

# INTERFACE GRÁFICO PARA PREPARAÇÃO DE DADOS E VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS DE UM PROGRAMA DE ANÁLISE NÃO-LINEAR DE ESTRUTURAS

**Hugo Rodrigues e Humberto Varum**

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Aveiro  
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro  
hrodrigues@aveiro-norte.ua.pt e hvarum@civil.ua.pt

**Xavier Romão e Anibal Costa**

Secção de Estruturas - Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil – FEUP  
Rua Dr. Roberto Frias - 4200-465 Porto  
xnr@fe.up.pt e agc@fe.up.pt

## RESUMO

As análises não-lineares permitem reproduzir melhor o comportamento real das estruturas. No entanto, estas análises geram uma enorme quantidade de informação, o que coloca ao utilizador grandes dificuldades na interpretação destes resultados. Este facto é ainda mais significativo nas análises não-lineares dinâmicas.

De forma a fomentar a utilização de software avançado de análises não-lineares de estruturas foi desenvolvido um processador gráfico, VISUALANL, orientado para o programa de análise de estruturas, PORANL, de forma a tornar o mesmo mais amigável.

Com esta ferramenta gráfica, associada ao programa de cálculo estrutural PORANL, o utilizador consegue de uma forma interactiva e intuitiva definir um problema estrutural, e visualizar os resultados do mesmo, em termos de modos de vibração, diagramas de esforços, deformadas, evoluções no tempo de esforços, deslocamentos e deformações.

## INTRODUÇÃO

Apesar dos inúmeros programas desenvolvidos a nível académico no âmbito do cálculo estrutural não-linear, muitos destes ficam limitados do seu uso corrente devido à falta de um interface gráfico que facilite a sua utilização. Tradicionalmente, a entrada de dados para estes programas de cálculo é feita através de ficheiros de texto extensos, com uma sequência definida, sendo os resultados igualmente apresentados em ficheiros de texto, sem qualquer representação gráfica.

Neste sentido foi desenvolvido um ambiente gráfico, VISUALANL, direccionado para um programa de análise não-linear dinâmica de estruturas, PORANL [1]. Nesta ferramenta a introdução e a alteração dos dados é feita de uma forma interactiva, com representação gráfica at run-time, através de janelas de diálogo, não havendo uma sequência rígida para a introdução dos dados. Em relação aos resultados, a definição deste ambiente visual permite a sua fácil visualização através de representações gráficas.

## MODELOS DE COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

Varum [1] implementou um modelo de análise não-linear estrutural que avalia a resposta de elementos de betão armado sujeitos, predominantemente, à flexão, baseado no modelo histerético de Takeda [8], anteriormente desenvolvido por Costa e Costa [6, 9].

Sendo assim, cada elemento estrutural de barra é subdividido em três sub-elementos (ver figura 1), nomeadamente um sub-elemento central com comportamento elástico-linear, estando ligado a este, em cada extremidade, um sub-elemento com comportamento não-linear.

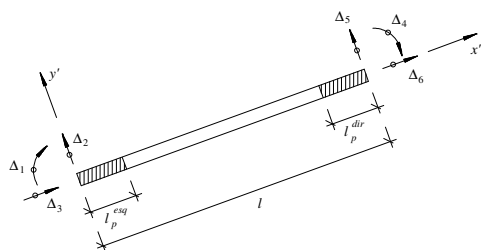


Figura 1. Macro-elemento de barra

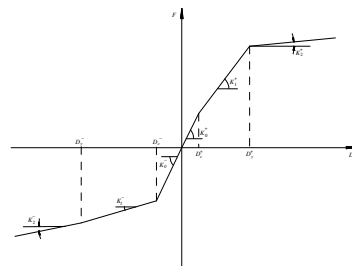


Figura 2. Curva base de comportamento

O comportamento de cada zona inelástica é representado por meio do referido modelo histerético. Este modelo contempla algumas propriedades importantes, tais como: i) degradação da rigidez; ii) degradação de resistência; iii) o efeito P-Δ; iv) o efeito do esforço transversal, "pinching effect"; v) a deterioração da aderência e o escorregamento das armaduras, "slipping effect". Estes fenómenos encontram-se descritos na literatura [1, 3].

