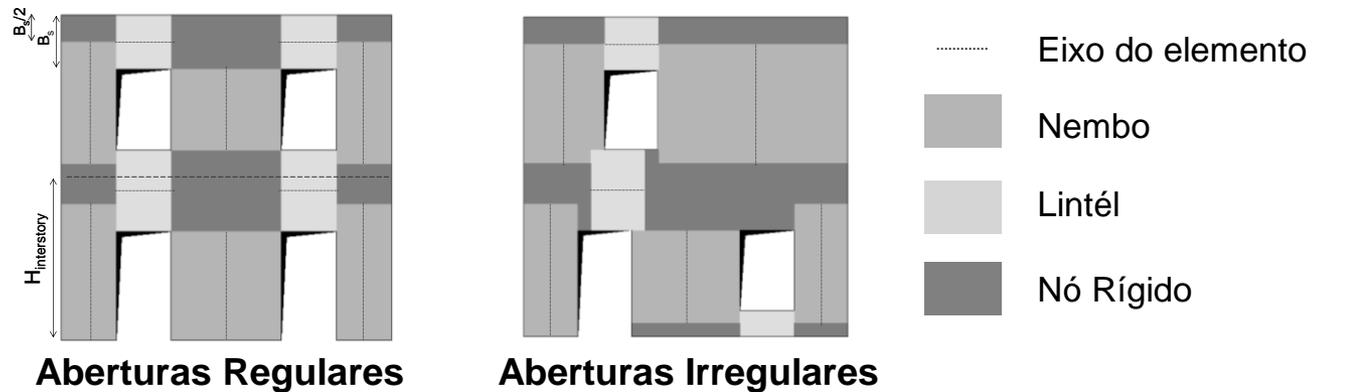
(Lagomarsino e Cattari, 2009)



Lintéis (*spandrels*)

1. Modelação por Pórtico Equivalente

A **geometria dos elementos** através de critérios convencionais baseados na distribuição das aberturas e propagação de fendilhação (critério empírico 30°) e calibrados através da observação de danos em edifícios e ensaios experimentais (ex.: Dolce, 1989; Benedetti et al., 1998; Calvi e Magenes, 1994; Yi et al., 2006).



Discretização por Pórtico Equivalente

(Lagomarsino e Cattari, 2009) 5/27

2. Programa 3Muri

- Desenvolvido pela *STA Data* (www.stadata.com) em cooperação com a Universidade de Génova (UNIGE, Itália).
- Análise estrutural e verificação da segurança de edifícios de alvenaria simples, armada ou mista com alvenaria/b.a./aço/madeira e reforçados com *FRPs*.

3Muri – Versão Comercial

Verificação da segurança sísmica através de análises estáticas não lineares (*pushover*) e análise modal da estrutura.

TreMuri (Galasco et al., 2009) – Versão Científica

Permite ainda efectuar análises dinâmicas com integração no tempo.

Referências Regulamentares: Eurocódigo 8, Regulamento Italiano NTC08



2. Programa 3Muri

- Desenvolvido pela *STA Data* (www.stadata.com) em cooperação com a Universidade de Génova (UNIGE, Itália).
- Análise estrutural e verificação da segurança de edifícios de alvenaria simples, armada ou mista com alvenaria/b.a./aço/madeira e reforçados com *FRPs*.

3Muri – Versão Comercial

Verificação da segurança sísmica através de análises estáticas não lineares (*pushover*) e análise modal da estrutura.

TreMuri (Galasco et al., 2009) – Versão Científica

Permite ainda efectuar análises dinâmicas com integração no tempo.

Referências Regulamentares: Eurocódigo 8, Regulamento Italiano NTC08



2. Programa 3Muri

- Desenvolvido pela *STA Data* (www.stadata.com) em cooperação com a Universidade de Génova (UNIGE, Itália).
- Análise estrutural e verificação da segurança de edifícios de alvenaria simples, armada ou mista com alvenaria/b.a./aço/madeira e reforçados com *FRPs*.

3Muri – Versão Comercial

Verificação da segurança sísmica através de análises estáticas não lineares (*pushover*) e análise modal da estrutura.

TreMuri (Galasco et al., 2009) – Versão Científica

Permite ainda efectuar análises dinâmicas com integração no tempo.

Referências Regulamentares: Eurocódigo 8, Regulamento Italiano NTC08



2. Programa 3Muri

- Desenvolvido pela *STA Data* (www.stadata.com) em cooperação com a Universidade de Génova (UNIGE, Itália).
- Análise estrutural e verificação da segurança de edifícios de alvenaria simples, armada ou mista com alvenaria/b.a./aço/madeira e reforçados com *FRPs*.

3Muri – Versão Comercial

Verificação da segurança sísmica através de análises estáticas não lineares (*pushover*) e análise modal da estrutura.

TreMuri (Galasco et al., 2009) – Versão Científica

Permite ainda efectuar análises dinâmicas com integração no tempo.

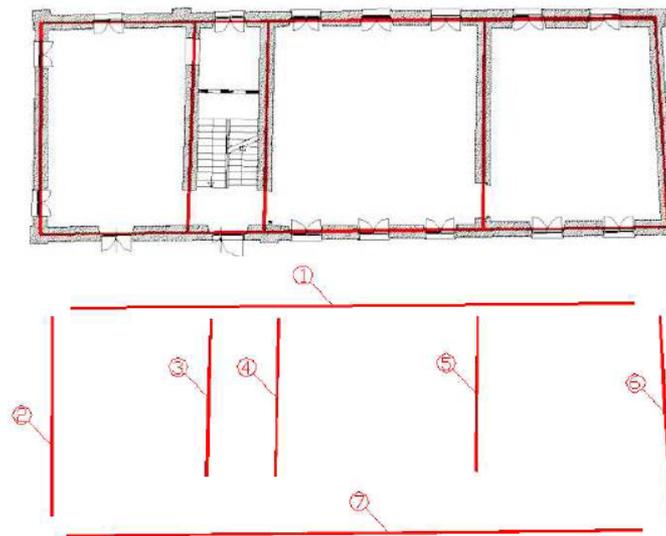
Referências Regulamentares: Eurocódigo 8, Regulamento Italiano NTC08



2. Modelação por Pórtico Equivalente

Discretização da Estrutura – Geometria

- Definição dos alinhamentos de paredes e aberturas por piso.



