



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

# **Análises Estáticas Não Lineares (*Pushover*) para o Dimensionamento e Avaliação Sísmica de Estruturas**

## **Parte 1**

**Rita Bento**

9 de Fevereiro de 2012

**FUNDEC**



- Formação – Novos processos de dimensionamento e avaliação sísmica baseados em critérios de desempenho.
- Novos métodos para garantir o controlo de danos estruturais – nível de deformações/deslocamentos, global e local:
  - Procedimentos implementados em regulamentos – ATC40 (1996), FEMA273 (1997), **EC8** (2004) – que recorrem a **Análises Estáticas Não Lineares** (AENL).
  - Métodos de dimensionamento baseados em deslocamentos – *Displacement Based Design*, DBD.
- Importância da abordagem destes procedimentos: projeto e investigação.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

## Objectivos

---

- Definir os fundamentos essenciais dos novos métodos de avaliação e dimensionamento sísmicos baseados em critérios de desempenho, dando-se ênfase aos que recorrem a análises estáticas não lineares (AENL).
- Apresentar e analisar os métodos pioneiros (convencionais) para este tipo de análise, **em especial ao procedimento proposto no Eurocódigo 8.**
- Descrever as principais vantagens e limitações destes procedimentos.
- Demonstrar, com exemplos de aplicação, as potencialidades destes métodos de análise e dimensionamento.
- Apresentar os progressos mais recentes nesta área de investigação.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

## Estrutura do Curso

---

1. Apresentação. Dimensionamento e avaliação sísmica de estruturas. Procedimento geral das Análises Estáticas Não Lineares (AENLs).
2. AENL proposta no Eurocódigo 8 – Método N2.
3. Curso Intensivo: Exemplo de aplicação do método N2 proposto no EC8 - Pórtico 2D.
4. AENLs – diferentes métodos.
5. Edifícios 3D – particularidades da modelação, aplicação de diferentes AENLs e ADNL com comparação de resultados.
6. Casos de Estudo.
7. Debate.



- Avaliação do desempenho sísmico de estruturas → controlo do nível de deslocamentos das estruturas (global e local);
- **Consensual** → o comportamento estrutural e os danos observados nas estruturas durante a ocorrência dos sismos é condicionado fundamentalmente pelas capacidades de deformação inelástica dos elementos estruturais dúcteis;
- Consequentemente, a avaliação e o dimensionamento sísmico de estruturas deve ser baseado nos deslocamentos (i.e. deformações) e não em forças (i.e. tensões);
- Processos de avaliação e dimensionamento sísmico baseados em critérios de desempenho (verificação/imposição de deslocamentos)



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

## Avaliação e Dimensionamento Sísmico

---

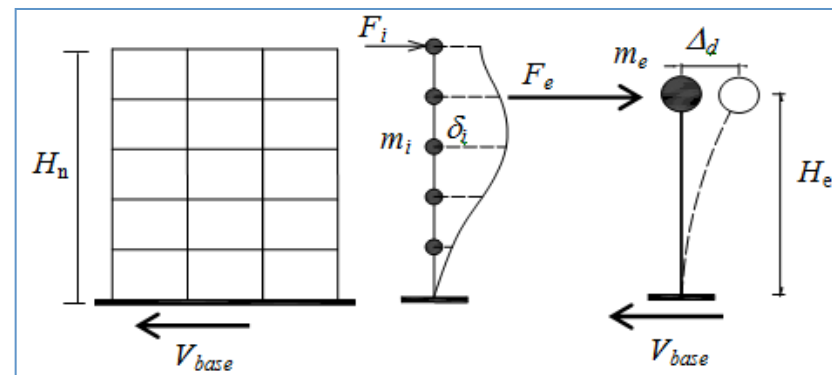
- Processos de avaliação e dimensionamento sísmico baseados em critérios de desempenho
  1. Métodos baseados em **Forças/Verificação Deslocamentos**  
Dimensionamento da resistência da estrutura a partir dos métodos correntes de projecto e verificação das deformações/deslocamentos usando o valor inicial estimado para a rigidez;
  2. Métodos de avaliação baseados em **Deformações/Deslocamentos** em estruturas pré-dimensionadas ou existentes baseados no dimensionamento e recorrendo a AENL ou ADNL;
  3. Dimensionamento baseado no controlo dos **Deslocamentos**  
O dimensionamento é feito para atingir determinado nível de deslocamentos. A rigidez associada aos deslocamentos finais é normalmente a usada. Amortecimento histerético representado ou pelo amortecimento viscoso equivalente ou pelo espectro inelástico

---

**Análises Estáticas Não Lineares (Pushover) para o Dimensionamento e Avaliação Sísmica de Estruturas**

- **Dimensionamento baseado no controlo dos Deslocamentos**  
Os danos, imposto um determinado limite, são usados para determinar os esforços e finalmente para verificar o desempenho sísmico das estruturas:

1. Selecionar a deformada de dimensionamento e determinar características de sistema IGL equivalente

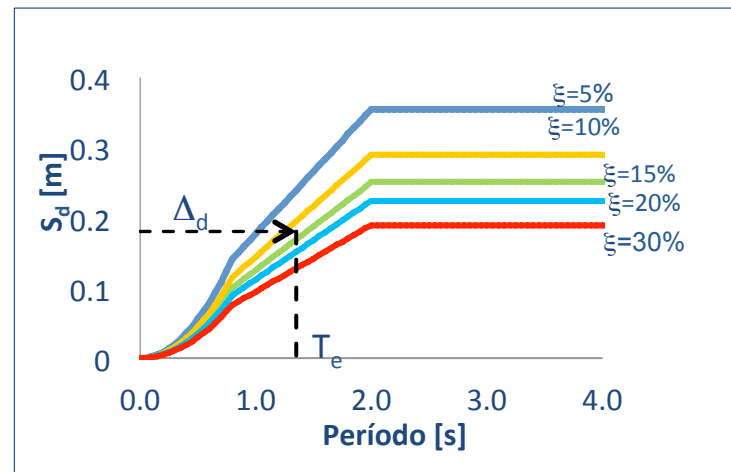


2. Determinar o amortecimento viscoso equivalente  $\xi$  função de  $\mu$  (depende  $\Delta_y$ )



- Dimensionamento baseado no controlo dos Deslocamentos

3. Determinação do período efectivo  $T_e$  a partir do espectro de resposta de deslocamentos



4. Com  $T_e$  determina-se  $K_e$ ,  $V_{base}$ , distribui-se por forças de inércia laterais pela estrutura e dimensiona-se a estrutura
5. Recorre-se aos princípios de dimensionamento por capacidade resistentes (*Capacity Design rules*)





- **Análises de Referência: Análises Dinâmicas Não Lineares (ADNL)**

Análises complexas e morosas para uma utilização corrente em projecto:

1. A modelação correcta dos efeitos não lineares só é possível recorrendo a modelos de elementos finitos com alguma sofisticação;
2. Nas análises dinâmicas não lineares a acção sísmica é definida por acelerogramas;
3. A dispersão de resultados obtidos, resultantes do comportamento não linear das estruturas, justifica a necessidade de utilizar diferentes acelerogramas;
4. O tipo de análise, passo a passo, justifica a utilização de meios computacionais mais potentes, mas conduzindo sempre a tempos de cálculo superiores às restantes análises.



---

- **Análises Estáticas Não Lineares (AENL) – Análises *Pushover***

1. Evitar a utilização ADNL mas poder considerar o comportamento fisicamente não linear de forma mais correcta do que através de análises lineares.
2. Correspondem à imposição de forças ou deslocamentos com recurso à exploração das características não lineares dos elementos estruturais.
3. Formato mais usual, impõe-se um carregamento e verificam-se os deslocamentos:



ferramenta útil para a avaliação sísmica de estruturas, dado que modelam o comportamento não linear e permitem conhecer a evolução dos seus danos



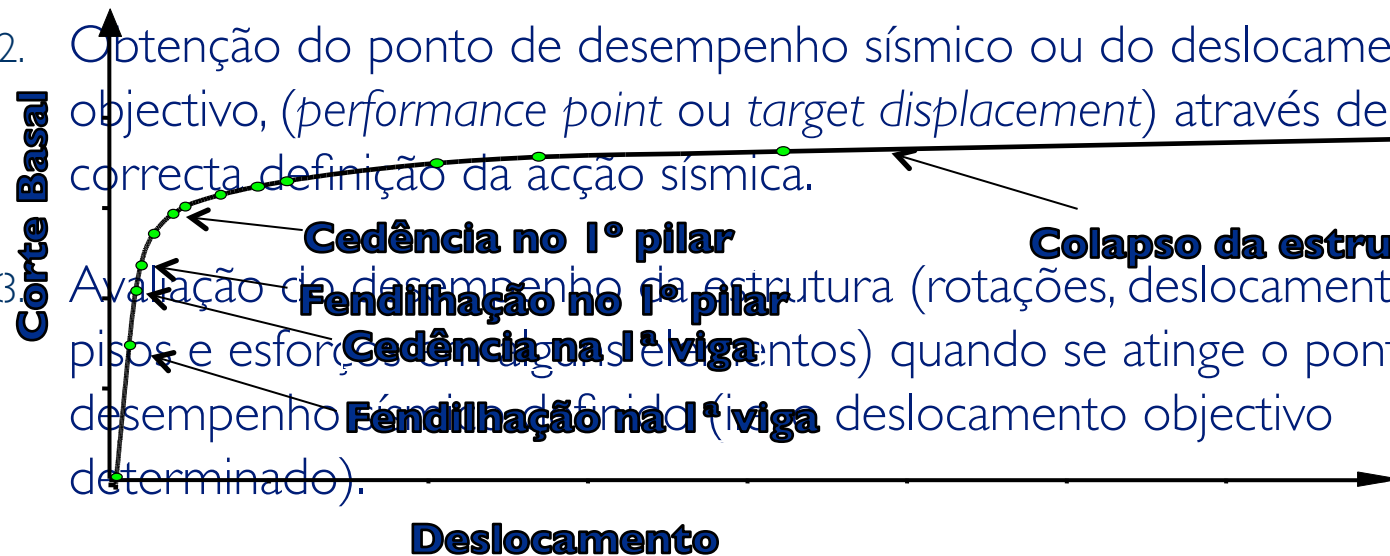
informação da evolução dos danos de grande utilidade se o objectivo da avaliação está relacionada com o reforço

- Passos principais das AENLs

- Definição da capacidade resistente da estrutura, através da aplicação incremental de forças ou deslocamentos e atendendo ao comportamento fisicamente não linear.

