

NÃO CONFIDENCIAL



MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**HOMOGENEIDADE DA FIABILIDADE
CONFERIDA PELA CURVA DE
ENCURVADURA PORTUGUESA**

**Comparação com Outros
Regulamentos**

RELATÓRIO 133/89 – NCE

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NÃO CONFIDENCIAL

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS
Núcleo de Comportamento das Estruturas
Proc. 032/12/9372

HOMOGENEIDADE DA FIABILIDADE CONFERIDA PELA CURVA DE ENCURVADURA PORTUGUESA

Comparação com Outros
Regulamentos

RELATÓRIO 133/89 – NCE

Lisboa, Julho de 1989

Estudo subsidiado pelo PIDDAC no âmbito do processo
"Estudos de base no domínio das estruturas metálicas"

I&D
ESTRUTURAS

HOMOGENEIDADE DA FIABILIDADE CONFERIDA PELA CURVA DE ENCURVADURA PORTUGUESA. COMPARAÇÃO COM OUTROS REGULAMENTOS.

RESUMO

O presente trabalho pretende mostrar as possibilidades fornecidas pela utilização de um método de simulação no estudo da homogeneidade da fiabilidade, oferecida pelas curvas de encurvadura de colunas, de diferentes regulamentos de estruturas de aço.

Através de um modelo de cálculo geométricamente não linear, de que se faz uma breve apresentação e se descrevem alguns exemplos de aplicação, é feito o estudo da carga crítica de encurvadura de um perfil IPE 120, segundo o eixo de maior inércia. Os resultados apresentados referem-se a cerca de 1000 colunas diferentes, obtidas através de um método de simulação do tipo Monte-Carlo, para as quais se efectua a comparação entre os valores da carga crítica obtidos e os fornecidos por vários regulamentos, bem como a análise da homogeneidade da fiabilidade conferida pelos mesmos regulamentos em função das respectivas esbeltezas.

HOMOGENEITÉ DE LA FIABILITÉ APPORTÉE PAR LA COURBE DE FLAMBEMENT PORTUGAISE. COMPARAISON AVEC D'AUTRES RÉGLEMENTS.

RÉSUMÉ

Ce travail montre les possibilités fournies par l'utilisation d'un méthode de simulation dans l'étude de l'homogénéité de la fiabilité offerte par les courbes de flambement de différents règlements de calcul.

Un modèle géométriquement non linéaire, dont on fait une brève présentation et décrit quelques exemples d'application, est utilisé dans le calcul de la charge critique de flambement d'un profilé IPE 120, selon l'axe de plus grande inertie. Les résultats présentés se rapportent à 1000 poteaux différents, obtenus par des simulations selon une méthode de type Monte-Carlo, pour lesquels on fait une comparaison entre les valeurs de la charge critique évalués et ceux indiqués par divers règlements, aussi que l'analyse de l'homogénéité de la fiabilité fournie par ces règlements en fonction des élancements respectifs.

HOMOGENEITY OF THE RELIABILITY GIVEN BY THE PORTUGUESE BUCKLING CURVE. COMPARISON WITH OTHER CODES.

SUMMARY

The possibilities given by a simulation method on the study of the homogeneity of the reliability, provided by the buckling curves from different codes, are shown in the present article.

A geometrically non-linear model, from which a brief introduction and some application examples are presented, is used on the computation of the buckling critical load of a IPE 120 profile over his strongest axis. The results are referred to 1000 different columns obtained by simulations using a Monte-Carlo method. A comparison between the critical loads evaluated and those indicated by different codes is presented. The analysis of the homogeneity of the reliability, related to the columns slenderness, is made for these codes.

HOMOGENEIDADE DA FIABILIDADE CONFERIDA
PELA CURVA DE ENCURVADURA PORTUGUESA
COMPARAÇÃO COM OUTROS REGULAMENTOS

1 - INTRODUÇÃO

A estabilidade das estruturas de aço depende essencialmente do carácter aleatório das variáveis que as caracterizam (como seja, por exemplo, as dimensões, a tensão de cedência, as deformações iniciais ou a intensidade e modo de aplicação das acções a que se encontram sujeitas). No âmbito de uma análise determinística, os cálculos baseiam-se nos valores médios ou nos valores característicos destas variáveis, devidamente ponderados por coeficientes de segurança destinados a cobrir os possíveis efeitos das imperfeições geométricas ou mecânicas dos materiais utilizados ou das variações das acções.

Os regulamentos de cálculo das construções têm como finalidade principal estabelecer critérios de verificação da segurança de modo a assegurar às estruturas um adequado grau de fiabilidade. Alguns deles têm mesmo como objectivo garantir às estruturas uma segurança dita "homogénea", quando calculadas com base nas disposições regulamentares neles incluídas.

O presente artigo propõe um método para apreciar a referida homogeneidade. Para tal, é necessário recorrer à melhor modelização possível do comportamento mecânico das estruturas, pelo que se impõe a utilização de um modelo de cálculo geometricamente não linear. O índice de fiabilidade [1], aqui utilizado, se bem que não possibilite estimar com precisão a probabilidade de ruína, é no entanto suficiente para permitir efectuar as comparações apresentadas.

A associação do modelo mecânico e do factor de fiabilidade, obtido através de um método de simulação do tipo Monte - Carlo, permite avaliar a homogeneidade

da fiabilidade oferecida pela curva de encurvadura do Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios [2] e, simultaneamente, compará-la com a conferida por regulamentos de outros países.

2 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE CÁLCULO

A ideia base do presente estudo é a de estudar a resposta de uma estrutura em função de um grande número de efeitos aleatórios, estimando-se em seguida, através de um tratamento estatístico dos resultados obtidos, um Índice de fiabilidade. Na Figura 1 apresenta-se um esquema resumindo o processo seguido.