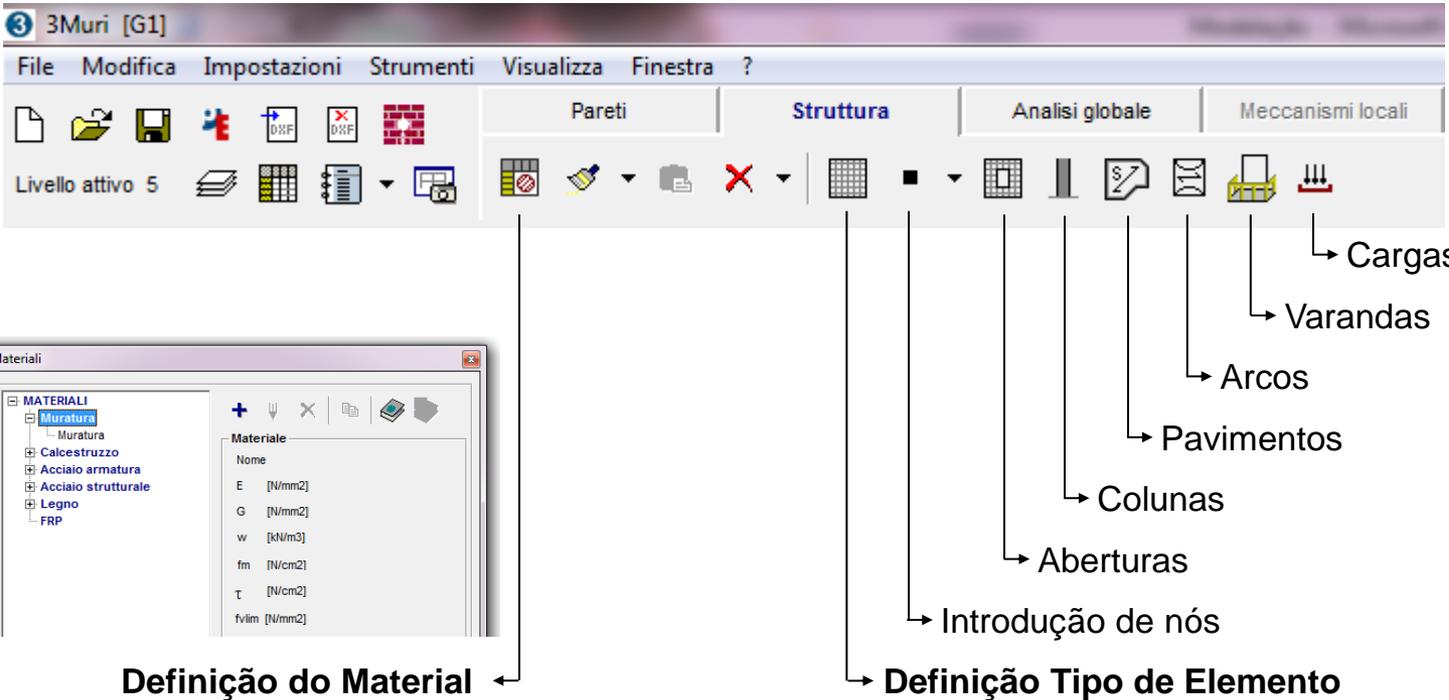
Importação de
ficheiros
DXF ou DWG

Definição dos alinhamentos das paredes.



2. Programa 3Muri

Discretização da Estrutura – Elementos



The screenshot shows the 3Muri software interface with the following components:

- Menu Bar:** File, Modifica, Impostazioni, Strumenti, Visualizza, Finestra, ?
- Toolbars:**
 - Top toolbar: Includes icons for file operations and a grid icon.
 - Second toolbar: Labeled 'Livello attivo 5', with icons for wall, floor, and column elements.
 - Third toolbar: Labeled 'Struttura', with icons for wall, floor, column, and opening elements.
 - Fourth toolbar: Labeled 'Analisi globale', with icons for global analysis and local mechanisms.
 - Fifth toolbar: Labeled 'Meccanismi locali', with icons for local mechanisms.
- Material Definition Dialog (Materials):**
 - Tree view: MATERIALI (Muratura, Calcestruzzo, Acciaio armatura, Acciaio strutturale, Legno, FRP).
 - Properties table:

Nome	
E	[N/mm ²]
G	[N/mm ²]
w	[tN/m ³]
f _m	[N/cm ²]
τ	[N/cm ²]
f _{vlm}	[N/mm ²]
- Element Type Definition Dialog (Definizione caratteristiche):**

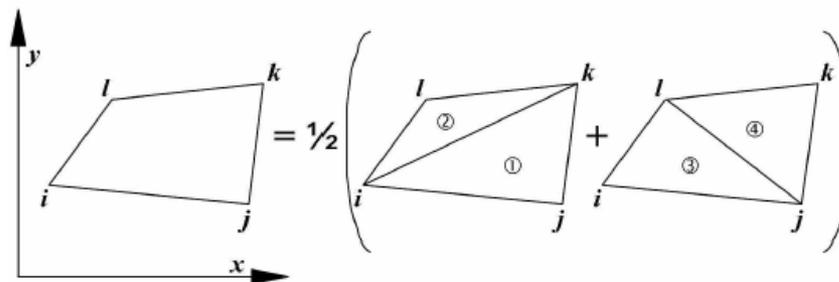
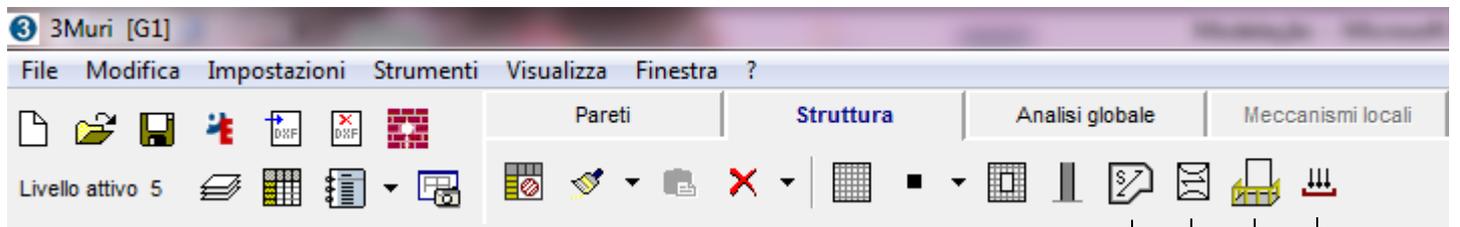
Pannello murario	Pannello + Cordolo C.A.	Pannello + Trave Acciaio / Legno			
Pannello + Catena	Setto C.A.	Trave C.A.	Trave Acciaio / Legno	Catena	Nessuna definizione

Arrows from the toolbar icons point to the following labels:

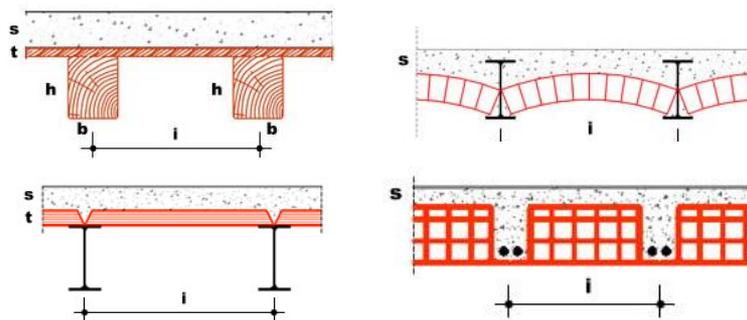
- Definição do Material:** Points to the 'Materials' dialog box.
- Definição Tipo de Elemento:** Points to the 'Definizione caratteristiche' dialog box.
- Cargas:** Points to the load icon in the 'Meccanismi locali' toolbar.
- Varandas:** Points to the balcony icon in the 'Meccanismi locali' toolbar.
- Arcos:** Points to the arch icon in the 'Meccanismi locali' toolbar.
- Pavimentos:** Points to the floor icon in the 'Analisi globale' toolbar.
- Colunas:** Points to the column icon in the 'Analisi globale' toolbar.
- Aberturas:** Points to the opening icon in the 'Analisi globale' toolbar.
- Introdução de nós:** Points to the node introduction icon in the 'Analisi globale' toolbar.