- Obtenção do ponto de desempenho sísmico ou do deslocamento objectivo, (*performance point* ou *target displacement*) através de uma correcta definição da acção sísmica.

- Avaliação do desempenho da estrutura (rotações, deslocamentos entre pisos e esforços em alguns elementos) quando se atinge o ponto de desempenho sísmico ou do deslocamento objectivo determinado).





- **Vantagens principais das AENL**
  1. A avaliação sísmica estrutural (ou dimensionamento em certos casos particulares) é feita **controlando as deformações na estrutura**.
  2. A consideração explícita do **comportamento não linear** da estrutura, evitando assim o recurso a factores de comportamento.
  3. Permite traçar a curva de resposta global da capacidade resistente estrutural, identificando, sequencialmente, os elementos estruturais que atingiram a cedência e o colapso. Este procedimento permite identificar a **distribuição de danos na estrutura**.
  4. O procedimento revela-se muito adequado para a **avaliação e dimensionamento sísmico** de estruturas por **critérios de desempenho**; permite considerar diferentes estados limite e verificar o desempenho da estrutura para os correspondentes deslocamentos objectivo.



- **Limitações das AENL convencionais**
  1. Não são capazes de reproduzir adequadamente o desempenho sísmico estrutural quando a contribuição dos modos de vibração superiores é importante.
  2. Não conseguem estimar correctamente a concentração de danos local, a qual é responsável pelas alterações das características dinâmicas da estrutura, principalmente quando a estrutura entra significativamente em regime não linear.
  3. Sendo métodos estáticos, desprezam algumas fontes de energia dissipada, como a energia cinética e o amortecimento viscoso.
  4. Os efeitos tridimensionais são de difícil incorporação, assim como os efeitos associados ao comportamento cíclico da acção sísmica.



- Reconhecendo-se as limitações existentes, muito trabalho de investigação nesta área tem sido desenvolvido na última década.
- Algumas das limitações enumeradas anteriormente podem ser ultrapassadas pelo recurso a procedimentos **adaptativos**. Consideram tanto a contribuição dos modos de vibração superiores, como as alterações de resistência local e das características modais da estrutura.
- Idêntico esforço tem sido empenhado no sentido de incorporar os efeitos da torção.
- Surgem assim novos procedimentos que recorrem às AENL e que:
  - consideram os efeitos de modos de vibração superiores;
  - consideram os efeitos de torção;
  - são adaptativos.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

## Investigação

---

- No IST, o trabalho desenvolvido tem beneficiado do apoio de projectos de investigação nacionais financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).
- No âmbito do projecto **Performance-based Seismic Design Procedures** (POCI/ECM/59306/2004) realizou-se no final uma *workshop* internacional intitulado **Nonlinear Static Methods for Design Assessment of 3D structures**.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

# Investigação - Workshop

<http://www.3dpushover.org/>

## workshop on Nonlinear Static Methods for Design/Assessment of 3D Structures

5-6 May 2008, Lisbon, Portugal

Home  
Organizers  
Programme  
Participants  
Venue  
Contacts

sponsors



### About

A two-day workshop on *Nonlinear Static Methods for Design/Assessment of 3D Structures* will be held at the Department of Civil Engineering and Architecture of the Technical University of Lisbon (Instituto Superior Técnico - IST) on 5-6 May 2008. The Workshop is co-chaired by Dr. Rita Bento (IST, Lisbon, Portugal) and Dr. Rui Pinho (University of Pavia, Italy) and is organized within the scope of the Portuguese national research project POCI/ECM/59306/2004, named "Performance-based Seismic Design Procedures". The main Sponsor of the workshop is thus the Portuguese Foundation for Science and Technology (Fundação para a Ciência e a Tecnologia - FCT)

The workshop will bring together a group of earthquake engineering experts from USA, Italy, Greece, Iran, Slovenia and Portugal and its proceedings will be published in the form of an IST Press book.

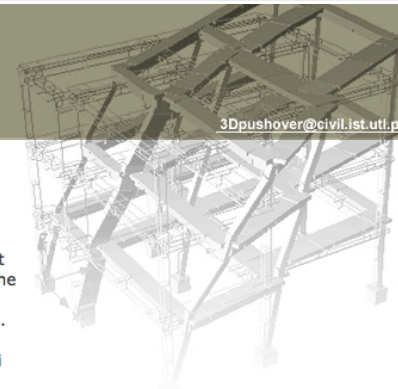
It is aimed that the Workshop will constitute a forum for the exchange of research results and ideas on Nonlinear Static Analysis procedures and their applicability for the seismic design/assessment of 3D irregular structures. As such, pertinent issues such multi-directional loading, diaphragm modelling effects, multi-modal and adaptive pushover algorithms, etc, will be amongst the topics open to debate and scrutiny.

It is therefore believed that the Workshop will provide a valuable contribution to the further development and implementation of nonlinear static methodologies for the seismic assessment and design of irregular structures that may not be analysed by means of 2D planar models.

### Latest News



**23/01/2009** - The [3DPUSHOVER 2008 Book](#) is now available. To order please send an email to [ist-press@ist.utl.pt](mailto:ist-press@ist.utl.pt).



[3dpushover@civil.ist.utl.pt](mailto:3dpushover@civil.ist.utl.pt)

**Análises Estáticas Não Lineares (Pushover) para o Dimensionamento e Avaliação Sísmica de Estruturas**





INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

## Investigação

---

- No IST, o trabalho desenvolvido tem beneficiado do apoio de projectos de investigação nacionais financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).
- No âmbito do projecto **Performance-based Seismic Design Procedures** (POCI/ECM/59306/2004) realizou-se no final uma Workshop internacional intitulado **Nonlinear Static Methods for Design Assessment of 3D structures**.
- O segundo projecto, intitulado **Nonlinear Static Methods for the Assessment/Design of 3D irregular structures**, pretende verificar e aperfeiçoar as recomendações definidas na Workshop progredindo assim no recurso das análises estáticas não lineares para a avaliação/dimensionamento sísmico das estruturas irregulares.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

# Investigação – Projecto FCT em curso

<http://www.3disp.org/>



## 3D PUSHOVER

HOME

PROJECT

DISSEMINATION

NEWS

The project aims to study and evaluate the performance of a set of novel performance-based seismic design and assessment procedures to 3D irregular structures. It will also focus on the development of next-generation related procedures and guidelines.

This project builds upon the previous FCT research project POCI/ECM/59306/2004 which ended up with the organization of an [International Workshop on Nonlinear Static Methods for Design/Assessment of 3D structures](#). One of the main objectives of proposal is to improve the results obtained and to develop the recommendations proposed in the abovementioned Workshop taking a further step on the 3D Pushover problem.

The Nonlinear Static Procedures (NSP) are a powerful tool for performance evaluation. Seismic design codes, like the FEMA-273, FEMA-356, FEMA-440 and the ATC-40, have recommended the use of this type of procedures. More recently, the Eurocode8 also incorporated the procedure as an evaluation technique. However, some issues still need to be clarified regarding the format with which the pushover analysis has to be performed, thus requiring further research and development.

The existence of a national research group to work in this topic, closely following and influencing the latest and most relevant improvements in the subject, seems of obvious importance. Adequate international cooperation has been ensured, for Anil Chopra (University of California, Berkeley), Rakesh Goel (California Polytechnic State University, San Luis Obispo), Peter Fajfar (University of Ljubljana, Slovenia) and Rui Pinho (University of Pavia, Italy) have been invited and accepted to become consultants for this research project.



### Latest News

07/07/2010 - [Research Grant's](#)

**FCT**  
Fundação para a Ciência e a Tecnologia

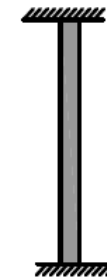
**ICIST**  
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAL, TERRITÓRIO E CONSTRUÇÃO

**Análises Estáticas Não Lineares (Pushover) para o Dimensionamento e Avaliação Sísmica de Estruturas**



## Modelos Não Lineares de Estruturas

- Modelos de Plasticidade Concentrada
- Modelos de Plasticidade Distribuída





### Modelos de Plasticidade Concentrada

Um modelo inicial, versátil, proposto por Giberson:

- Elemento linear, de comprimento igual ao elemento que se pretende modelar, com molas de rotação nas extremidades, com leis constitutivas não-lineares.