A caracterização das zonas inelásticas é feita através de uma curva base tri-linear (ver figura 2) para cada sentido, permitindo a análise de secções de betão armado não simétricas ou secções simétricas não simetricamente armadas. A determinação das curvas de comportamento das secções de betão armado é obtida através do programa BIAx, desenvolvido por Vaz [4], no qual as secções são modeladas usando um modelo de fibras. Este modelo foi integrado no ambiente gráfico de trabalho VISUALANL (ver figura 3).

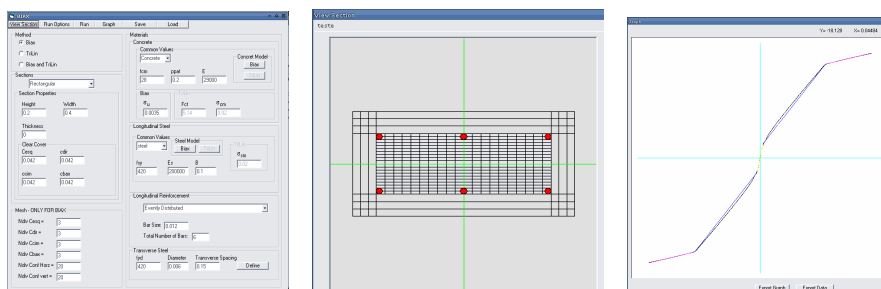


Figura 3. Interface gráfico desenvolvido para o BIAx

De acordo com o modelo de fibras os elementos são discretizados, ao nível das secções, em fatias flexão uniaxial) ou filamentos (flexão biaxial), com comportamento uniaxial segundo o seu eixo longitudinal, sendo ignorados os efeitos do esforço transversal.

## MODELO DE DANO

A caracterização e quantificação do dano estrutural são essenciais para a avaliação da resposta de edifícios sujeitos a acções sísmicas. Na prática, o índice de dano fornece uma medida do dano de um elemento estrutural específico para um dado estado de limite.


Neste sentido foi implementada no programa de análise estrutural PORANL por Romão [2], uma das formulações de dano mais utilizadas proposta por Park e Ang [5], que tem em conta a medida da máxima deformação estrutural e a medida da resposta estrutural acumulada que reflecte o número e gama de excursões não-lineares ou a energia dissipada por histerese.

## PRÉ-PROCESSAMENTO

Toda a interface gráfica de pré e pós-processamento é uma ferramenta única. No entanto, para melhor caracterizar esta interface descreve-se a parte de pré-processamento como a entrada

## Geração da geometria da estrutura

**New Project**



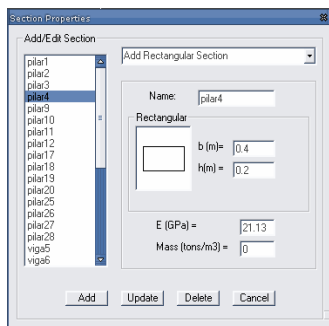
Name:

Number of Storeys:  Storey Height:  m

Number of Bays:  Bay Length:  m

Depois da introdução da geometria-base, o utilizador poderá ainda complementar a mesma, alterando os comprimentos dos vãos, altura dos pisos, adicionar ou apagar barras, bem como alterar as coordenadas de nós.

Os elementos de extremidade definem as rótulas plásticas [1, 4]. Assim, tal como se pode observar na figura 6, para cada secção-tipo com comportamento não-linear, o utilizador deverá definir os parâmetros da curva tri-linear de comportamento, bem como os parâmetros necessários para o cálculo do índice de dano da estrutura.



**Damage Parameters**

Non-Linear Parameters

Name:

$K_0 = 1.702 \times 10^6$   $\text{N/m}^2$   $K_0 = 1.401 \times 10^6$   $\text{N/m}^2$

$K_1 = 770$   $\text{N/m}^2$   $K_1 = 770$   $\text{N/m}^2$

$K_2 = 64$   $\text{N/m}^2$   $K_2 = 64$   $\text{N/m}^2$

$C = 1.569 \times 3 \text{ /m}$   $C = 1.569 \times 3 \text{ /m}$

$C = 2.686 \times 2 \text{ /m}$   $C = 2.686 \times 2 \text{ /m}$

$\alpha = 0$   $\beta = 0$   $\gamma = 0$

Damage Parameters

$W = 0.0895$   $d = 0.957$   $m \cdot d = 0.957$   $m$

$p = 0.346 \cdot 10^3$   $p = 0.84$   $\%$   $p = 0.346$   $\%$

$Al = 0$   $m_2 = A_0$   $Al = 0$   $m_2 = A_0$

$Cur = 101.54 \cdot 0$   $Cur = 101.54 \cdot 0$   $fc = 33.00$   $\text{MPa}$

$N = 1332.36$   $\text{kN}$

Frame(s) 1,3,5,9

Enter the frame number(s) or frame ranges separated by commas, for example 1,2,3 or 1-3