2. Programa 3Muri

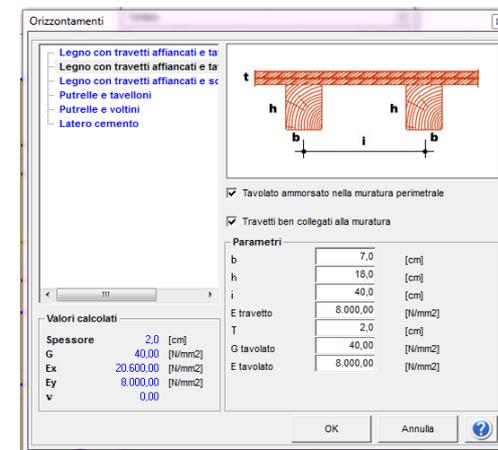
Discretização da Estrutura – Elementos



Elemento finito de membrana ortotrópicos com 3-4 nós

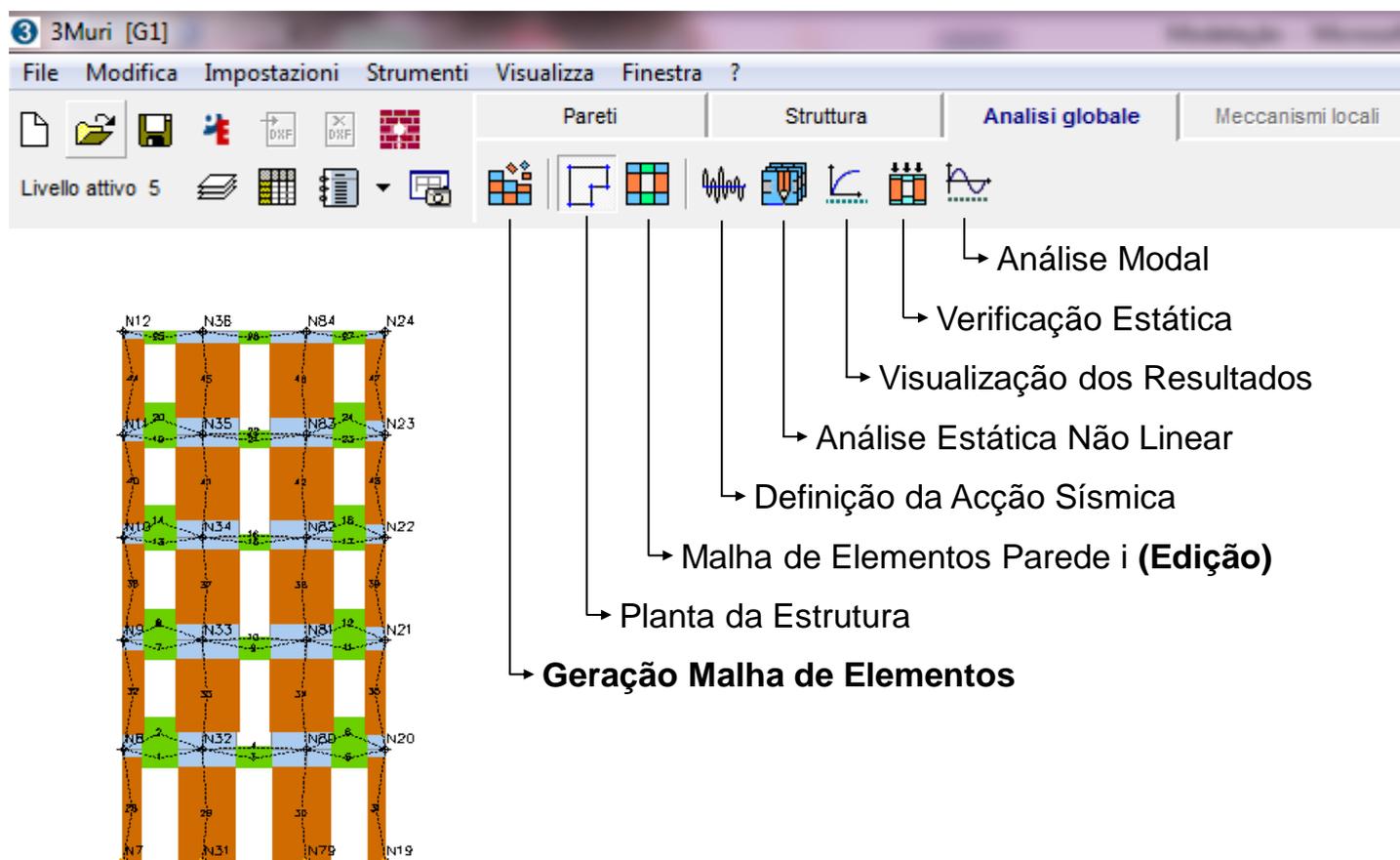


Cargas
Varandas
Arcos
Pavimentos



2. Programa 3Muri

Análise Global da Estrutura



The screenshot shows the 3Muri software interface. The menu bar includes 'File', 'Modifica', 'Impostazioni', 'Strumenti', 'Visualizza', and 'Finestra'. The toolbar contains various icons for file operations and analysis. The main window displays a structural model of a wall with nodes labeled N7 to N38. The 'Análise global' menu is open, showing options: 'Análise Modal', 'Verificação Estática', 'Visualização dos Resultados', 'Análise Estática Não Linear', 'Definição da Acção Sísmica', 'Malha de Elementos Parede i (Edição)', 'Planta da Estrutura', and 'Geração Malha de Elementos'. Arrows point from the menu items to the corresponding icons in the toolbar.