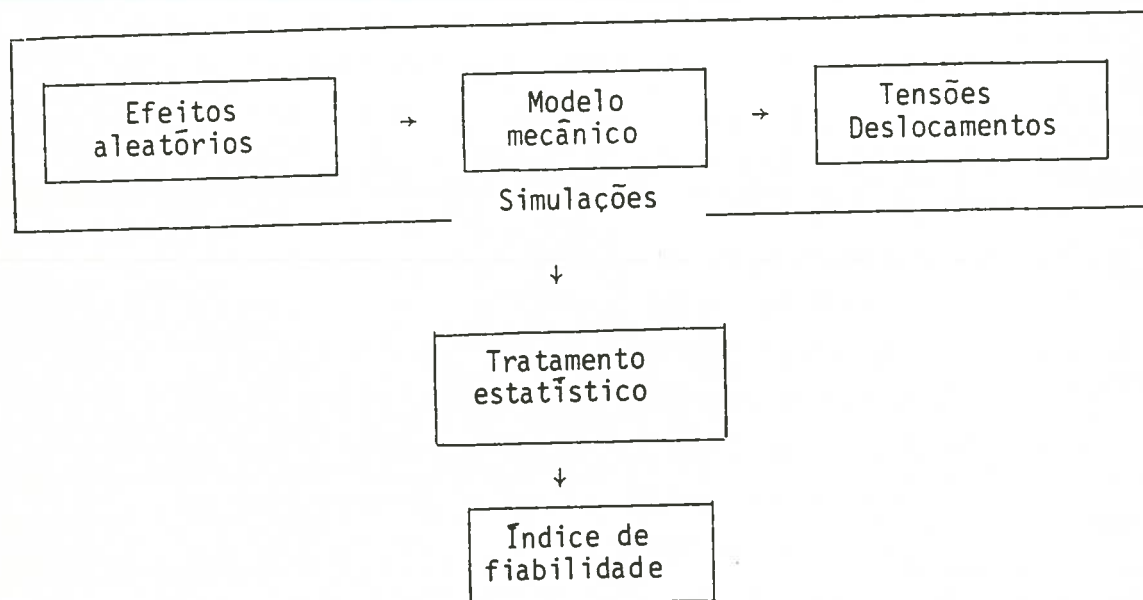


Figura 1 - Esquema do método

2.1 - Modelo mecânico

A estimativa probabilística da fiabilidade impõe a utilização de métodos de cálculo que conduzam a uma representação tão fiel quanto possível do comportamento real das construções. Elaborou-se um modelo mecânico geometricamente não-linear [3], de modo a permitir efectuar um cálculo suficientemente preciso dos deslocamentos e dos esforços em função das cargas aplicadas, inclusivē quando estes deslocamentos atinjam valores muito elevados (fase de "snap-through", por exemplo). Este modelo apresenta a particularidade de realizar o cálculo dos efeitos actuaes, sobre uma estrutura plana qualquer, sem necessitar de integrações numéricas nem de um número demasiado elevado de iterações, podendo por isso ser associado a

um método de simulação sem que o tempo de cálculo requerido seja muito importante.

Um exemplo determinístico mostrando as suas possibilidades é em seguida apresentado. Refere-se à evolução do comportamento de uma estrutura comportando uma dupla fase de "snap" ao longo do seu carregamento [4].

Na figura 2 apresenta-se a geometria da estrutura estudada. Todas as ligações são articulações perfeitas. A área da secção de cada elemento é igual a 9000 mm^2 e o módulo de elasticidade igual a 10^2 MPa . A discretização é realizada em 8 elementos.

O primeiro "snap" é produzido por uma força, P , de 340 N e o segundo por uma de 170 N . As evoluções dos nós 3 e 5 são representadas nas figuras 3 e 4, em função da intensidade da força aplicada. A figura 5 apresenta alguns dos estados de deformação desta estrutura.

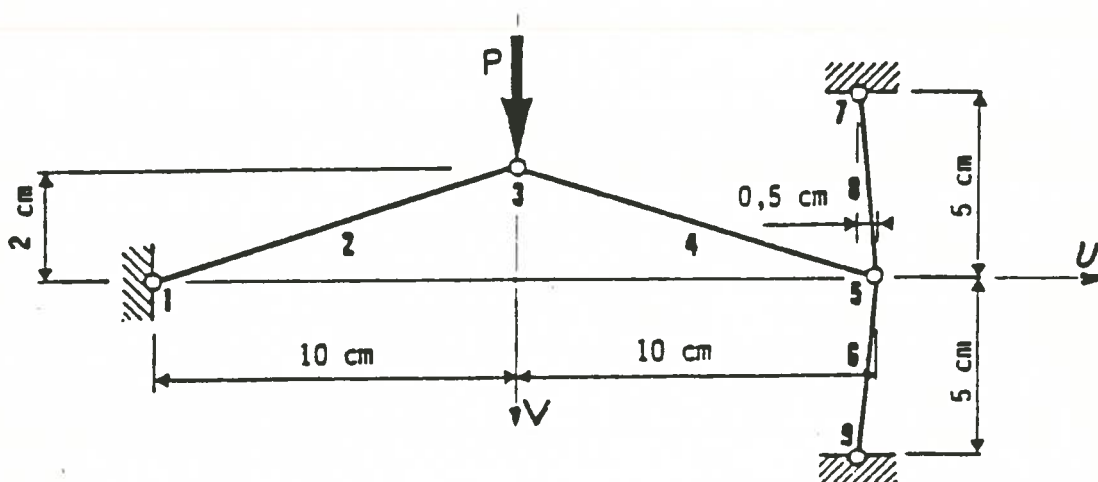


Figura 2 - Geometria inicial da estrutura

Se bem que tais evoluções sejam pouco frequentes em Engenharia Civil, este exemplo mostra no entanto que o modelo fornece resultados precisos, mesmo em casos de comportamento fortemente não - linear.

O aspecto probabilístico necessita que os resultados sejam obtidos com suficiente precisão a fim de não filtrar ou atenuar a influência de certos parâmetros. Um modelo capaz de acompanhar comportamentos do tipo que se acaba de exemplificar garante que os resultados obtidos para carregamentos menos intensos serão bastante