Section Type vpa23

Non-Linear Material

M1\_d vpa23\_elq M1\_d vpa23\_dk

Method "Prestress and Peak"

☒ l=0.5th ☐ l=0.75th ☐ l=0.9th ☐ l=Imposed Value

Lp\_d 0.5 m Lp\_d 0.5 m

Program Convention

M1\_d Linear Material M1\_d

Lp\_a Lp\_d

OK Cancel

Para cada elemento ou grupo de elementos são definidas as seguintes propriedades: i) associação de um material-tipo com comportamento linear; ii) comprimentos das rótulas

plásticas à esquerda e à direita do elemento; iii) material com comportamento não-linear associado a cada rótula plástica. Na figura 7 é representada a janela de diálogo referente à definição das propriedades dos elementos.

De referir ainda que, as características específicas não têm que ser definidas barra a barra, podendo ser definidas para um conjunto de barras, respeitando as indicações do programa e associando a esse conjunto apenas uma das características.

## Restrições de deslocamentos nodais (apoios)

Como se trata de um programa que contempla um modelo estrutural bidimensional, o utilizador poderá restringir os graus de liberdade de um dado nó, ou grupo de nós, correspondentes ao problema plano, nomeadamente, o deslocamento na direcção x ou y ou a rotação d. Na figura 8 representa-se a janela de diálogo onde são definidas as restrições nodais. Para facilitar a imposição de condições de apoio foram definidas teclas de atalho todos os casos de apoio.

## Cargas estáticas

As cargas estáticas aplicadas directamente em nós podem ser forças segundo x, y ou momentos concentrados (ver figura 9-a). Para as barras apenas está contemplada a hipótese de cargas uniformemente distribuído ao longo do seu comprimento (ver figura 9-b). Nas janelas de diálogo para introdução de cargas é representada a convenção de sinais assumida. Em qualquer momento o utilizador pode apagar ou alterar cargas previamente introduzidas.

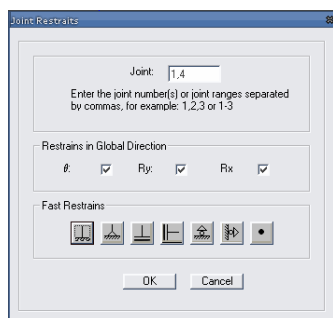
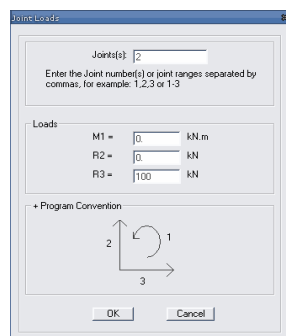
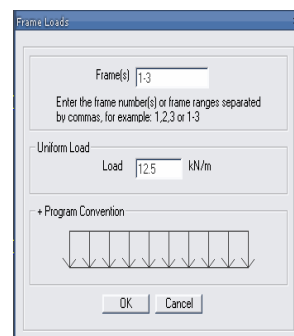


Figura 8. Definição das condições de apoio



a) Definição de cargas em nós



b) Definição de cargas distribuídas em barras

Figura 9. Definição das cargas estáticas

## PROCESSAMENTO

Este trabalho descreve o ambiente gráfico, VISUALANL, de suporte ao processador PORANL, desenvolvido por Varum [1]. Quando se executa o cálculo da estrutura o VISUALANL prepara os ficheiros em formato de texto para o PORANL, executa-o de seguida e disponibiliza opções de pós-processamento que utilizam os ficheiros de resultados produzidos pelo PORANL. Na realidade são utilizados dois programas distintos (VISUALANL e PORANL), embora o utilizador interaja apenas com o ambiente gráfico.

O programa PORANL contempla vários tipos de análise, nomeadamente: i) análise estática elástica linear ou não-linear; ii) análise não-linear dinâmica; iii) análise não-linear por deslocamentos impostos; e, iv) cálculo das frequências próprias e modos de vibração.

## Análise estática

Além dos dados relativos à geometria, propriedades materiais e carregamento da estrutura, para executar uma análise estática linear ou não-linear o utilizador apenas tem de indicar o tipo de análise que pretende realizar.