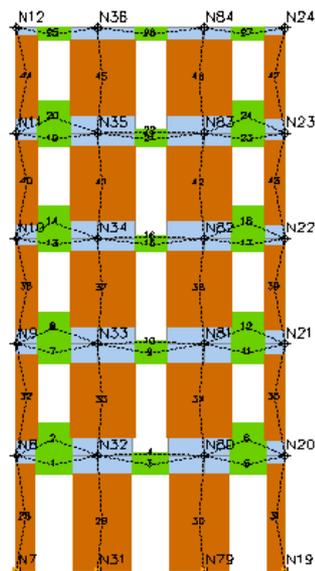
Parete 2

2. Programa 3Muri

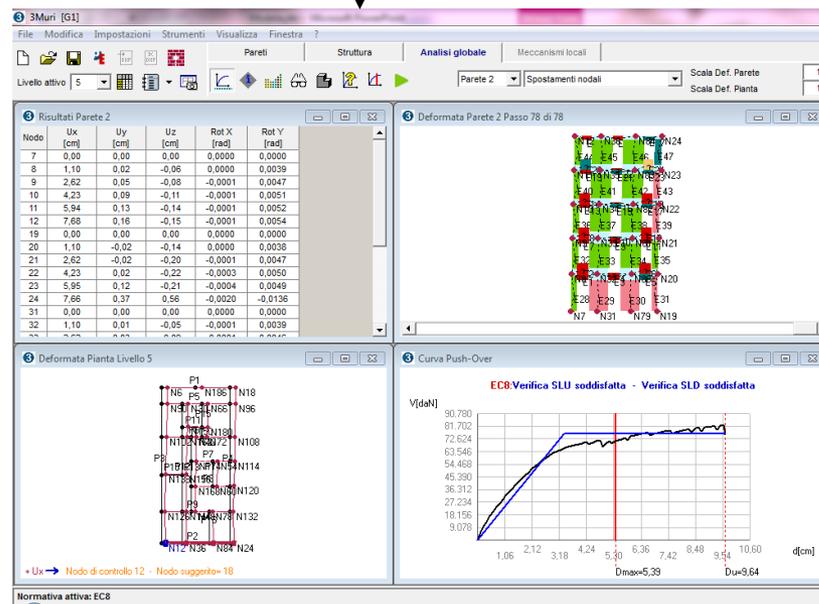
Análise Global da Estrutura



Visualização dos Resultados



Parete 2

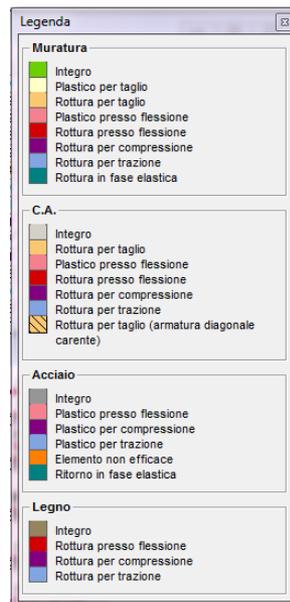


2. Programa 3Muri

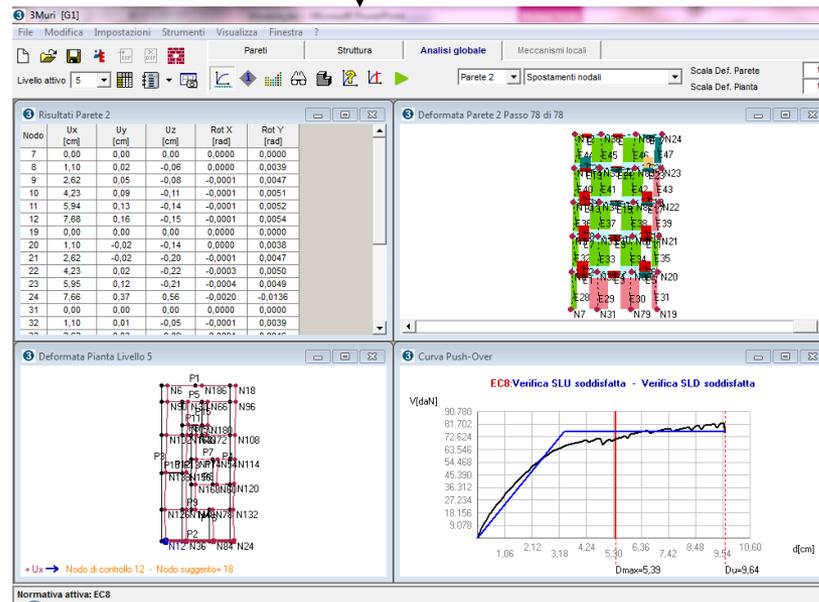
Análise Global da Estrutura



Evolução Danos



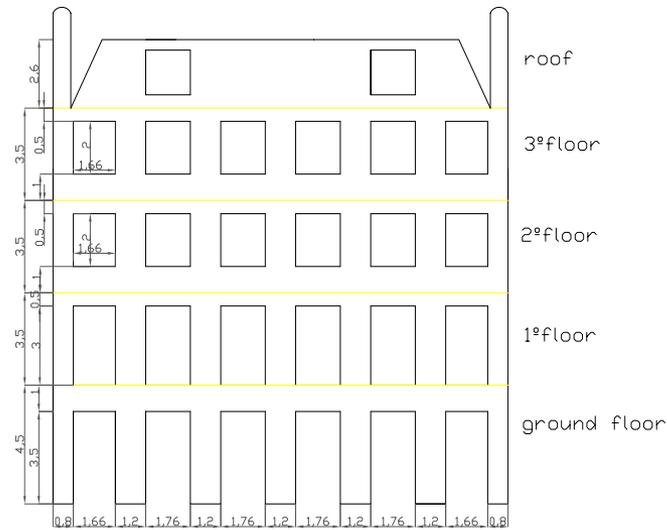
Visualização dos Resultados



2. Programa 3Muri

Exemplo de Modelação TREMURI: Edifícios Pombalinos

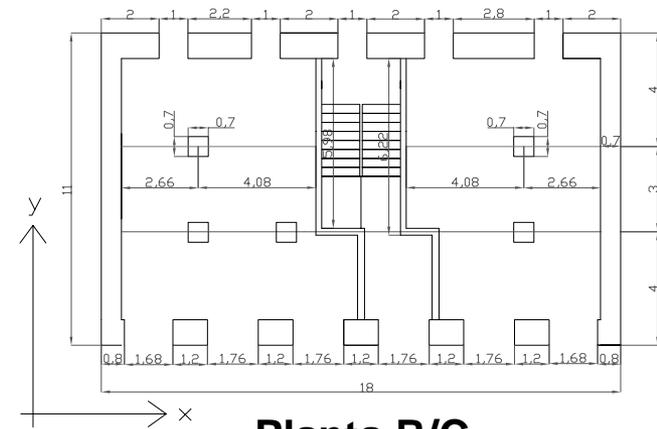
(Meireles, H. – Seismic Vulnerability of Pombalino Buildings. PhD Thesis, IST, UTL, 2012)