É necessário definir o comprimento do elemento com comportamento não linear

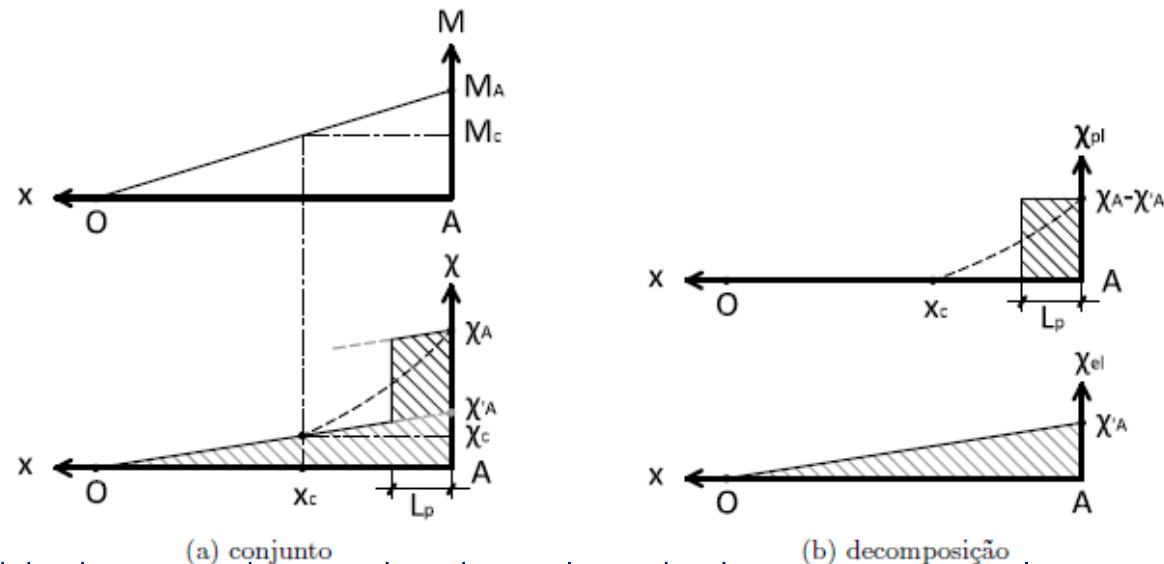


Comprimento de Rótula Plástica,  $L_p$

### Modelos de Plasticidade Concentrada

Comprimento de Rótula Plástica,  $L_p$

- Medida que tem em conta a propagação da deformação plástica ao longo do comprimento do elemento



- Admitindo um determinado valor de  $L_p$  para um elemento, pode estabelecer-se a relação  $M-\theta$  da rótula plástica através da relação  $M-\chi$  da secção.



### Modelos de Plasticidade Concentrada

Comprimento de Rótula Plástica,  $L_p$ , é condicionado por:

- Distância entre a extremidade do elemento e o ponto em que o diagrama de momentos se anula;
- Diagrama Momento-Curvatura da secção.

Existem expressões empíricas para estimar o comprimento de rótula plástica, que geralmente dependem do comprimento  $l$ , da tensão de cedência do aço  $f_y$  e do diâmetro médio dos varões longitudinais  $d_{bL}$ , ou ainda da altura útil da secção  $d$ , entre outros.

- Expressões compiladas por Park & Paulay:  
$$L_p = k_1 k_2 k_3 \left(\frac{l}{d}\right)^{\frac{1}{4}} d \quad L_p = 0,2\sqrt{d} \left(\frac{l}{d}\right) + 0,5d$$

$$L_p = 0,8k_1 k_3 \left(\frac{l}{d}\right) c \quad L_p = 0,05l + 0,5d$$

- Paulay & Priestley:

$$L_p = 0,08l + 0,022f_y d_{bL}$$

- EC8:

$$L_p = 0,1l + 0,015f_y d_{bL}$$



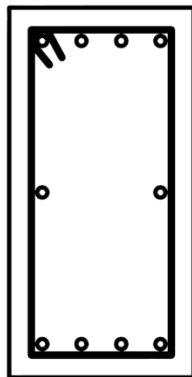
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

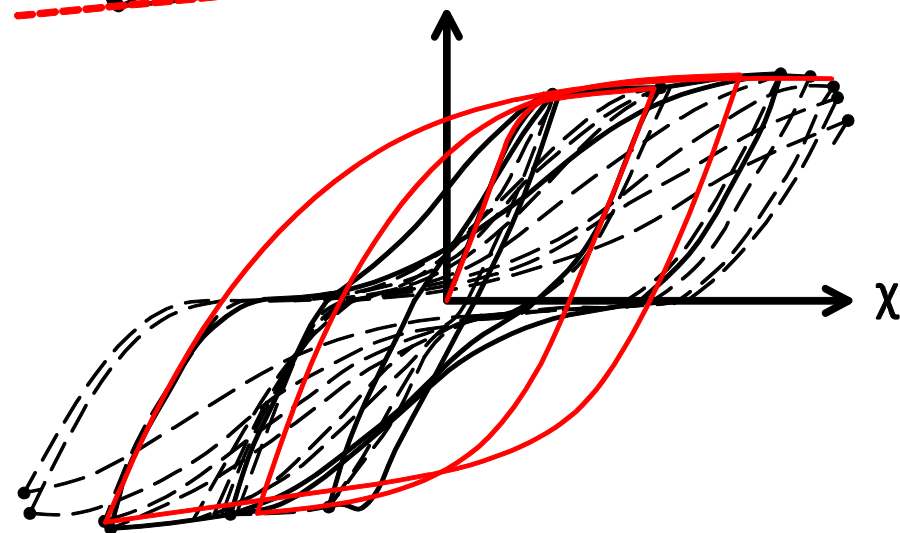
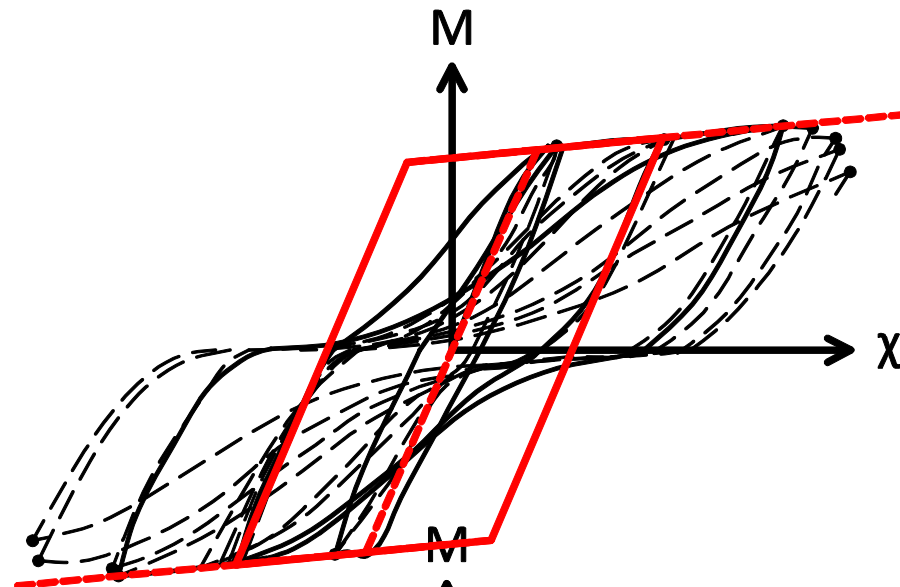
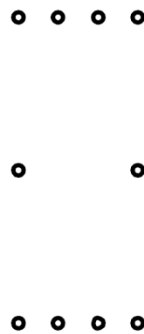
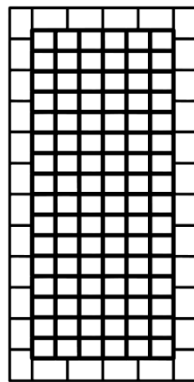
## Modelos Não Lineares

### Modelos de Secção

Histeréticos



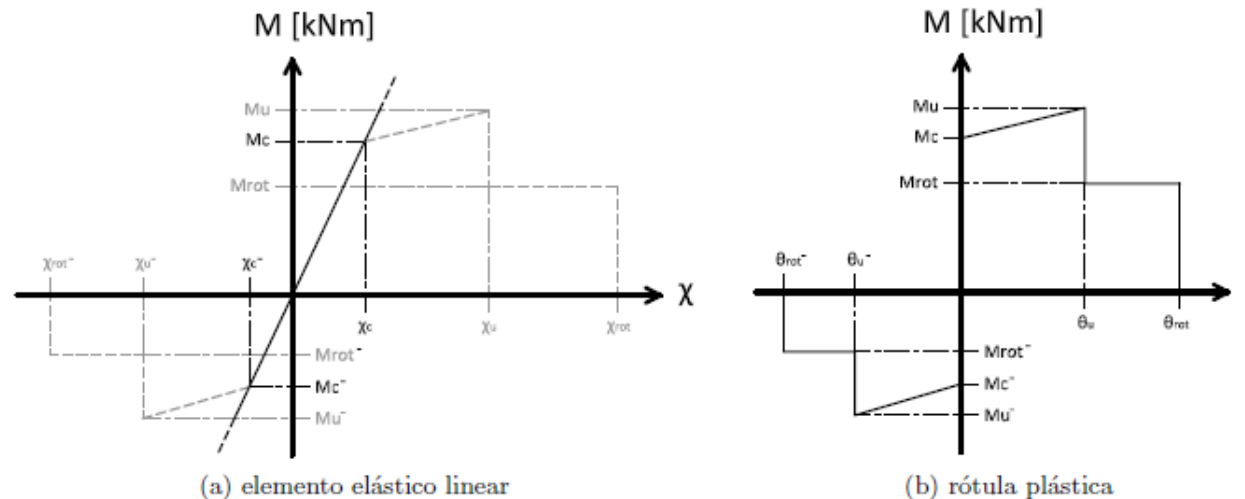
Fibras



### Modelos de Plasticidade Concentrada

Relações fenomenológicas - Histeréticas:

- A relação momento-rotação  $M-\theta$  é determinada através da relação momento curvatura  $M-X$ , para o esforço axial médio instalado na secção, e do comprimento de rótula plástica  $L_p$ .







INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

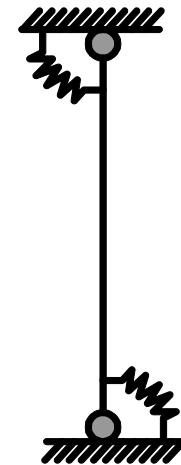
FUNDEC

## Modelos Não Lineares

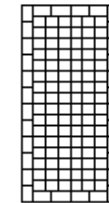
### Modelos de Plasticidade Concentrada

Modelos de Fibras:

- Com este modelo, a relação histerética fica automaticamente definida através das relações histeréticas dos materiais.
- São modelos consideravelmente mais sofisticados, cuja rigidez é determinada automaticamente pelos programas com a interação entre a flexão em ambas as direções e o esforço axial em cada instante de carga.
- O conceito de comprimento de rótula plástica  $L_p$  mantém-se.



(a) secção



(b) fibras betão



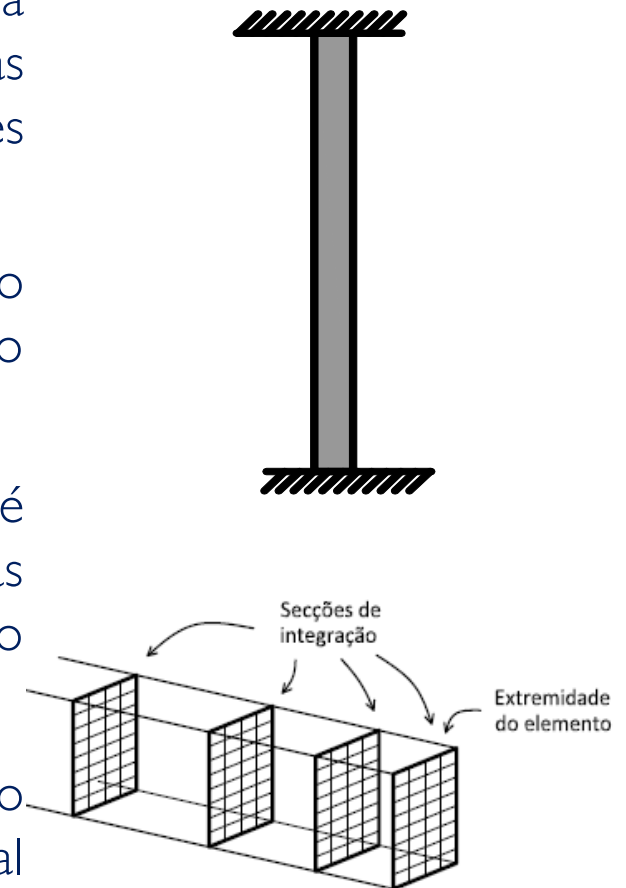
(c) fibras aço



## Modelos Não Lineares

### Modelos de Plasticidade Distribuída – Modelo de Fibras

- Estes modelos idealizam o elemento através da sua discretização em fibras, pelo menos nas zonas onde se concentram as deformações inelásticas
- Esta é feita ao longo do comprimento do elemento e ao nível da própria secção (modelo de fibras).
- A obtenção da matriz de rigidez do elemento é obtida a partir da integração numérica das matrizes de rigidez das diversas secções ao longo do comprimento  $L$  do elemento.
- As relações constitutivas para a secção são obtidas a partir do comportamento do material que constitui as fibras: aço e/ou betão.





### Modelos de Plasticidade Distribuída – Modelo de Fibras

- A idealização dos elementos a partir da discretização exige, para cada passo de integração, um número elevado de operações para a construção da matriz de rigidez tangente do elemento e para o cálculo de tensões e extensões ( $\sigma$  e  $\epsilon$ ) ao nível das fibras.
- Únicos capazes de representar o alastramento da inelasticidade ao longo dos elementos.
- Permite reproduzir, diferentes fenómenos característicos dos elementos de betão armado quando sujeitos a carregamentos repetidos e alternados.



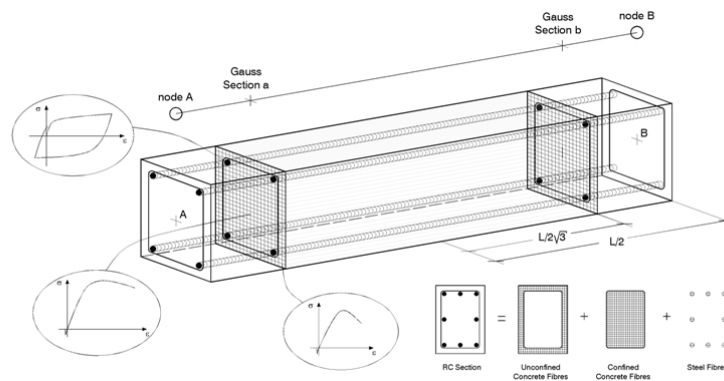
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

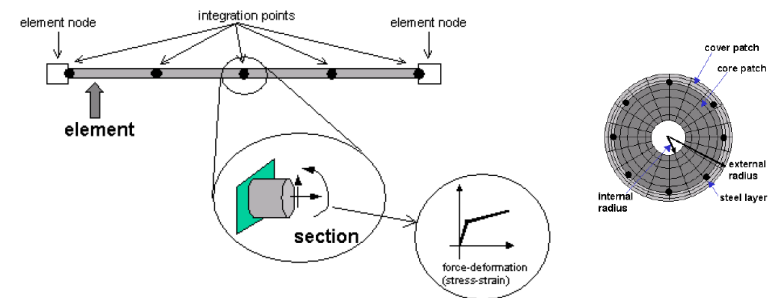
# Modelos Não Lineares

## Modelos de Plasticidade Distribuída – Modelo de Fibras

### Seismostruct



### OpenSEES





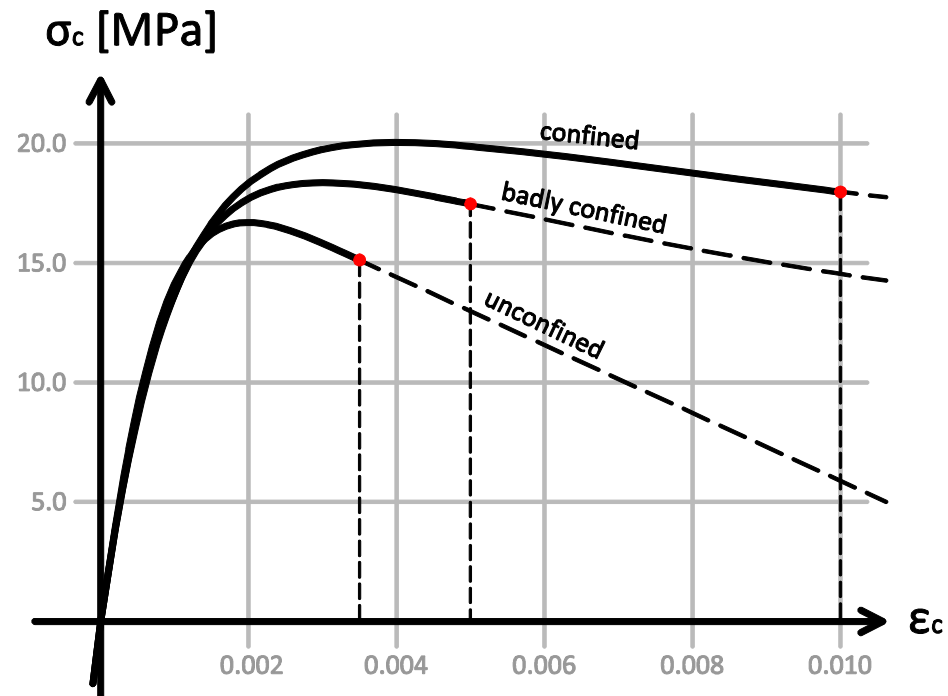
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

## Modelos Não Lineares

### Comportamento Não Linear dos Materiais

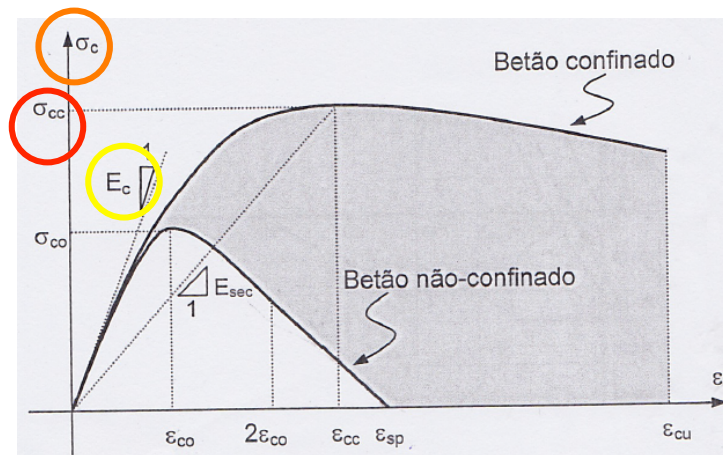
Betão



### Comportamento Não Linear dos Materiais

#### Betão

A relação constitutiva monotónica que, usualmente, é adoptada é a definida por Mander, estando também prescrita no EC8, parte 2.