## Análise dinâmica

Para realizar uma análise dinâmica o utilizador terá, adicionalmente, de definir (ver figura 10): i) a acção sísmica (acelerograma); ii) o método de integração; e, iii) os parâmetros de definição da matriz de amortecimento de Rayleigh [1].

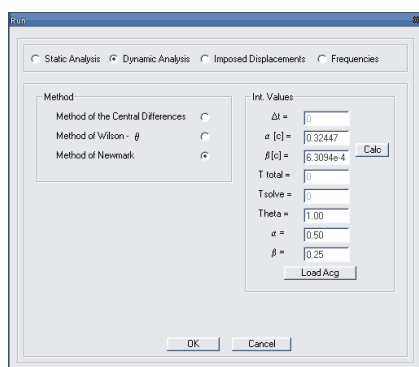


Figura 10. Dados necessários para a análise dinâmica

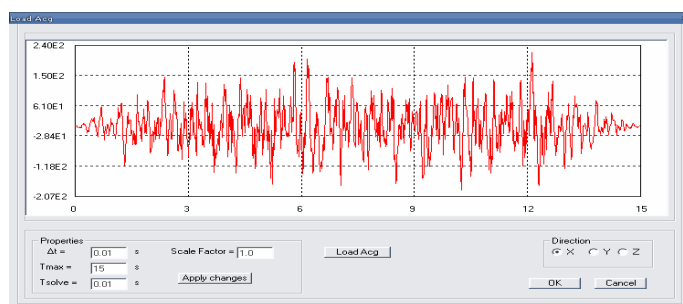


Figura 11. Leitura e correcção do acelerograma

Após leitura do acelerograma, este é representado e o pode ser escalado por um factor de ampliação/redução, alterar o passo de integração ou cortar o tempo de total (Ver Figura 11).

## Análise não-linear por deslocamentos impostos

Na análise por deslocamentos impostos o utilizador impõe a um ou mais nós uma lei de deslocamentos segundo a direcção desejada. As leis de deslocamento imposto são importadas de ficheiros, podendo ser aplicado um factor de ampliação/redução a cada lei (ver figura 12).

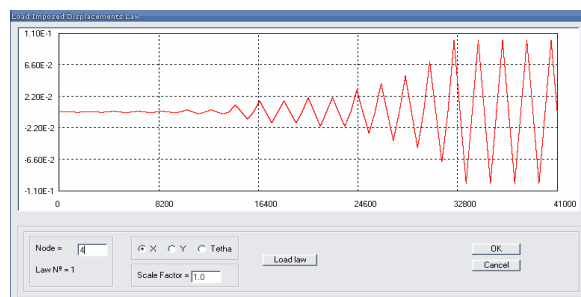


Figura 12. Leitura da lei de deslocamentos impostos

## Determinação de frequências próprias e modos de vibração

Nesta opção são determinadas as frequências próprias da estrutura e os correspondentes modos de vibração, sendo as frequências apresentadas numa tabela e os modos de vibração representados graficamente sobre a estrutura.

## PÓS-PROCESSAMENTO

O pós-processamento consiste na visualização dos resultados do cálculo da estrutura e implica que tenham sido introduzidos os dados do problema e que tenha sido efectuado o cálculo.

As opções de visualização dependem do tipo de análise realizada. Por exemplo, em análises no tempo é permitido visualizar os resultados em cada instante, situação que não se verifica para resultados de análises estáticas.

### Deformada

Quando é seleccionada a opção de visualização da deformada (ver figura 13) o programa representa a mesma sobre a estrutura com um dado factor de escala podendo este ser alterado pelo utilizador de forma a visualizar a deformada de forma mais conveniente.