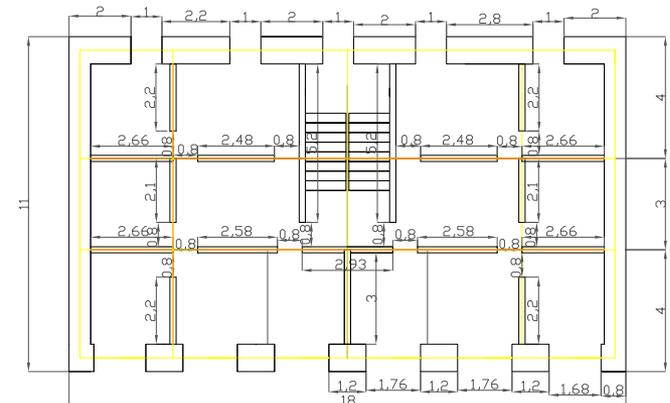
Fachada principal

Masonry type	Average Young's Modulus E [GPa]	Average Shear Modulus G [GPa]	Weight W [KN/m ³]	Average Compressive Strength f_m [MPa]	Average Shear Strength τ_0 [MPa]
Stone Masonry	2.8*	0.86*	22	7	0.105
Rubble Masonry	1.23	0.41	20	2.5	0.043
Brick Masonry	1.5*	0.5*	18	3.2	0.076

* cracked stiffness assumed, 50% of the value used



Planta R/C

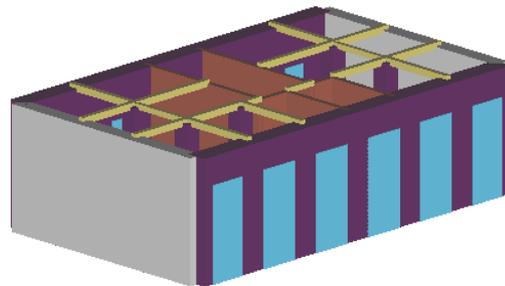
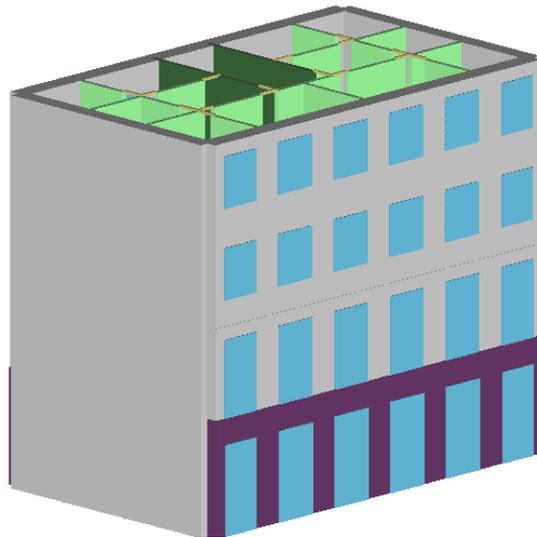


Planta Piso 1

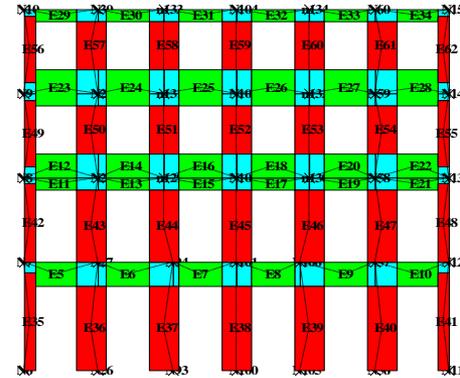
2. Programa 3Muri

Exemplo de Modelação TREMURI: Edifícios Pombalinos

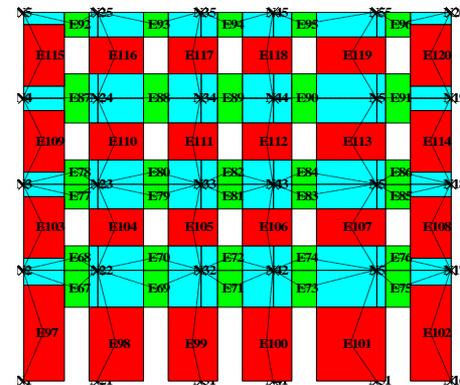
(Mireles, H. – Seismic Vulnerability of Pombalino Buildings. PhD Thesis, IST, UTL, 2012)



Vista Global do Modelo



Fachada Principal



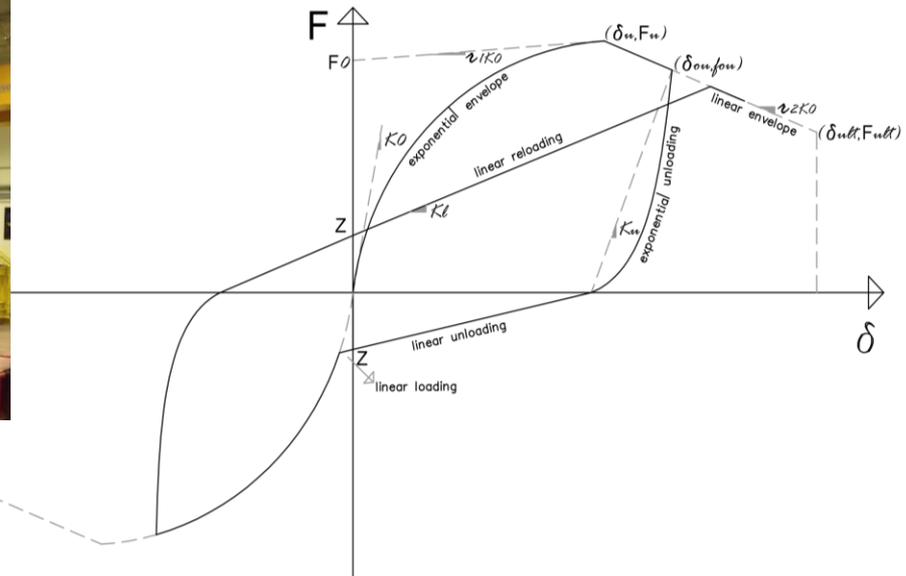
Fachada Tardoz

2. Programa 3Muri

Exemplo de Modelação TREMURI: Edifícios Pombalinos

(Meireles, H. – Seismic Vulnerability of Pombalino Buildings. PhD Thesis, IST, UTL, 2012)