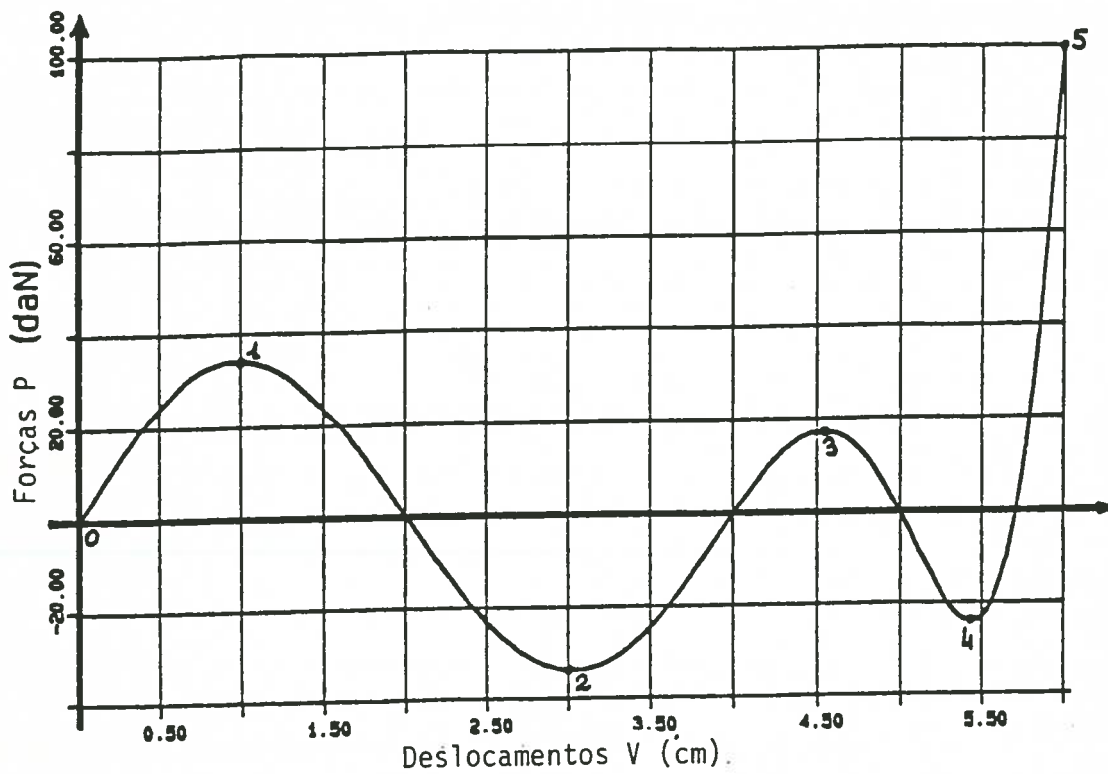


Figura 3. Deslocamentos verticais do n^o 3 em função da força aplicada

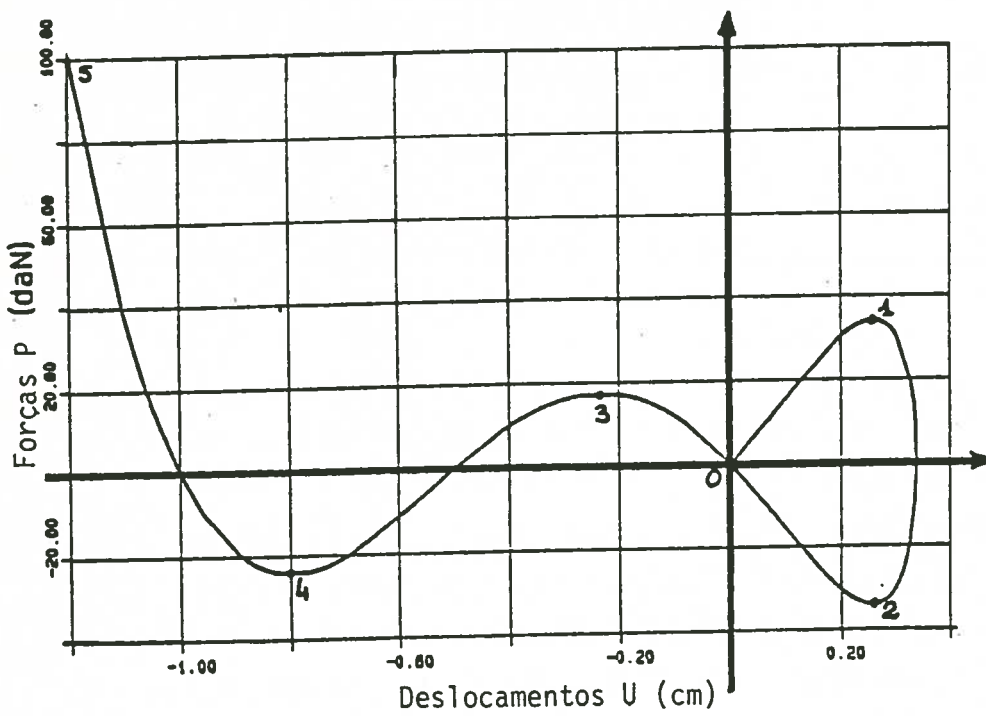


Figura 4. Deslocamentos horizontais do n^o 5 em função da força aplicada

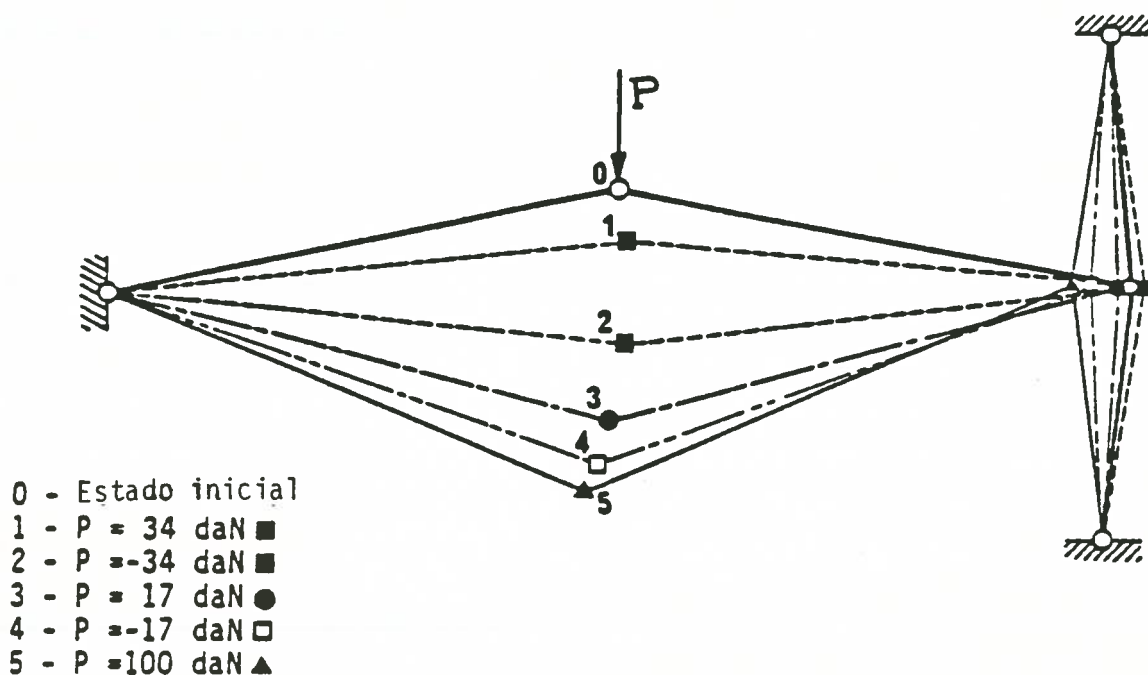


Figura 5 - Deslocamentos da estrutura para diferentes carregamentos

precisos. Além disso, o carácter aleatório de certas evoluções (varejamento muito antes da carga crítica teórica, por exemplo, para estruturas em que se combinem um grande número de defeitos desfavoráveis) impõe que o modelo mecânico seja capaz de seguir as evoluções do tipo "snap - through".