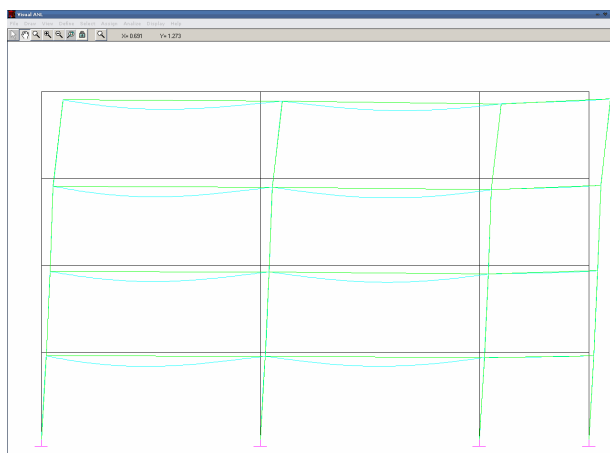


Figura 13. Deformada da estrutura

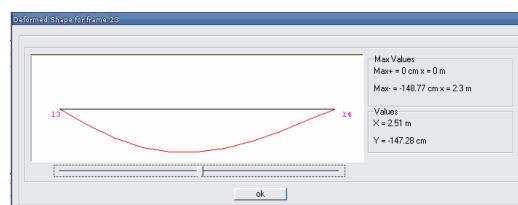


Figura 14. Deformada no referencial local de uma barra

Quando a deformada está activa para um dado instante, o utilizador poderá seleccionar uma barra com o rato visualizando: a deformada dessa barra no seu referencial; o valor máximo positivo e negativo da deformação; o valor da deformada em qualquer ponto (figura 14).

### Diagramas de esforços

A visualização dos diagramas de esforços é feita de forma semelhante à da deformada. O utilizador selecciona o instante em que deseja ver os esforços escolhendo também que esforço é representado: esforço axial N, esforço transversal V ou momento flector M (ver figura 15).

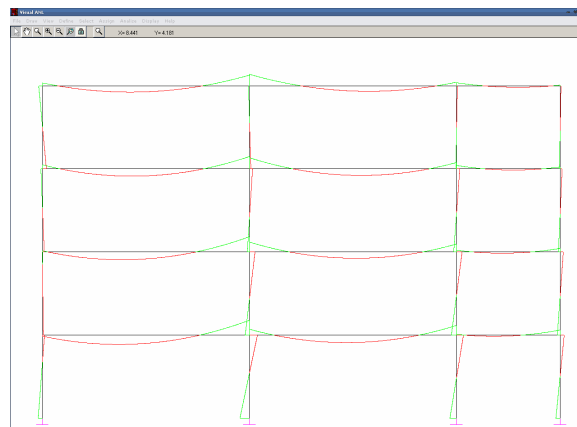


Figura 15. Diagramas de esforços na estrutura

Quando são representados os diagramas de esforços, aparece na janela de opção a indicação dos esforços máximos em toda a estrutura e o elemento onde ocorrem (figura 16).

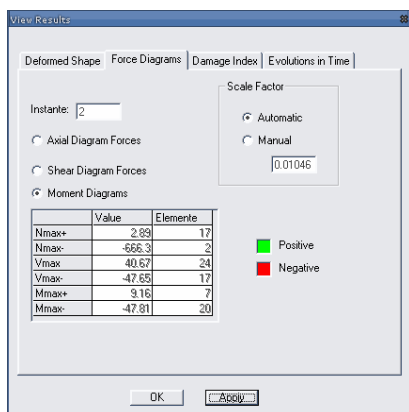


Figura 16. Diagramas de esforços

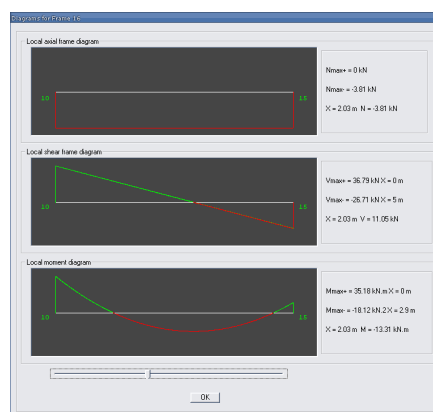


Figura 17. Diagramas de esforços de uma barra

O utilizador poderá seleccionar também uma barra visualizando, os diagramas de esforços da mesma no seu referencial local e verificar o valor dos esforços em qualquer ponto (figura 17).

## Índice de dano

Nas opções referentes ao índice de dano da estrutura podem ser visualizados três tipos de resultados: a evolução do índice de dano global; a envolvente do perfil do drift, que representa o deslocamento relativo entre pisos, normalizado pela altura do piso; e, o índice de dano local de cada elemento com comportamento não-linear no instante pretendido (figura 18).