- Desenvolvimento e validação de um macro-elemento para paredes frontal



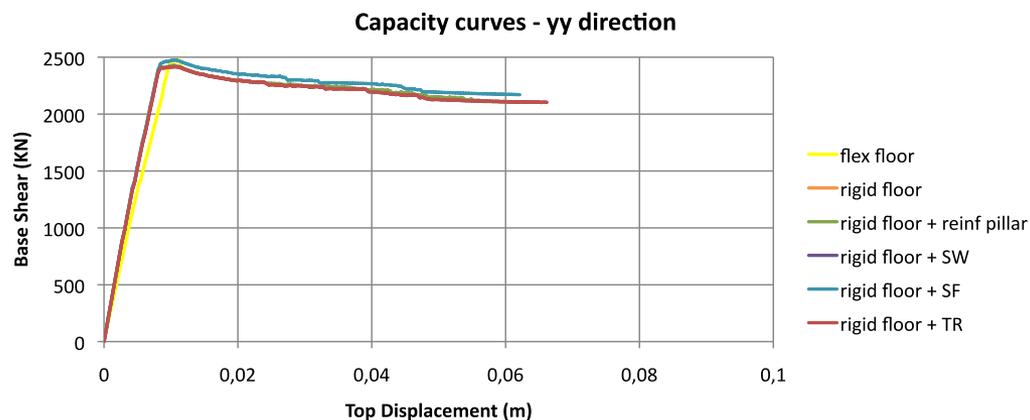
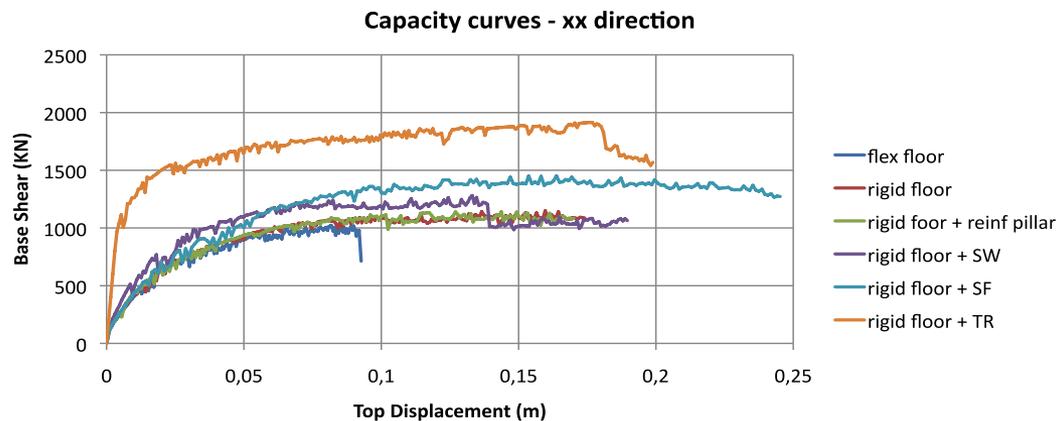
A curva histerética desenvolvida é:

- Definida com regras “path-following”
- Capaz de reproduzir a resposta da parede sob cargas monotónicas, cíclicas e de sismos.
- Calibrada de acordo com os testes experimentais obtidos
- Com funções exponenciais e lineares
- Com um total de 9 parâmetros identificados no modelo

2. Programa 3Muri

Exemplo de Modelação TREMURI: Edifícios Pombalinos

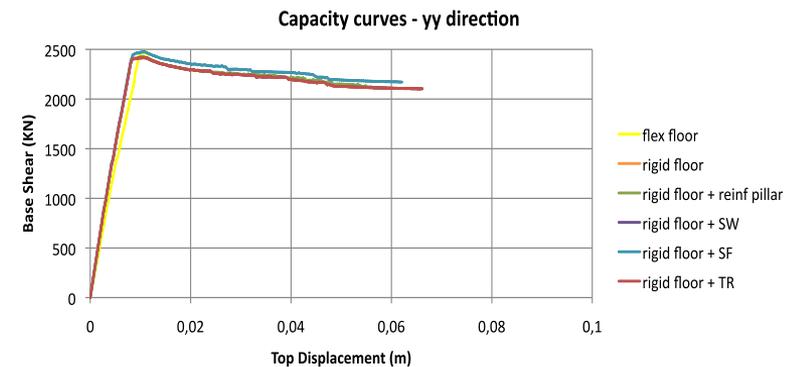
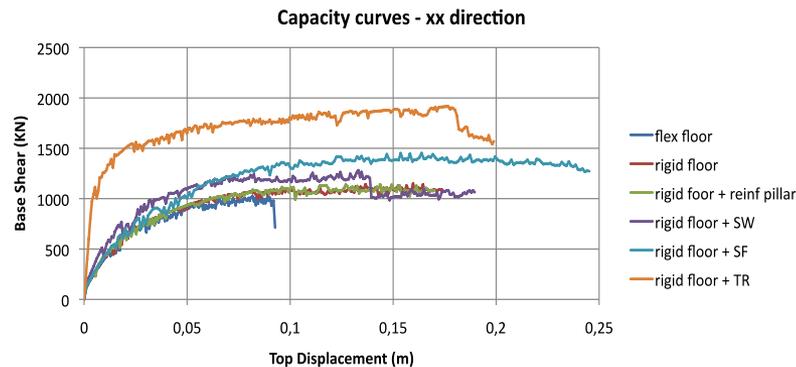
(Meireles, H. – Seismic Vulnerability of Pombalino Buildings. PhD Thesis, IST, UTL, 2012)



2. Programa 3Muri

Exemplo de Modelação TREMURI: Edifícios Pombalinos

(Mireles, H. – Seismic Vulnerability of Pombalino Buildings. PhD Thesis, IST, UTL, 2012)



- Reforço dos pisos aumenta o deslocamento último.
- Reforçar os pilares do piso térreo não traz benefícios adicionais.
- Colocar paredes resistentes aumenta a rigidez e a resistência.
- Colocar pórticos em aço aumenta a resistência.
- Colocar tirantes pré-esforçados aumenta significativamente a rigidez e a resistência.

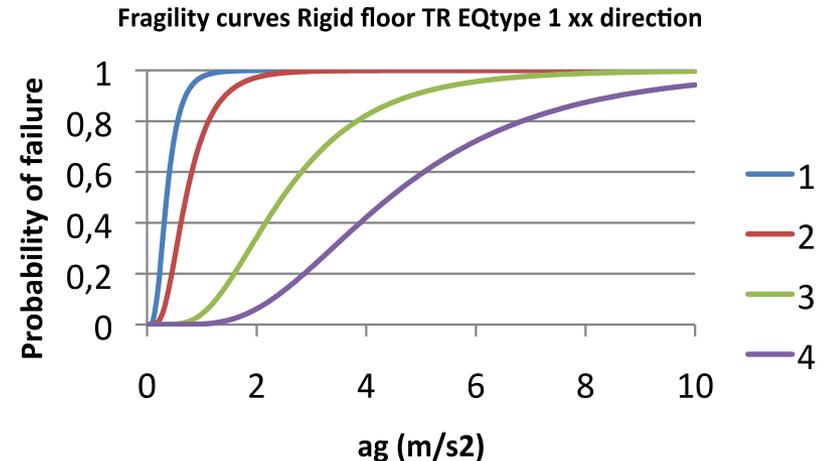
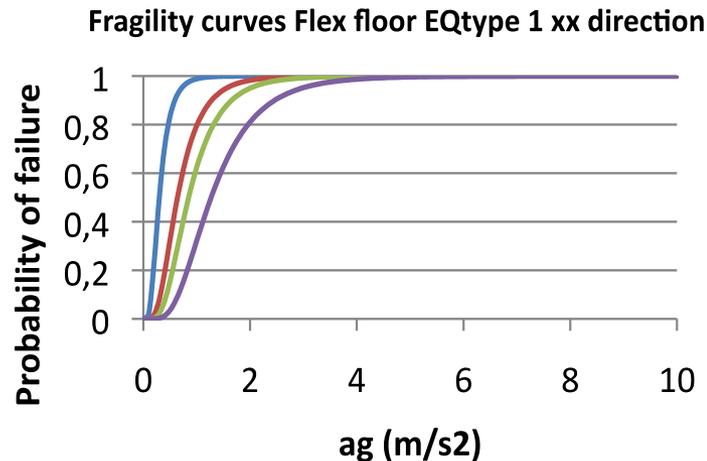
2. Programa 3Muri