Muitos outros exemplos de cálculo justificando a validade do modelo encontram-se na referência [3], para cuja leitura se remete o leitor mais interessado.

2.2 - Modelo Probabilístico

A análise probabilística baseia-se no índice de fiabilidade β [1]. Este índice, cujo cálculo é relativamente simples, não permite um cálculo preciso da probabilidade de ruína mas revela-se suficiente para um estudo comparativo.

O índice de fiabilidade β é igual à razão entre a média e o desvio - padrão da função de comportamento Z , obtida a partir da diferença entre os valores admissíveis (ou resistentes) R e os valores actuantes A , dos parâmetros considerados na verificação da segurança em relação a um dado estado limite [12].

O índice β obtém-se, portanto, a partir da expressão:

$$\beta = \frac{m(Z)}{s(Z)}$$

em que $m(Z)$ e $s(Z)$ representam, respectivamente, a média e o desvio - padrão da função Z , calculada a partir dos valores de R e A , obtidos por simulação, de acordo com a seguinte expressão:

$$Z = R - A$$

Para valores de $Z < 0$ estar-se-ã em situações de ruína, isto é em situações em que foram ultrapassados os estados limites considerados.

A figura 6 fornece uma representação gráfica deste índice de fiabilidade. É possível observar que ele corresponde à distância, expressa em função do desvio - padrão, entre o valor médio de Z e a origem do sistema cartesiano. A medida da zona sombreada corresponde à probabilidade de ruína.

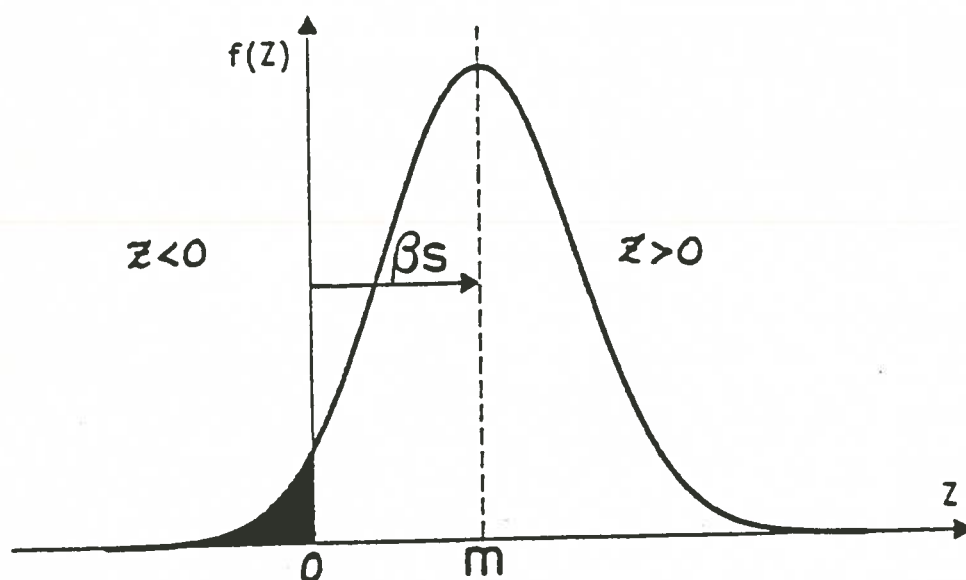


Figura 6 - Representação do Índice de fiabilidade β

A comparação dos regulamentos a apresentar em seguida, baseia-se no cálculo de colunas bi-articuladas constituídas por perfis IPE 120 de aço E24 (Tensão de cedência $\sigma_c = 240$ MPa).

Supõe-se que o varejamento dos perfis segundo o seu eixo de menor inércia se encontra impedido. As características principais destes perfis encontram-se representadas na figura 7.

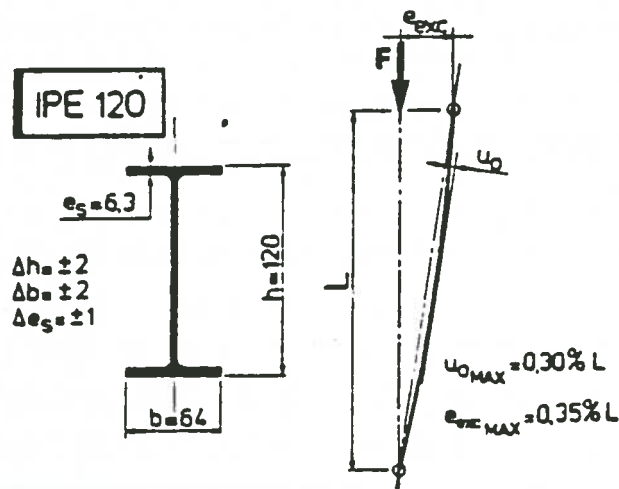


Figura 7 - Características dimensionais dos perfis

Seja $X = (X_1, \dots, X_n)^T$ o vector aleatório das variáveis de base associado a cada coluna. Para o presente estudo, X possui oito componentes a seguir discriminadas:

- X_1 : defeito de rectitude u_0 ,
- X_2 : variação de altura, Δh , da secção do perfil,
- X_3 : variação da largura, Δb , dos banzos do perfil,
- X_4 : variação de espessura, Δe_s , dos banzos do perfil,
- X_5 : excentricidade da força axial aplicada, e_{exc} ,
- X_6 : tensão de cedência, σ_c ,
- X_7 : módulo de elasticidade, E ,
- X_8 : intensidade da força axial aplicada, F .

A influência das tensões residuais não é tomada em conta no presente trabalho. Com efeito, o conhecimento da sua distribuição estatística é ainda, actualmente, insuficiente para se poder elaborar uma modelização assaz representativa.

As variáveis aleatórias associadas às características geométricas supõem-se

distribuídas segundo leis normais. A sua média é nula e foi-lhes atribuída uma probabilidade de 2,3% de poderem assumir valores superiores (ou inferiores) aos seus valores característicos, tomados como iguais às respectivas tolerâncias nominais. Supõe-se ainda que os sistemas de controle de fabrico e de colocação em obra impedem a utilização de perfis que não respeitem os limites de tolerância, o que corresponde a truncar a curva de distribuição da lei de Gauss em ambas as extremidades.

Supõe-se que o defeito de rectitude corresponde a uma deformada inicial dos perfis de forma sinusoidal modal.