A relação constitutiva do **Betão Confinado** para solicitações monotónicas segue a seguinte lei:

$$\sigma_c = \frac{xr}{x^r + r - 1} \sigma_{cc}$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

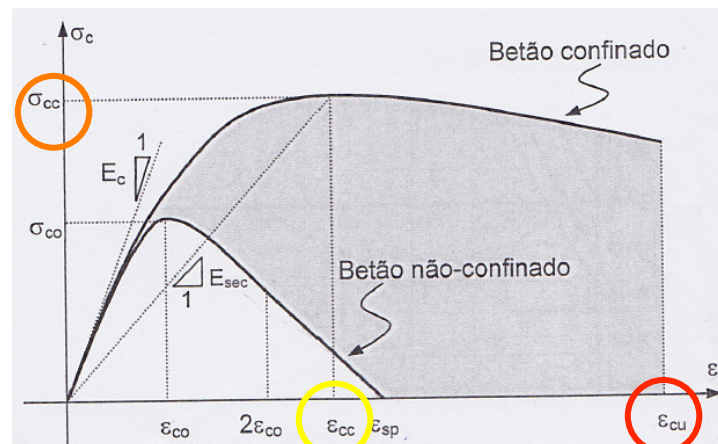
De acordo com o modelo de Mander, a rigidez tangente na origem depende apenas da resistência máxima do **Betão não-confinado**:

$$E_c = 5000 \sqrt{\sigma_{co}}$$

## Comportamento Não Linear dos Materiais

### Betão

Modelo de Mander (EC8, parte 2) – Betão Confinado



A partir das propriedades do betão não confinado juntamente com a pressão de confinamento lateral  $\sigma_l$ , determinam-se as propriedades do Betão confinado.

$$\sigma_{cc} = \sigma_{co} \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94\sigma_l}{\sigma_{co}}} - 2 \frac{\sigma_l}{\sigma_{co}} \right) \quad \text{Extensão última:} \quad \varepsilon_{cu} = 0.004 + 1.4\rho_s \frac{\sigma_{yp}\varepsilon_{su}}{\sigma_{cc}}$$

$\sigma_{yp}$  - Tensão de Cedência da Armadura de Confinamento

$\rho_s$  - Rácio volumétrico da armadura de Confinamento

$\varepsilon_{su}$  - Extensão última da Armadura de Confinamento

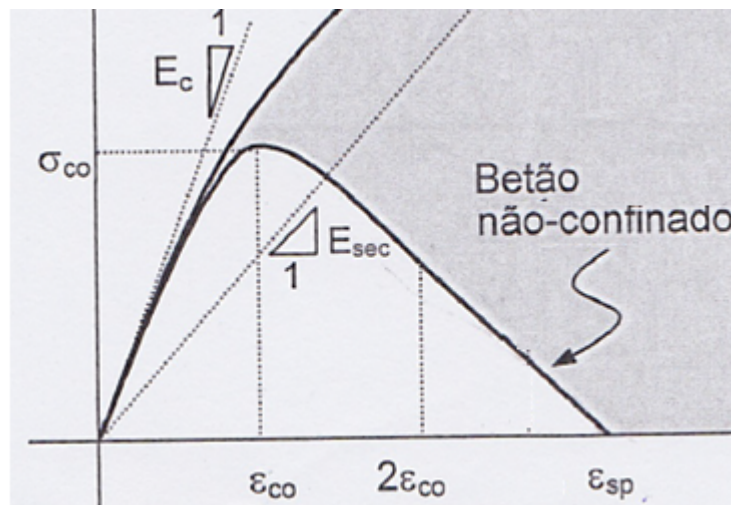
$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{co}} - 1 \right) \right]$$



### Comportamento Não Linear dos Materiais

#### Betão Não Confinado

No que se refere ao **Betão não-confinado**, a relação constitutiva segue o mesmo modelo, ou seja, baseia-se nas equações prescritas para o betão confinado, para extensões inferiores a  $2 \epsilon_{co}$ , admitindo a partir de aqui um comportamento linear até atingir tensão nula para a extensão em que ocorre o descasque do betão,  $\epsilon_{sp}$ .

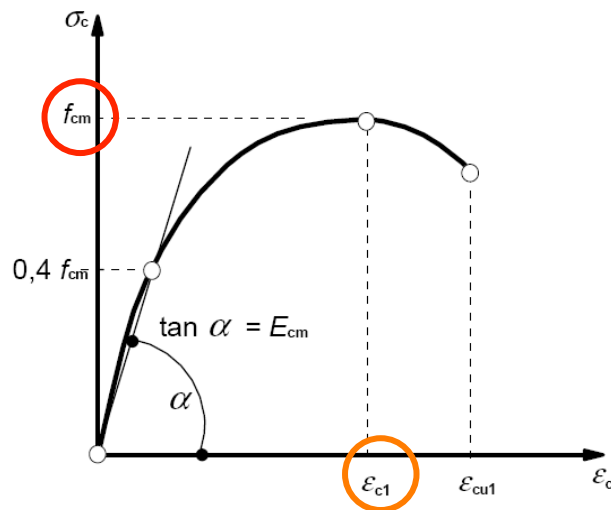






## Comportamento Não Linear dos Materiais

### Betão Não Confinado



Quadro 3.1 do EC2 – parte 1

Classes de resistência do betão														
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
$f_{cm}$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
$f_{ctm}$ (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk, 0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
$E_{cm}$ (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
$\epsilon_{c1}$ (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
$\epsilon_{cu1}$ (‰)					3,5					3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
$\epsilon_{c2}$ (‰)					2,0					2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
$\epsilon_{cu2}$ (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
$n$					2,0					1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
$\epsilon_{c3}$ (‰)					1,75					1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
$\epsilon_{cu3}$ (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6



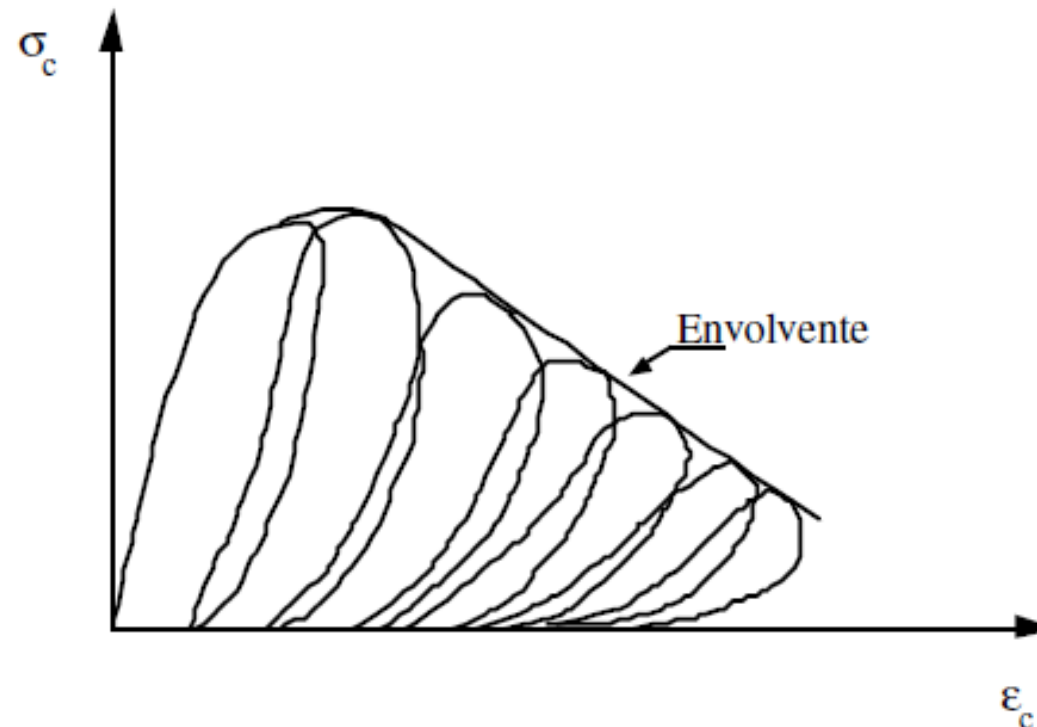
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

FUNDEC

## Modelos Não Lineares

### Comportamento Não Linear dos Materiais

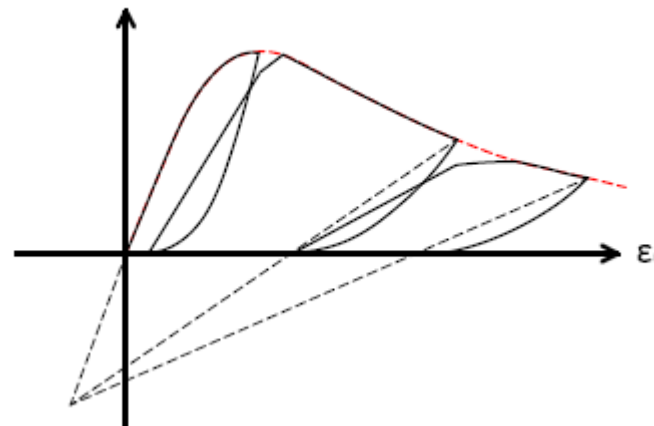
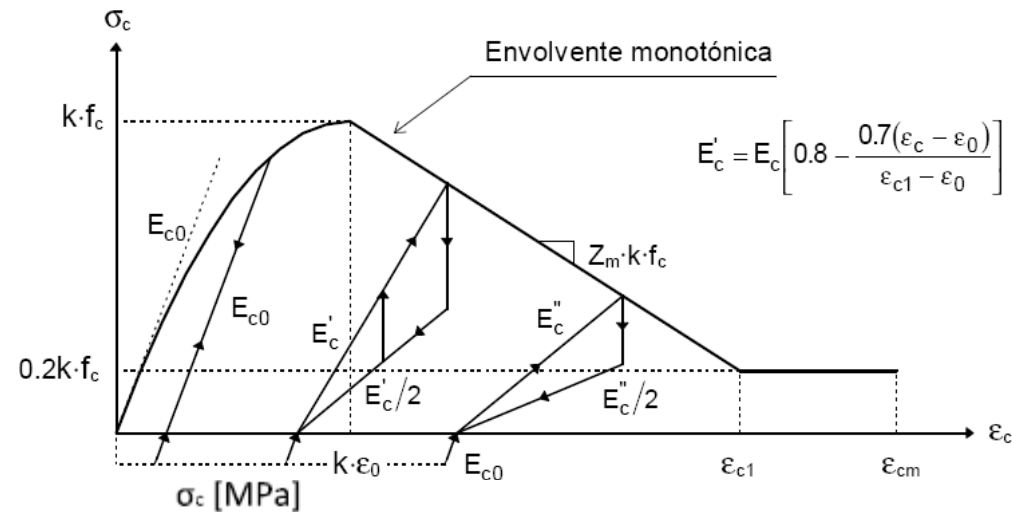
#### Betão – comportamento cíclico