Exemplo de Modelação TREMURI: Edifícios Pombalinos

(Meireles, H. – Seismic Vulnerability of Pombalino Buildings. PhD Thesis, IST, UTL, 2012)

Análise de Fragilidade

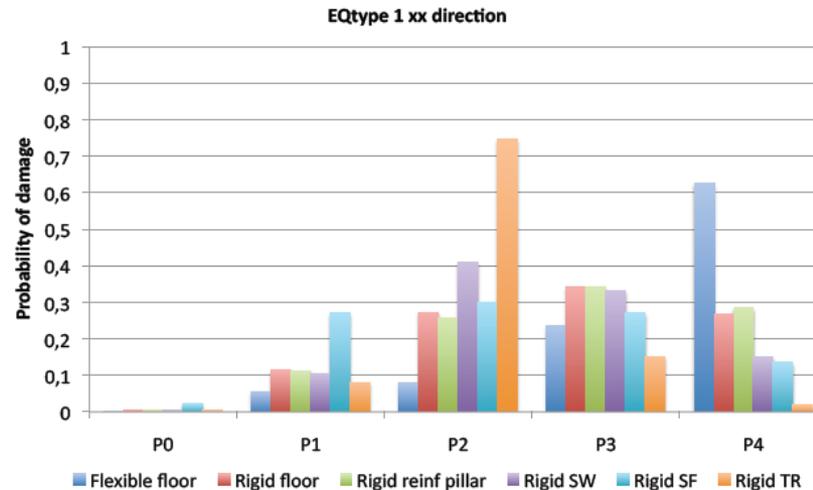
As **curvas de fragilidade** descrevem a probabilidade condicional de uma classe de edifícios atingir ou exceder um determinado nível de dano em função de um determinado nível de acção sísmica.



2. Programa 3Muri

Exemplo de Modelação TREMURI: Edifícios Pombalinos

(Meireles, H. – Seismic Vulnerability of Pombalino Buildings. PhD Thesis, IST, UTL, 2012)



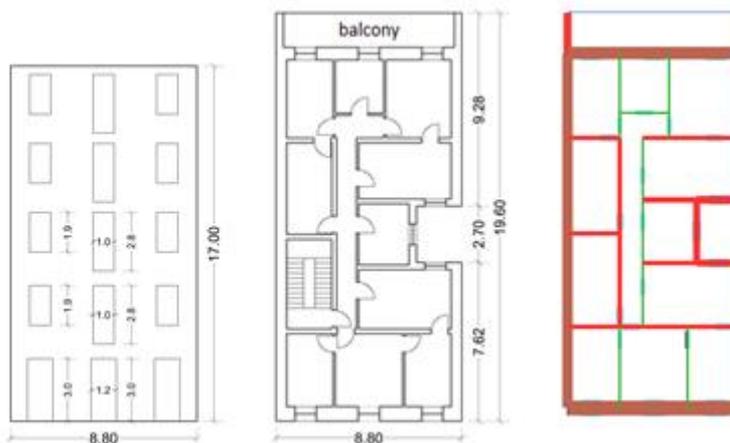
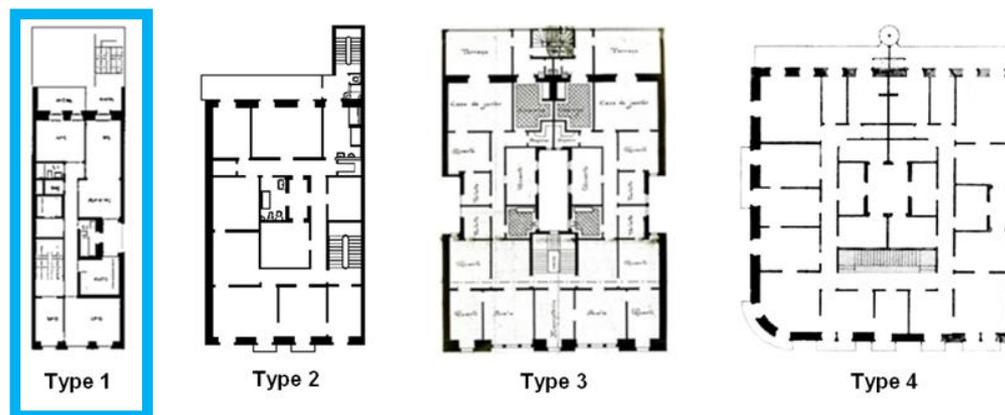
Probabilidade de Dano

- O edifício sem reforço apresenta a maior probabilidade de dano P4 (colapso).
- Reforçar o edifício nos pisos tem uma grande influência.
- Incluir paredes resistentes ou pórticos de aço no piso térreo melhora a situação.
- Incluir tirantes pré-esforçados reduz a probabilidade de dano P4 mas aumenta a P2.

2. Programa 3Muri

Exemplo de Modelação TREMURI: Edifícios Gaioleiros

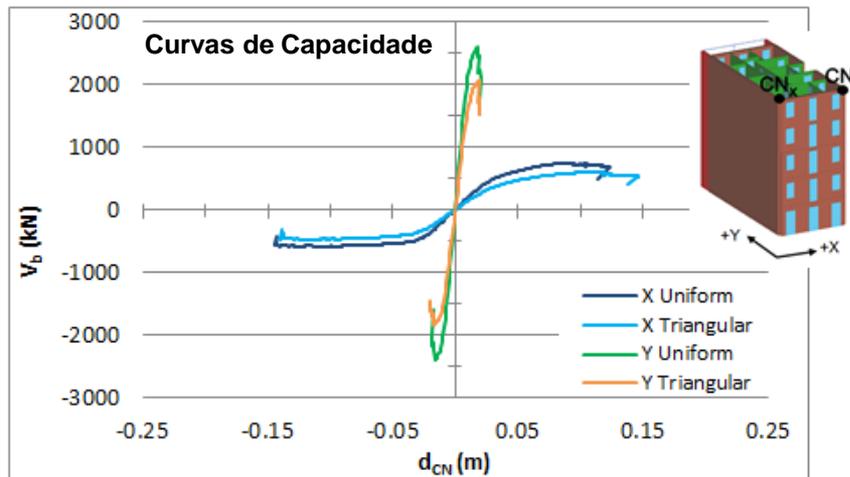
(Simões, A.; Bento, R.; Lagomarsino, S.; Cattari, S. – Seismic Pushover Analysis of ‘Gaioleiro’ Buildings in Lisbon. SE-50EEE, 2013, Macedónia.)