A tolerância relativa à excentricidade de carga na cabeça da coluna foi tomada a partir do valor preconizado pela C.E.C.M [6] para os defeitos de verticabilidade das colunas, sendo o valor atribuído igual a 0,35% do comprimento do elemento. Em relação ao defeito de rectitude, escolheu-se o valor de 0,30% do comprimento, o qual corresponde à tolerância de laminagem [5].

A força de compressão axial, F , é uma variável aleatória de distribuição log-normal cujo desvio-padrão foi tomado igual a 10% do seu valor médio.

As variáveis aleatórias ligadas às características mecânicas, igualmente de distribuição gaussiana, possuem as seguintes características.

- tensão de cedência σ_c do aço E24, de média 272,73 MPa e desvio-padrão 16,36 MPa; estes valores são correntemente admitidos nos regulamentos.
- módulo de elasticidade E de média 210 000 MPa e desvio-padrão 12 600 MPa (mesmo coeficiente de variação que a tensão de cedência).

Estas características são ligeiramente diferentes das que constam no regulamento português [2] ($E = 2,06 \times 10^5$ MPa). Contudo, para que se possa comparar diferentes regulamentos entre si, é necessário ligar todas as variáveis de base a um dado conjunto de valores de referência. Todos os cálculos são efectuados a partir das distribuições referidas, baseadas nas características dos aços e perfis franceses.

É de referir, entretanto, que a variável aleatória X_8 , ligada à força aplicada, tal como as variáveis X_6 e X_7 , que representam as características mecânicas, não são objecto de um corte dos valores situados fora dos limites das tolerâncias, como acontece nas curvas de distribuição das variáveis X_1 a X_5 , ligadas às características geométricas.

O índice de fiabilidade β relativo a uma resistência elástica é calculado a partir de 1000 simulações das variáveis aleatórias de base que se supõe serem independentes entre si. Os cálculos incidem portanto sobre 1000 colunas diferentes.

A condição de ruína é obtida a partir da expressão

$$\sigma_c - [\sigma + \sigma_f] < 0$$

em que σ é o valor da tensão de compressão simples, σ_f o valor da tensão de flexão devida ao varejamento e σ_c o valor da tensão de cedência.

Como se pode observar, o acontecimento de ruína é obtido a partir da diferença entre a tensão resistente, igual à tensão de cedência, e a tensão actuante, igual ao valor máximo da soma das tensões aplicadas à secção. A tensão σ_f resulta da tomada em conta da não-linearidade geométrica ou seja, dos efeitos de segunda ordem.

A secção de controle corresponde aquela onde existe uma maior probabilidade de vir a ser sujeita à solicitação mais elevada ou de sofrer o maior deslocamento ou seja, a secção situada a meio-vão das colunas biarticuladas.

3 - COMPARAÇÃO DAS DISPOSIÇÕES REFERENTES AO VAREJAMENTO NOS REGULAMENTOS DE ESTRUTURAS DE AÇO

No presente artigo, são estudados sucessivamente, o Regulamento Português (REAE [2]), o Regulamento Francês (Additif 80 [7] des Règles CM 66) baseado nas curvas europeias de encurvadura, o Regulamento Canadiano (CSA [8]) e o Regulamento Britânico (BS 5950 [9]),

Para cada um deles, a melhor ou pior homogeneidade da fiabilidade fornecida pela curva de encurvadura é colocada em evidência. São estudadas as variações dos valores tomados pelo índice β para coeficientes de esbelteza entre 10 e 240.

A força de compressão média que solicita cada uma das colunas é a força máxima não majorada admitida por cada um dos regulamentos. Supõe-se que tal força é devida à acção exclusiva da neve.

As disposições do REAE baseiam-se num dimensionamento elástico enquanto que os outros regulamentos recorrem a um cálculo plástico. Sendo o nosso objectivo o de comparar as curvas de encurvadura, a natureza dos regulamentos não intervem senão na determinação da força de compressão máxima, $F_{m\grave{a}x}$ (igualmente denominada força resistente), admitida por cada um deles.

Em todos os casos, se ψ for o coeficiente de encurvadura, A a secção bruta do perfil e N_p o esforço normal plástico, tem-se que:

$$F_{m\grave{a}x} = \sigma_c A \psi \text{ (c\~{a}lculo el\~{a}stico)}$$

ou:

$$F_{m\grave{a}x} = N_p \psi \text{ (c\~{a}lculo pl\~{a}stico) com } N_p = \sigma_c A$$

sendo-se portanto conduzido à mesma relação.

Os resultados das simulações são escolhidos relativamente ao estado limite de resistência em regime elástico anteriormente indicado e estuda-se as amplificações das tensões normais permanecendo em regime elástico. A comparação entre os regulamentos é, deste modo, possível qualquer que seja a natureza de cada um deles.

3.1 - Regulamento Português

De acordo com o Regulamento Português, para o aço $F_e 360$ correspondente ao E24, a verificação dos elementos susceptíveis de varejamento é efectuada de acordo com as seguintes expressões:

$$\text{se } 20 \leq \lambda \rightarrow F_{\max} = A \sigma_c$$

$$\text{se } 20 \leq \lambda \leq 105 \rightarrow F_{\max} = (1,1328 - 0,0064 \lambda) A \sigma_c$$

$$\text{se } \lambda \geq 105 \rightarrow F_{\max} = \frac{\pi^2 E}{1,8 \lambda^2} A$$

em que A: secção bruta do perfil, λ : coeficiente de esbelteza da coluna ($\lambda = L/i_x$), sendo L o comprimento de encurvadura e i_x o raio de giração, e F_{\max} : força resistente.

É de notar que para coeficientes de esbelteza superiores a 105, a força F_{\max} é igual à força crítica de Euler dividida por um coeficiente de segurança igual a 1,8 e que os valores compreendidos entre 20 e 105 são obtidos através de uma variação linear de λ .

Sendo a força axial actuante majorada por 1,5 no caso da acção da neve, o esforço de compressão actuante nominal (não majorado), F_{PORT} , é portanto igual a:

$$F_{\text{PORT}} = F_{\max} / 1,5$$

Este esforço F_{PORT} será tomado como valor médio dos esforços actuantes durante as simulações efectuadas.

3.2 - Regulamento Francês

As disposições do Regulamento Francês [7] baseiam-se nas curvas europeias de encurvadura, tal como o projecto do Eurocode nº 3 [10] e as Recomendações da C.E.C.M [11]. Todos estes documentos apresentam portanto resultados semelhantes.

As curvas europeias de encurvadura permitem verificar a segurança de uma coluna, sujeita a compressão simples, através da seguinte relação:

$$F_{\max} = A \sigma_c / k_0$$

em que F_{\max} é o esforço resistente regulamentar e k_0 o coeficiente amplificador das tensões de encurvadura.