Envolvente reflecte comportamento monotónico

## Comportamento Não Linear dos Materiais

### Betão – comportamento cíclico - Modelos

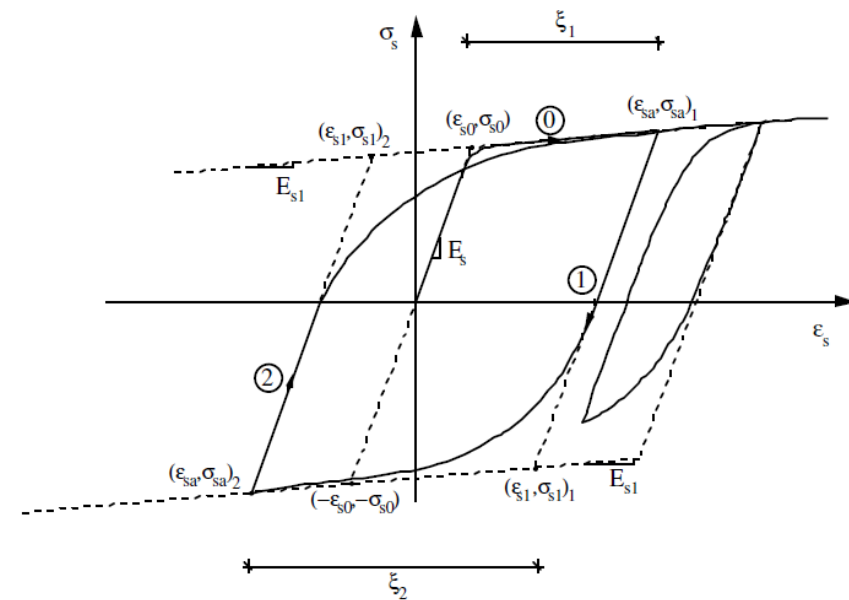
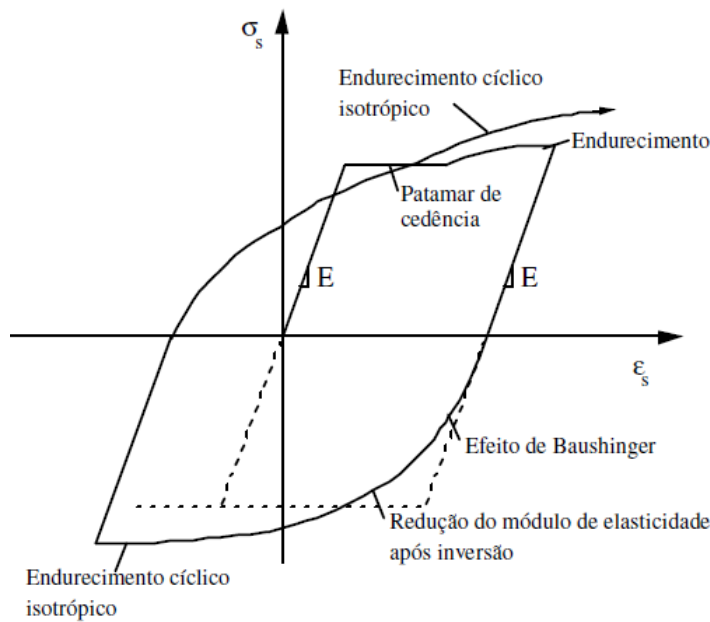


Modelo de Mander *et al*

## Comportamento Não Linear dos Materiais

### Aço

Comportamento característico dos varões de aço quando submetidos a carregamento alternado e repetido:



Modelo de Giuffrè-Menegotto-Pinto



## Métodos – Equações Não Lineares

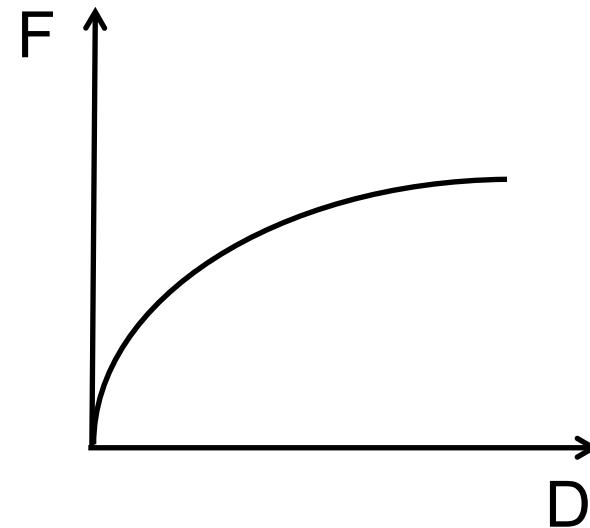
---

Para resolver as equações não lineares

$$\{F\} = [K]\{D\}$$

há basicamente 3 métodos:

1. Métodos Incrementais
2. Métodos iterativos
3. Métodos Mistos





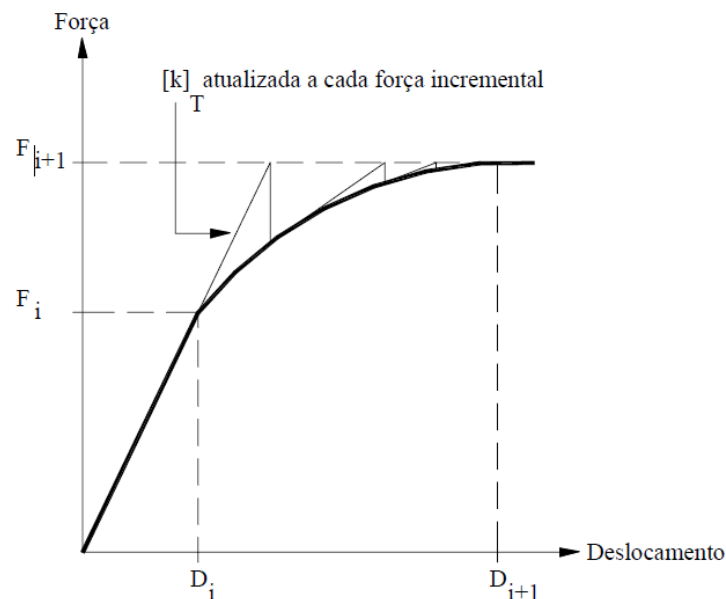
## Métodos – Equações Não Lineares

### Método Newton - Raphson

Método em que em cada iteração se assume que a relação entre tensão e deformação é linear e igual a derivada no ponto em que se encontra essa iteração.

Este método consiste em analisar o problema em causa dividindo-o numa série de incrementos e para cada incremento executar sucessivas iterações até o resultado apresentar um erro suficientemente baixo.

Cada iteração corresponde a calcular a resposta em regime elástico linear com base nos módulos de elasticidade tangentes obtidos no final da iteração anterior.





## Método Newton - Raphson

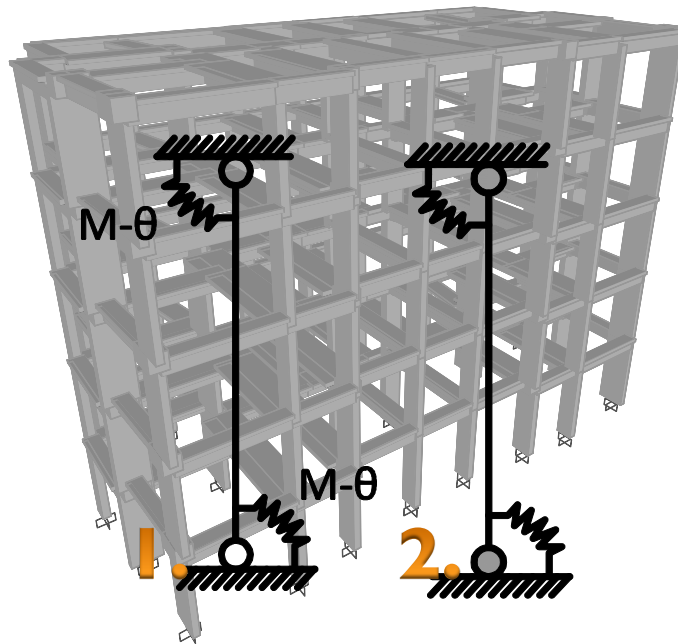
---

Em termos práticos pode adoptar-se o procedimento apresentado em seguida:

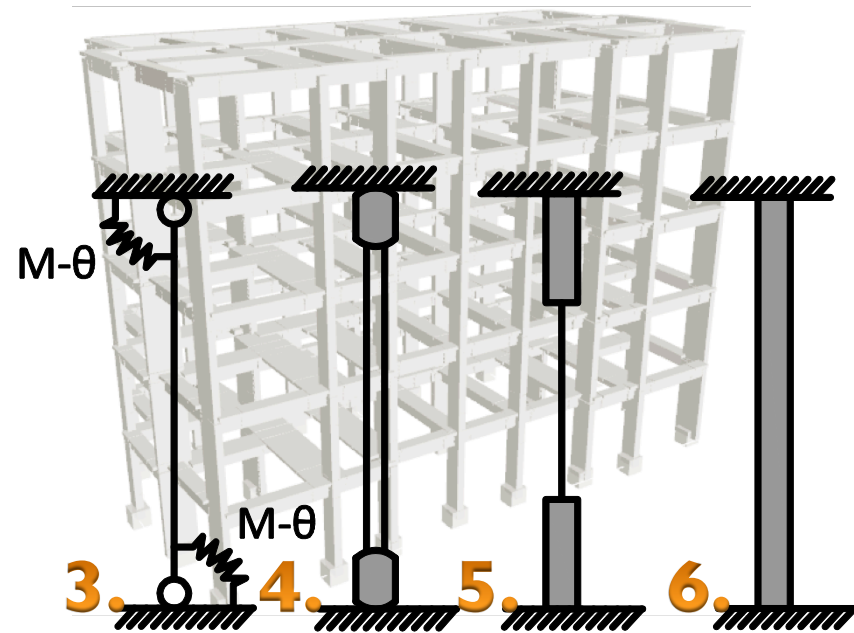
1. Começa-se com valores de deformação inicial  $D_i$  e com um valor de esforços  $F_i$  para os quais se deseja calcular as deformações.
2. Para  $D_i$  calcula-se a matriz  $[K]_i$  como que representa a matriz de rigidez tangente.
3. Com esta matriz  $[K]_i$  e com os esforços  $F_i$  calculam-se o valores de  $\Delta D_i$  e os novos valores de deformação  $D_{i+1}$ .
4. Tomando os valores de  $D_{i+1}$  calcula-se a matriz  $[K]_{i+1}$  e os esforços "reais" correspondentes a essas deformações,  $F_{i+1}$ .
5. Comparando esses esforços  $F_{i+1}$  com os esforços que se desejam obter  $F$  obtém-se a diferença  $\Delta F_{i+1}$ .
6. Repetem-se os passos 1 a 5 com os novos valores de  $D_{i+1}$ ,  $[K]_{i+1}$  e  $F_{i+1}$  até que se atinja um valor de  $F_{i+1}/F < \text{Tolerância}$ .

## Modelos Não Lineares – Caso de Estudo

### SAP2000



### SeismoStruct



1. Modelo plasticidade concentrada
2. Modelo plasticidade concentrada com a secção descrita a partir de um modelo de fibras



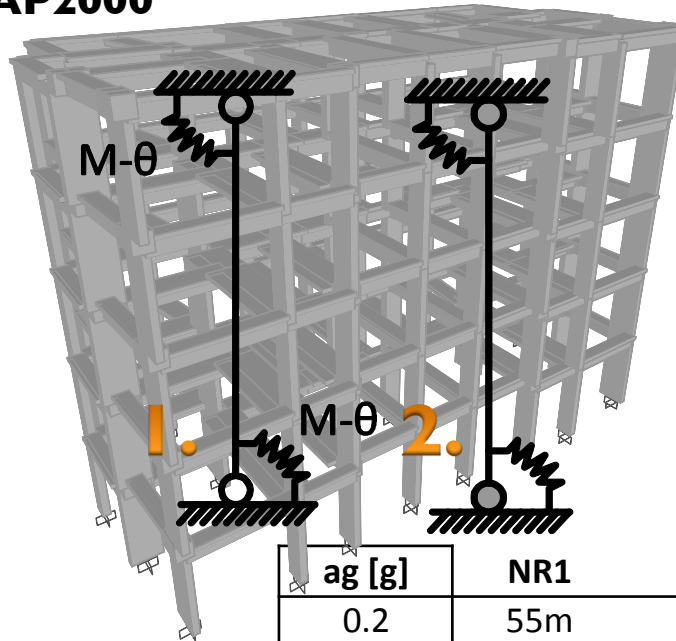


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

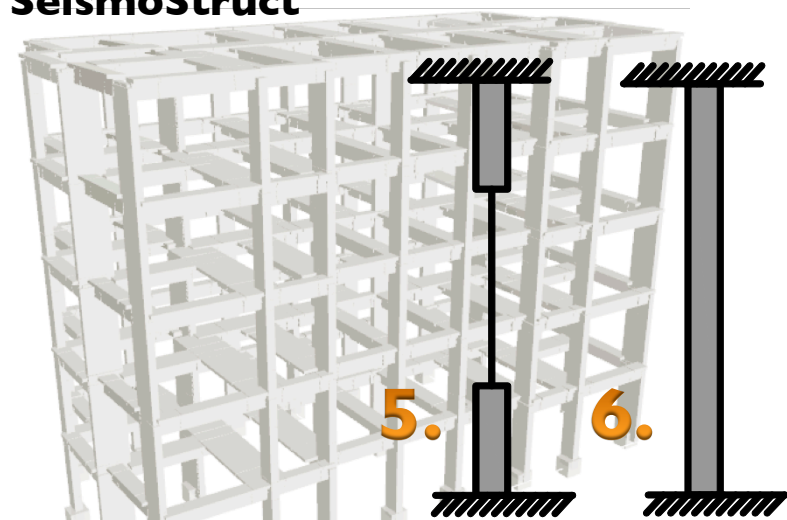
FUNDEC

## Modelos Não Lineares – Caso de Estudo

### SAP2000



### SeismoStruct



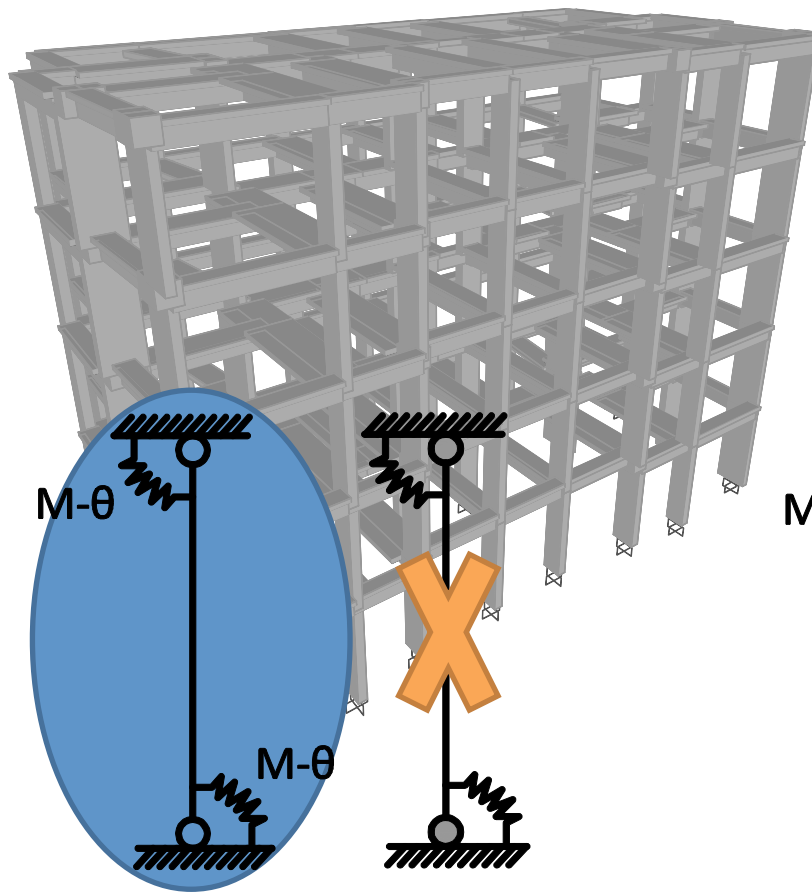
	ag [g]	NR1	NR2	TB1	TB2	WN1	WN2
1.	0.2	55m	50m	1h05m	1h10m	09m	1h16m
	0.3	36m	36m	2h02m	24m	19m	2h28m
	0.4	54m	2h20m	1h29m	26m	14m	50m
2.	0.2	2h26m	1h40m	3h05m	2h58m	3h16m	1h40m
	0.3	1h06m	2h03m	33m	30m	1h16m	1h20m
	0.4	2h57m	1h34m	40m	33m	1h32m	1h29m
5.	0.4	5h31m	7h38m	6h16m	6h07m	7h10m	6h38m
6.	0.2	2h23m	2h25m	2h21m	2h33m	2h55m	2h39m
	0.3	2h37m	2h33m	2h35m	2h50m	3h17m	2h25m
	0.4	3h03m	2h58m	3h16m	2h43m	1h13m	1h15m

Análises Estáticas Não Lineares (Pushover) para o Dimensionamento e Avaliação Sísmica de Estruturas