2. Programa 3Muri

Exemplo de Modelação TREMURI: Edifícios Gaioleiros

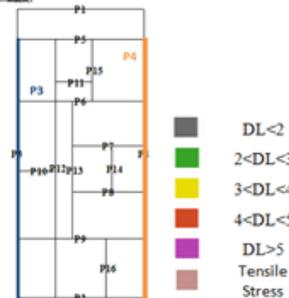
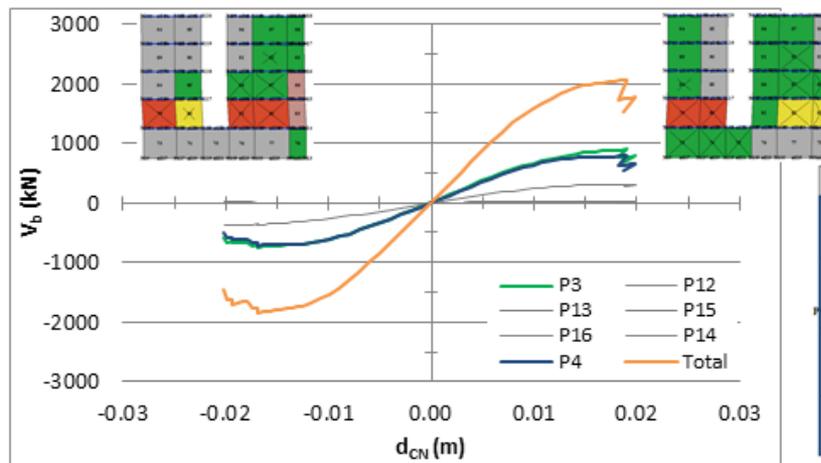
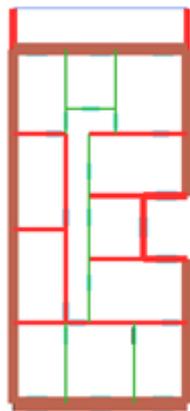
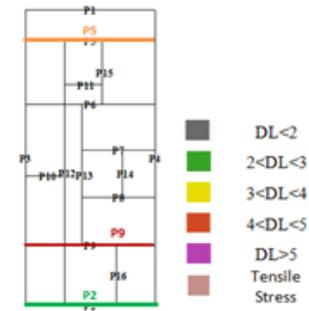
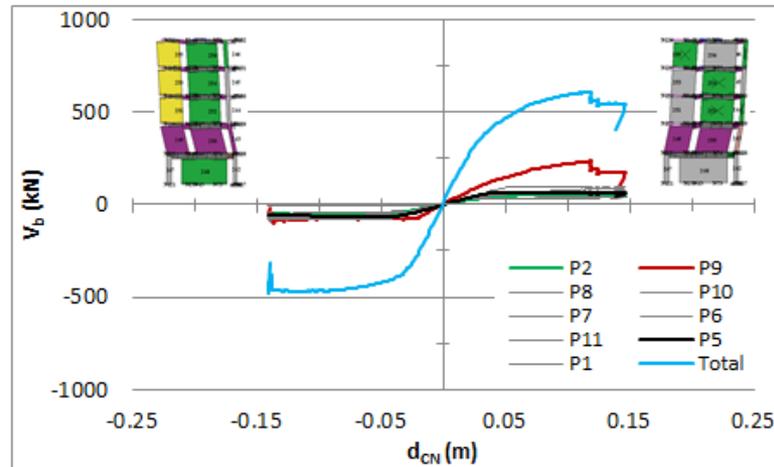
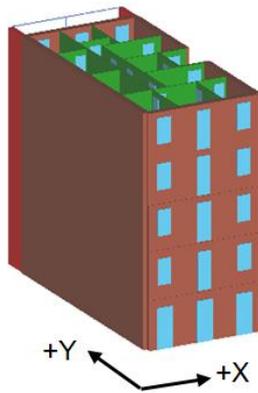
(Simões, A.; Bento, R.; Lagomarsino, S.; Cattari, S. – Seismic Pushover Analysis of ‘Gaioleiro’ Buildings in Lisbon. SE-50EEE, 2013, Macedónia.)



2. Programa 3Muri

Exemplo de Modelação TREMURI: Edifícios Gaioleiros

(Simões, A.; Bento, R.; Lagomarsino, S.; Cattari, S. – Seismic Pushover Analysis of ‘Gaioleiro’ Buildings in Lisbon. SE-50EEE, 2013, Macedónia.)



4. Referências

Calderini, C.; Cattari, S.; Lagomarsino, S. (2009). In-plane strength of unreinforced masonry piers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 38, Issue 2, pp. 243-267.

Cattari S. (2007). Modelling of existing masonry and mixed masonry-reinforced concrete buildings by the equivalent frame approach: formulation of synthetic models. *PhD. Thesis*, University of Genoa, Italy.

Cattari S., Lagomarsino S. (2012). Performance-based approach to earthquake protection of masonry cultural heritage. *SAHC Conference*, Jerzy Jasieńko (ed) DWE, Wrocław, Poland, pp. 2914-2922.

Cattari S., Lagomarsino, S. (2013). Seismic assessment of mixed masonry-reinforced concrete buildings by non-linear static analyses. *Earthquake and Structures*, 4 (3).

Deliverable D26 (2012). Modelling strategies for seismic global response of building and local mechanisms. *Perpetuate Project* (downloadable from <http://www.perpetuate.eu>).

Galasco, A.; Lagomarsino, S.; Penna, A.; Resemini, S. (2004). Nonlinear analysis of masonry structures. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.

Lagomarsino S, Penna A, Galasco A, Cattari S. (2012). TREMURI program: Seismic Analyses of 3D Masonry Buildings, Release 2.0. University of Genoa, Italy (mailto: tremuri@gmail.com).

4. Referências

- Lagomarsino, S.; Cattari, S. (2009). Nonlinear seismic analysis of masonry buildings by the equivalent frame model. *11th D-A-CH Conference: Masonry and Earthquakes*, Zurich, Switzerland.
- Magenes, G.; Della Fontana, A. (1998). Simplified nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *British Masonry Society*, Volume 8, pp. 190-195.
- Marques, R. (2012). Metodologias Inovadoras no Cálculo Sísmico de Estruturas em Alvenaria Simples e Confinada. *PhD Thesis in Civil Engineering*, Universidade do Minho, Portugal.
- Meireles, H. (2012). Seismic Vulnerability of Pombalino Buildings. *PhD Thesis in Civil Engineering*, IST, UTL, Lisbon, Portugal.
- Simões, A.; Bento, R.; Lagomarsino, S.; Cattari, S. (2013) Seismic Pushover Analysis of 'Gaioleiro' Buildings in Lisbon. *SE-50EEE*, Macedonia.
- Yi, T.; Moon, F.; Leon, Kahn, L. (2006) Lateral load Tests on a Two-Storey Unreinforced Masonry Building. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 132:5, pp. 648-652.