O coeficiente k_0 é função do coeficiente de esbelteza reduzido λ_r , obtido a partir da expressão:

$$\lambda_r = \lambda (\sigma_0 / E)^{1/2} / \pi$$

Uma formulação para k_0 foi proposta pelas seguintes expressões:

$$\text{Se } \lambda_r > 0,2: k_0 = \frac{2 \lambda_r^2}{1 + \alpha (\lambda_r - 0,2) + \lambda_r^2 - [(1 + \alpha (\lambda_r - 0,2) + \lambda_r^2)^2 - 4 \lambda_r^2]^{1/2}}$$

$$\text{e se } \lambda_r \leq 0,2: k_0 = 1$$

onde, para os perfis que interessam para o presente caso, $\alpha = 0,339$. Este coeficiente é aplicável às curvas de encurvadura de perfis laminados de secção I, duplamente simétrica.

Sendo a força axial aplicada devida a uma acção da neve, a força actuante máxima obtem-se da sua multiplicação pelo coeficiente de segurança 1,5, de acordo com a majoração prevista nos regulamentos atrás referidos, para a acção isolada da neve. O valor médio da força de compressão actuante F_{FRA} , tomado em conta no cálculo probabilístico é portanto fornecido pela expressão:

$$F_{FRA} = \frac{A \sigma_c}{1,5 k_0}$$

3.3 - Regulamento Canadiano

O esforço normal resistente de cálculo, F_{\max} , é função do coeficiente de esbelteza reduzido e calcula-se de acordo com as seguintes expressões:

$$F_{\max} = \phi A \sigma_c (1,035 - 0,202 \lambda_r - 0,222 \lambda_r^2) \quad \text{se } 0 \leq \lambda_r \leq 1$$

$$F_{\max} = \phi A \sigma_c (-0,111 + 0,636 \lambda_r^{-1} + 0,087 \lambda_r^{-2}) \quad \text{se } 1 < \lambda_r \leq 2$$

$$F_{\max} = \phi A \sigma_c (0,009 + 0,877 \lambda_r^{-2}) \quad \text{se } 2 < \lambda_r \leq 3,6$$

$$F_{\max} = \phi A \sigma_c \lambda_r^{-2} \quad \text{se } 3,6 < \lambda_r$$

em que ϕ é um factor de comportamento que no presente caso toma o valor 0,9.

A força de compressão a aplicar à coluna, F_{CAN} , deverá tomar valores inferiores a F_{\max} , pelo que se tomou para o seu valor médio o fornecido pela seguinte expressão:

$$F_{CAN} = F_{\max} / 1,5$$

3.4 - Regulamento Britânico

De acordo com o Regulamento Britânico [9], no caso de a acção da neve ser tomada em conta isoladamente, o coeficiente de segurança a utilizar é igual a 1,6.

É importante referir que este regulamento limita o valor máximo do coeficiente de esbelteza a 180, no caso de elementos sujeitos a cargas que não resultem da acção do vento.

Sendo o objectivo do presente estudo apenas avaliar a forma como as disposições relativas ao varejamento intervêm nos regulamentos, sem efectuar qualquer julgamento referente aos coeficientes de ponderação aí considerados, decidiu-se ignorar esta limitação e conduzi-lo até um coeficiente de esbelteza máximo de 240.

O regulamento Britânico define a respectiva lei de evolução do coeficiente de encurvadura, em função do coeficiente de esbelteza, a partir da lei de Ayrton-Perry e fornece tabelas com valores da tensão máxima admissível, σ_{\max} , para vários tipos de aço. De entre estes, o que mais se aproxima do aço E24 é o aço 43C, com uma tensão de cedência de 245 MPa. Para tomar em conta a diferença existente, deduziu-se os valores médios da força de compressão não majorada, F_{BS} , correspondente a uma tensão de cedência de 240 MPa, através da expressão:

$$F_{BS} = \frac{240}{1,6 \times 245} A \sigma_{\max}$$

3.5 - Comparação dos Regulamentos

No Quadro 1 indicam-se as forças axiais de compressão admitidas por todos os regulamentos anteriormente estudados e na figura 8 representa-se a sua evolução

em função do coeficiente da esbelteza. Pode-se constatar que o Regulamento Português é bastante pessimista no domínio das esbeltezas elevadas, pois as forças axiais obtidas nesta zona são relativamente baixas quando comparadas com as dos outros regulamentos.

QUADRO 1

Forças axiais de compressão (kN)
admitidas pelos regulamentos estudados

λ	F _{PORT}	F _{FRA}	F _{CAN}	F _{BS}
10	211,4	211,4	192,3	198,1
20	211,4	210,3	186,7	197,3
30	197,4	202,6	180,1	193,3
40	183,3	192,2	172,6	188,4
60	155,3	172,5	154,5	174,7
80	127,2	145,8	132,6	152,1
100	99,1	116,8	105,7	121,3
120	70,5	91,5	82,6	93,0
140	51,8	71,9	66,6	72,0
160	39,7	57,1	54,8	56,6
180	31,3	46,3	45,8	45,3
200	25,4	38,4	37,8	37,2
220	21,0	32,1	31,5	31,5
240	17,6	27,5	26,8	26,7

QUADRO 2

Diferenças máximas entre valores extremos de β
para cada regulamento

Regulamento	$10 \leq \lambda \leq 100$	$10 \leq \lambda \leq 240$
R.E.A.E (Portugal)	0,8	7,7
Additif 80 (França)	0,8	2,3
C.S.A. (Canadá)	0,9	1,9
B.S. 5950 (G.B.)	1,8	3,1

Os resultados das simulações, seguidas dos cálculos do índice β , encontram-se representados na figura 9.