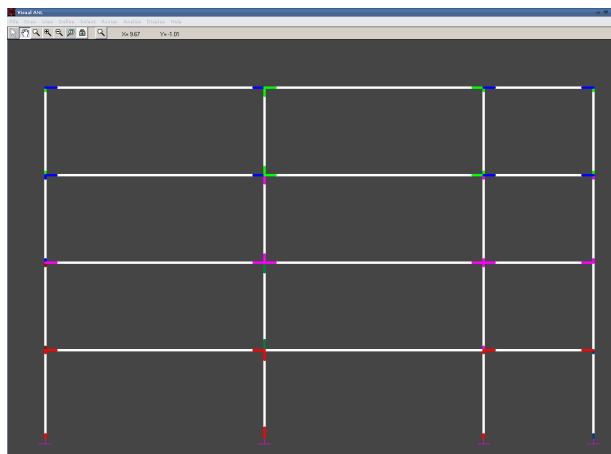


Figura 18. Representação do índice de dano na estrutura

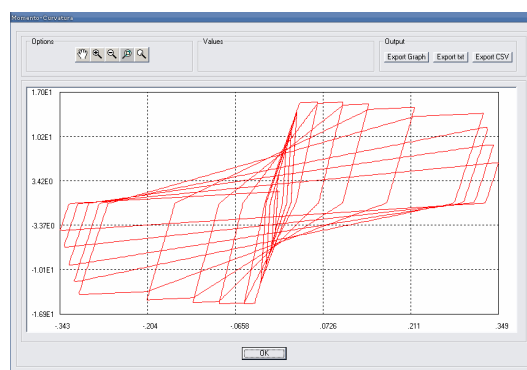


Figura 19. Gráfico momento-curvatura ao nível de uma secção

O programa considera uma escala de cores pré-definida em que cada cor representa um intervalo de dano. No entanto, tanto os intervalos como as cores podem ser adaptados.

## Evoluções

Com esta opção o utilizador pode visualizar: a evolução no tempo dos esforços ou da curvatura numa rótula plástica; o gráfico momento-curvatura ao nível de uma rótula plástica (figura 19); e, a evolução dos deslocamentos num nó.

Todos os gráficos podem ser exportados em formato de imagem ou ficheiros de texto compatíveis com o MS Excel, e a sua representação gráfica tem disponíveis as mesmas ferramentas desenvolvidas para o ambiente gráfico geral (zoom e pan) de forma a facilitar a compreensão de pormenores do gráfico.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os programas de análise não-linear são uma ferramenta valiosa na análise e verificação da segurança estrutural, pois permitem conhecer com mais rigor o comportamento real das estruturas.

A regulamentação mais recente aponta as análises não-lineares como análises de referência para a avaliação de capacidade e verificação da segurança estrutural. O Eurocódigo 8 [6] recomenda a utilização de métodos de análise não-linear com integração no tempo para a avaliação de estruturas existentes de betão armado.

As análises não-lineares com integração passo-a-passo geram muita informação para cada instante da análise tornando difícil tratar, visualizar e interpretar os resultados.

Actualmente são ainda poucos os programas de cálculo não-linear que possuem ferramentas de visualização gráfica de suporte com um nível de desenvolvimento compatível com o dos modelos em causa. Assim, considera-se que o processador gráfico desenvolvido poderá auxiliar no dimensionamento e verificação da segurança de estruturas, em situações que envolvam análises não-lineares estáticas ou dinâmicas.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] H. Varum (1996), Modelo numérico para a análise sísmica de pórticos planos de betão armado, Tese de mestrado, FEUP.
- [2] X. Romão (2002), Novos modelos de dimensionamento sísmico de estruturas, Tese de mestrado, FEUP.
- [3] A.G. Costa (1989), Análise sísmica de estruturas irregulares, Tese de doutoramento, FEUP.
- [4] C.T. Vaz (1996), Análise não-linear de pilares de betão armado sob cargas cíclicas, LNEC, Lisboa.
- [5] Y.J. Park e H.S. Ang (1985), Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, Journal of Structural Engineering ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 722-739.
- [6] CEN (2003) - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-3: Strengthening and repair of buildings - European prEN 1998-1-3, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [7] H. Rodrigues, H. Varum, A.G. Costa e X. Romão (2004), Interface gráfico para análise não-linear de pórticos planos sujeitos a cargas dinâmicas e/ou estáticas, Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia - CMCE 2004, LNEC, Lisboa.
- [8] T. Takeda, M.A. Sozen e N.N. Nielsen (1970), Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal Structural Division, ASCE, Vol. 36, No. ST12.
- [9] A.G. Costa e A.C. Costa (1987), Modelo Histerético das Forças-Deslocamentos Adequado à Análise Sísmica de Estruturas, Relatório Técnico, Núcleo de Dinâmica Aplicada, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.