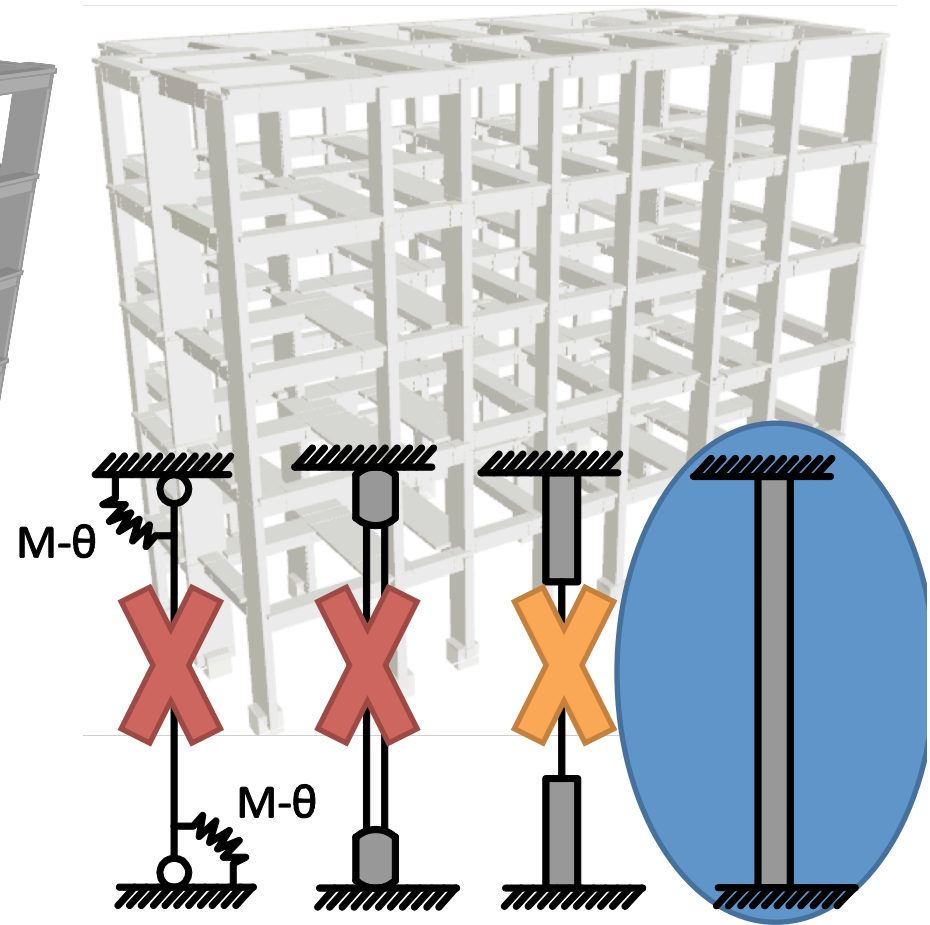


## Modelos Não Lineares – Caso de Estudo

**SAP2000**



**SeismoStruct**

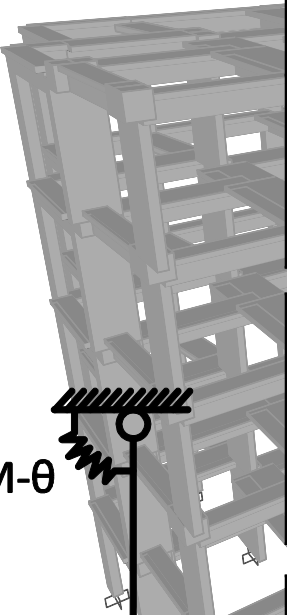
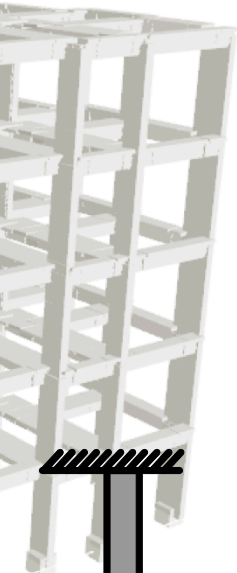
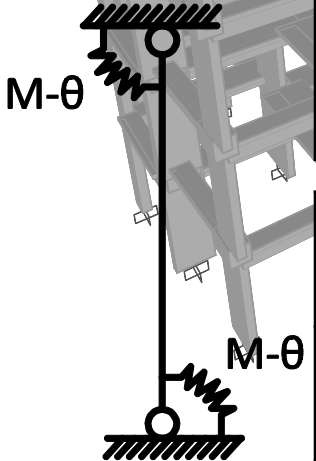




## Modelos Não Lineares – Caso de Estudo

### SAP2000

### SeismoStruct

	Modelos estruturais complexos - Fácil definir	Difícil definir modelos estruturais complexos	
	Difícil calibrar e modelar a não linearidade; mais parâmetros.	Fácil modelar, calcula automaticamente as nonlinearidades	
	Definição inadequada dos parâmetros não lineares pode conduzir a resultados inadequados	Resultados mais fiáveis	
	Análise rápida	Análise de modelos complexos; muito tempo	
	Fácil analisar os resultados	Análise de resultados mais complexa	



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

# **Análises Estáticas Não Lineares (*Pushover*) para o Dimensionamento e Avaliação Sísmica de Estruturas**

## **Parte 1**

**Rita Bento**

9 de Fevereiro de 2012

**FUNDEC**



## Modelos Não Lineares

### Comportamento Não Linear dos Materiais

#### Betão

##### Pressão de Confinamento

A pressão de confinamento lateral máxima devida às armaduras de confinamento apenas se desenvolve de forma eficiente na zona do núcleo de betão em que é possível a formação do efeito de arco.

$$\sigma_l = \sigma_l^{uni} k_e$$

Tensão de Confinamento que resultaria de uma distribuição uniforme

$$\sigma_l^{uni} = \frac{2A_{sp}\sigma_{yp}}{sd_s}$$

$A_{sp}$  - Área de Armadura de Confinamento

Coefficiente de eficiência do confinamento

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}}$$

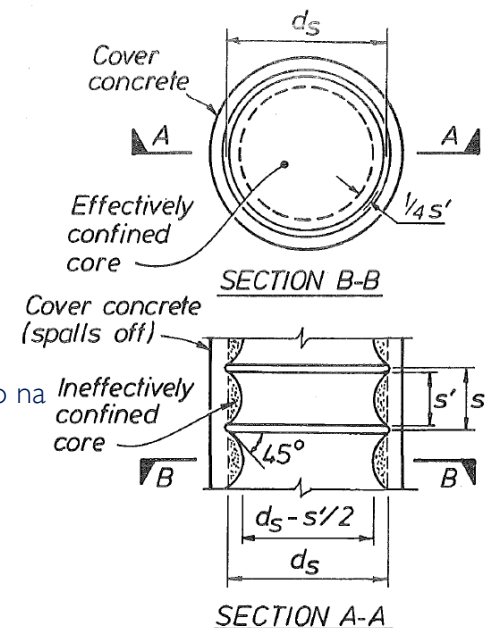
$A_e$  - Área efectivamente confinada

$A_{cc}$  - Área de betão no interior do estribo na secção em que este é colocado

$$A_{cc} = A_c(1 - \rho_{cc})$$

$A_c$  - Área bruta de betão confinado

$\rho_{cc}$  - Taxa de Armadura longitudinal





### Comportamento Não Linear dos Materiais

#### Betão

##### Pressão de Confinamento

- Secções Circulares

Pressão de confinamento em função do Rácio volumétrico da armadura de confinamento:

$$\sigma_l = \frac{1}{2} k_e \rho_s \sigma_{yp}$$

Para Cintas circulares

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2}{1 - \rho_{cc}}$$

Para Cintas helicoidais

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}}$$

Rácio volumétrico da armadura de confinamento:

$$\rho_s = \frac{A_{sp} \pi d_s}{\frac{\pi}{4} d_s^2 s} = \frac{4A_{sp}}{d_s s}$$



## Comportamento Não Linear dos Materiais

### Betão

#### Pressão de Confinamento

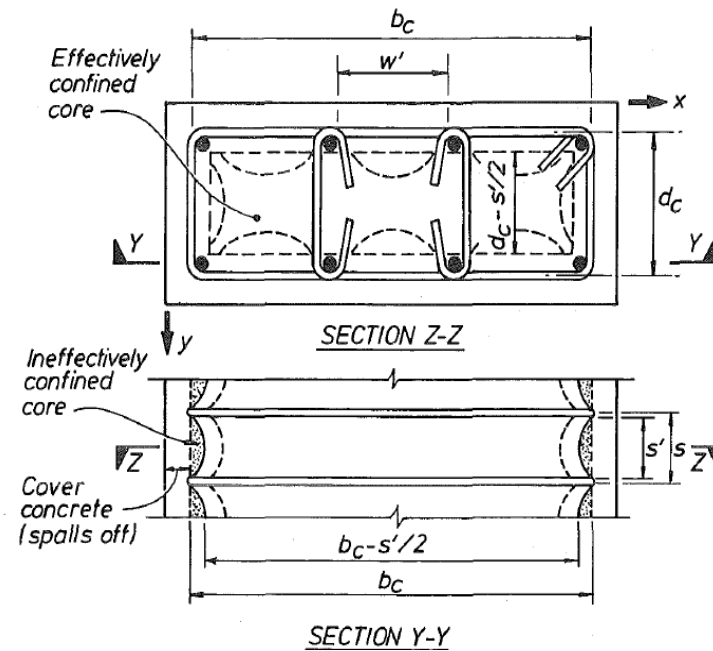
- Secções Rectangulares

$$\sigma_l = \sqrt{\sigma_{lx}\sigma_{ly}}$$

$$\sigma_{lx} = k_e \rho_x \sigma_{yp} \quad \sigma_{ly} = k_e \rho_y \sigma_{yp}$$

em que:

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{s d_c} \quad \rho_y = \frac{A_{sy}}{s b_c}$$



$$A_e = \left( b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \Rightarrow k_e = \frac{\left( 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6b_c d_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right)}{1 - \rho_{cc}}$$



### Comportamento Não Linear dos Materiais

#### Betão

##### Pressão de Confinamento

- Secções Rectangulares

A determinação da relação constitutiva do betão recorre a uma só pressão de confinamento, não diferenciando as diversas direcções.

Pode-se assim recorrer a um ábaco proposto por Schickert e Winkler que permite a determinação da relação  $\sigma_{cc}/\sigma_{co}$  para quaisquer relações de tensões de confinamento nas duas direcções.