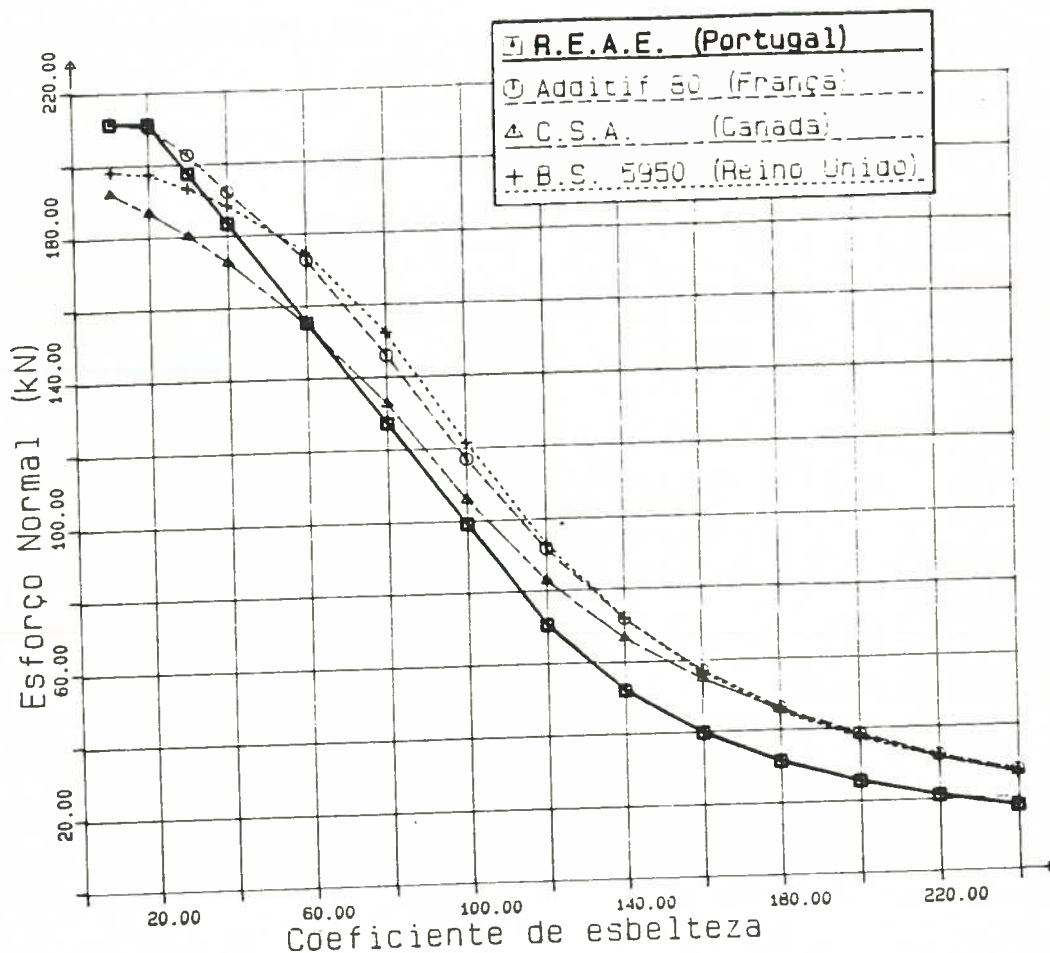


Figura 8 - Força de compressão regulamentar em função do coef. de esbelteza

As curvas da figura 9, bem como as diferenças entre os valores extremos do factor de fiabilidade do Quadro 2 mostram que o Regulamento Português é sensivelmente diferente dos outros Regulamentos aqui analisados. Com efeito, verifica-se que é aquele que conduz à maior variação do índice β (7,7). Trata-se portanto do Regulamento menos homogêneo de entre os que foram estudados, no domínio das esbeltezas consideradas ($10 \leq \lambda \leq 240$). Por outro lado, o Regulamento Canadiano (1,9) é o mais homogêneo, seguido dos Regulamentos que utilizam as curvas europeias de encurvadura (2,3). O Regulamento Britânico encontra-se no entanto relativamente próximo destes dois Regulamentos, com uma variação máxima de β igual a 3,1.

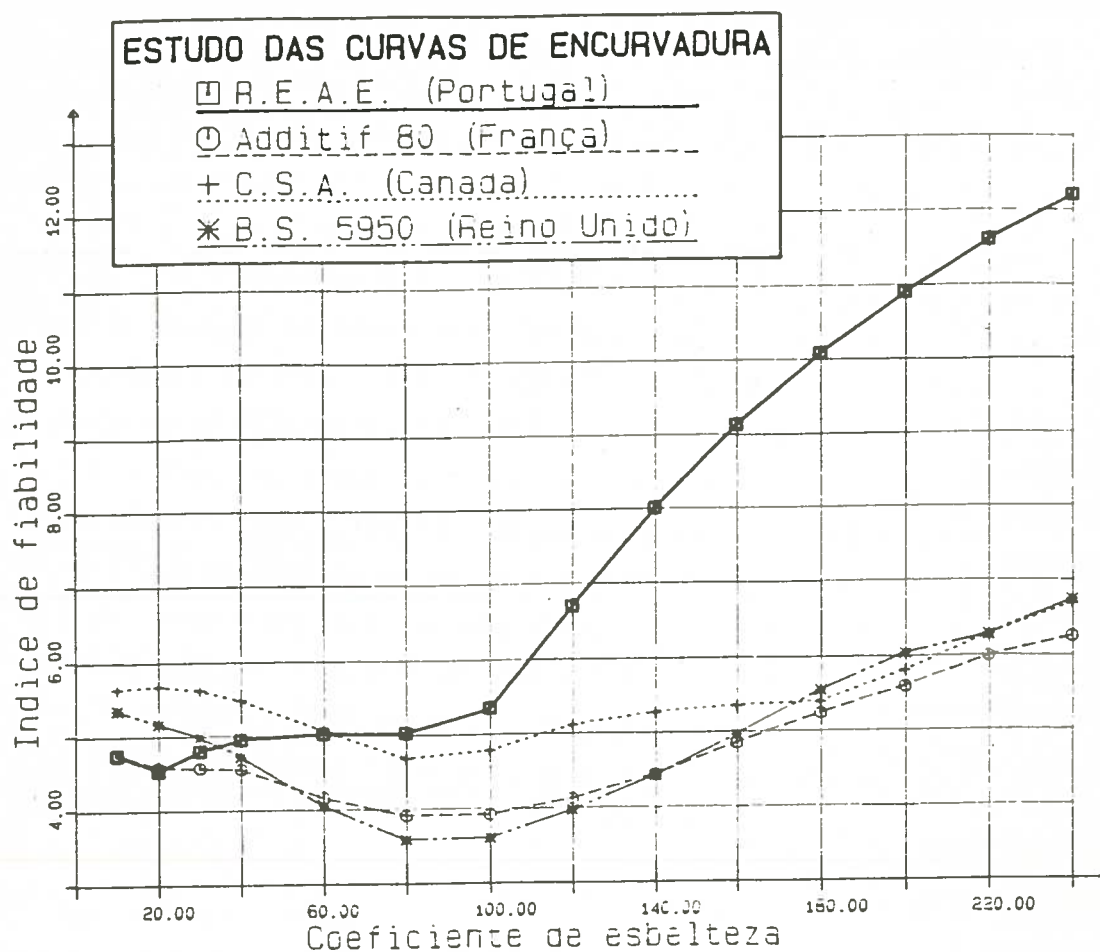


Figura 9 - Índice de fiabilidade em função do coef.de esbelteza

Convirã entretanto fazer-se notar que os valores apresentados para o índice de fiabilidade do REAE no domínio das esbeltezas elevadas, correspondendo a valores extremamente reduzidos da probabilidade de ruína, e como tal já dissociados da realidade física, possuem interesse enquanto simples resultados matemáticos, pela clara revelação da evolução do carácter conservativo do Regulamento Português, neste domínio de esbeltezas, em comparação com os restantes regulamentos estudados.

É ainda importante sublinhar que o estudo aqui apresentado se limitou à análise do varejamento de um único tipo de perfil, da gama IPE. Ao contrário das Recomendações da CECM [6], o R.E.A.E [2] não estabelece diferenças de comportamento para os diferentes tipos de perfis e segundo as direcções em que os perfis possam instabilizar. Como tal as disposições que nele figuram têm necessariamente de possuir um carácter conservativo de modo a ter em conta os casos mais desfavoráveis (caso da existência de tensões residuais muito elevadas em certos perfis, por

exemplo). As conclusões obtidas deverão portanto ter tal facto em conta, pois as diferenças obtidas poderão ser menos importantes nestes casos, em que a curva de encurvadura portuguesa seria comparada com curvas dos outros regulamentos diferentes das utilizadas no presente estudo.

Entretanto, se se limitar a comparação ao domínio de esbeltezas definido pela condição $10 \leq \lambda \leq 100$, verifica-se que as variações do R.E.A.E se encontram muito próximas das dos outros Regulamentos, apresentando igualmente uma relativa homogeneidade. Daqui se poderá concluir que o coeficiente de segurança de 1,8, aplicado à força crítica de Euler, para coeficientes de esbelteza superiores a 105, é talvez demasiado desfavorável, no caso da encurvadura dos perfis IPE segundo a direcção de maior inércia, e que poderão ser obtidos alguns progressos neste domínio. Tal facto vem de resto confirmar a observação anteriormente feita ao Quadro 1, onde se observara a existência de forças admissíveis bem menores no caso do REAE que nos outros Regulamentos, no domínio das esbeltezas elevadas. Por outro lado, verifica-se que a interpolação linear utilizada no domínio das esbeltezas compreendido entre $\lambda = 20$ e $\lambda = 105$ fornece resultados muito razoáveis, no caso do perfil analisado no presente estudo.

4 - CONCLUSÕES

O presente trabalho mostra as possibilidades fornecidas pela utilização de um método de simulação, no estudo da comparação da homogeneidade da fiabilidade oferecida por diferentes Regulamentos.

Para que se possa julgar a eficácia das curvas de encurvadura propostas pelos regulamentos, é necessário dispôr de um modelo mecânico capaz de calcular com grande precisão os deslocamentos e os esforços internos das estruturas. Um modelo geometricamente não-linear é portanto indispensável. Contudo, este tipo de modelo não permite determinar explicitamente a função estado - limite e o cálculo do índice de fiabilidade tem de ser determinado por um método de simulação.

A escolha do varejamento é interessante pelo motivo de este tipo de encurvadura ser particularmente sensível aos efeitos das imperfeições. Deve-se no entanto realçar o facto de ser muito difícil relacionar o índice de fiabilidade utilizado com uma dada probabilidade de ruína. Este índice pode contudo fornecer boas indicações no caso de um estudo comparativo. A sua determinação é relativamente simples e permite ter em consideração um grande número de variáveis de base.

Refira-se finalmente que o procedimento utilizado no presente trabalho é aplicável a muitos outros estudos. Poder-se-ia, por exemplo, efectuar a análise dos efeitos da consideração do bambeamento, da forma de combinação das acções e dos coeficientes de segurança que lhes são aplicáveis, ou dos efeitos de possíveis variações de secção das colunas devidas à corrosão. A realização de tais estudos permitirão aumentar o volume de conhecimentos existente sobre a forma de comportamento das estruturas de aço e sobre o nível de segurança que lhes está associado e, conseqüentemente, contribuir para uma melhor utilização do aço na construção, do ponto de vista económico ou da segurança.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Outubro de 1988

VISTOS

AUTORIA


O CHEFE DO NÚCLEO
DE COMPORTAMENTO DAS ESTRUTURAS


João d'Arga e Lima

Jean-Pierre Muzeau
Prof. da Universidade de Blaise-Pascal
de Clermont-Ferrand (França)

O CHEFE DO DEPARTAMENTO
DE ESTRUTURAS


Vítor Monteiro


António Manuel Baptista
Engº Civil, Assistente de Investigação

O DIRECTOR


Artur Ravara

BIBLIOGRAFIA

- [1] CORNELL C.A. - A probability - based structural code. A.C.I. Journal, Vol. 66, p. 974-985, 1969.
- [2] Regulamento de estruturas de aço para edifícios. Decreto-lei nº 211/86, de 31 de Julho, Lisboa, 1986.
- [3] MUZEAU J.P. - Modèle de l'influence d'imperfections sur la sécurité des structures métalliques en comportement non linéaire. Comparaison de règlements internationaux.
Thèse de Doctorat en Sciences Physiques, Université Blaise Pascal, Clermont - Ferrand, mai 1987.
- [4] POWELL G. e SIMON J. - Improved iteration strategy for non linear structures. Int. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol. 17, p. 1455-1467, 1981.
- [5] A.F.N.O.R - Poutrelles IPE laminées à chaud, tolérances de laminage. Association française de Normalisation, Norme NF A 45-206, novembre 1983.
- [6] C.E.C.M. - Recommendations pour l'étude et l'exécution des constructions métalliques. Convention Européenne de la Construction Métallique, ECCS-EG 77 - 1E, 1977.
- [7] C.T.I.C.M - Règles de calcul des constructions en acier. Additif 80. Revue Construction Métallique, nº 1, p. 61-99, 1981.
- [8] C.S.A - Limit States Design Manual. Canadian Institute of Steel Construction, 1st édition, may 1978.
- [9] BRITISH STANDARD - Standard use of steelwork in building, BS 5950. British Standards Institution, 1985.
- [10] COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPÉENNES - EUROCODE nº 3: Règles unifiées communes pour les constructions en acier. C.C.E., Procédés industriels, Bâtiment et Génie Civil, rapport EUR 8849 DE, EN, FR, 1984.
- [11] C.E.C.M - Recommendations pour l'étude et l'exécution des structures métalliques. Convention Européenne de la Construction Métallique, ECCS-EG 77-1E, 1977.
- [12] BAPTISTA A.M. - O cálculo das estruturas de aço e a sua regulamentação, LNEC, Lisboa.