

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE COLUNAS DE ILUMINAÇÃO CONFORME A NORMA EN 40 “*Lighting Columns*”

Marta Carvalho*, Arlindo Silva**

* Schröder Iluminação, S.A., Rua da Fraternidade Operária N°3, 2790-076, Carnaxide, marta.sc@sapo.pt

**Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais e Superfícies, IST, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, asilva@alfa.ist.utl.pt



RESUMO

A presente comunicação descreve a metodologia para a realização do ensaio experimental a colunas de iluminação conforme a EN 40-3-2:2000, seguida da simulação numérica da mesma. Nesta comunicação será relatado o ensaio experimental de uma coluna de iluminação em particular, a coluna Tejo Tronco-Cónica B275, projectada e comercializada pela Schröder Iluminação, S.A.. A simulação numérica dos ensaios realizados tem por objectivo antecipar se a coluna terá, em ensaio, o comportamento devido, evitando assim o dispêndio de tempo e material no cumprimento dos critérios de aceitação definidos pela norma.

1 – INTRODUÇÃO

Requer a legislação em vigor que as colunas de iluminação sejam sujeitas a ensaios de acordo com a norma europeia EN-40 “*Lighting columns*”, redigida pelo comité técnico CEN-TC 50. Esta norma define critérios de aceitação para os valores obtidos em ensaio experimental das colunas. Contudo, antes de ser ensaiada a coluna, sob risco de não cumprir os critérios de aceitação, será boa prática prever o comportamento da mesma através de simulação numérica. Este procedimento encontra justificação na poupança de material e tempo de realização do ensaio se, na simulação, a coluna não verificar os critérios de aceitação preconizados pela norma. O presente trabalho debruça-se sobre o ensaio experimental da coluna e a sua simulação numérica.

2 – VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL: ESPECIFICAÇÃO DO CARREGAMENTO

A norma referida especifica os requisitos para a verificação estrutural de colunas em aço, alumínio e betão através de ensaios experimentais. Em alternativa, os requisitos estruturais de uma coluna metálica poderão ser verificados através de cálculo, ainda conforme a norma. As solicitações consideradas nas duas partes são apenas forças horizontais devido ao vento e forças verticais devido ao peso próprio da estrutura e luminária, como se pode ver na figura 1, sendo estas solicitações também especificadas na norma. A segurança passiva e o comportamento da coluna devido ao impacto de um veículo automóvel são requisitos que não estão incluídos nesta norma e não serão tratados nesta comunicação.

a) Forças verticais devido ao peso próprio

Na discretização destas forças devem ser consideradas as massas do braço e da luminária.

b) Forças horizontais devido à acção do vento

A força horizontal devido à acção do vento, à cota z do solo, pode ser calculada utilizando a expressão seguinte: $F_c(z) = A_c \cdot c \cdot q(z)$, em que:

- F_c é a força horizontal, em N, actuando no centro de massa da secção considerada;
- A_c é a área projectada, em m^2 , num plano vertical normal à direcção do vento, da secção considerada;
- c é o coeficiente de forma da secção considerada;
- $q(z)$ é a pressão do vento característica, em N/m^2 , à cota z do solo, que é calculada de acordo com o ponto 3.2 de [1].

c) Casos de carga e Modelação

São definidos os casos de carga resultantes do balanço horizontal dos braços e respectivas luminárias e da direcção relativa do vento: perpendicular ao plano dos braços (ver (ver Figura 1), e no plano dos braços. As forças devido à acção do vento e da gravidade sobre o braço e a luminária são simuladas de forma simplificada, sem prejuízo do cumprimento dos requisitos estabelecidos na norma. Para tal, tanto as simulações numéricas como os ensaios são realizados procedendo à translação das forças vertical e horizontal do braço do seu centro de gravidade para o da luminária, introduzindo assim o conceito de luminária equivalente [6].

A modelação consiste na discretização da coluna em segmentos, não excedendo 2m em altura, como o especificado na Fig 2, onde:

$W_{i,c}$ – Acção do vento sobre a coluna no segmento i , em análise;

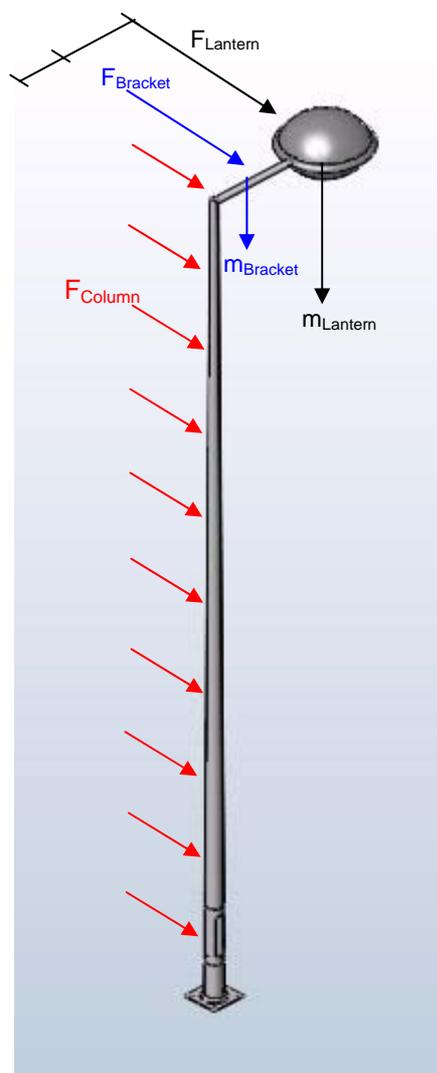


Fig 1 – Solicitações consideradas na concepção de colunas de iluminação

$W_{i,L}$ – Acção do vento sobre a luminária, considerada se localizada no segmento i ;

V_{i+1} – Esforço transversal transmitido pelo segmento $i+1$ acima do segmento i ;

M_{i+1} – Momento flector transmitido pelo segmento $i+1$ acima do segmento i ;

V_i – Força de reacção no segmento i , obtida através da expressão

$$V_i = W_{i,L} + W_{i,c} + V_{i+1}$$

$M_{i,L}$ – Momento flector devido ao peso da luminária, considerada se localizada no segmento i e no caso de existir projecção horizontal do braço;

M_i – Momento flector de reacção no segmento i , obtido através da expressão

$$M_i = W_{i,L} \times (Z_{i,L} - Z_{i,inf}) + W_{i,c} \times Z_{i,med} + V_{i+1} \times (Z_{i,sup} - Z_{i,inf}) + M_{i+1}$$

$Z_{i,inf}$ / méd / sup – Cotas inferior, média e superior, respectivamente do segmento i ;

$Z_{i,L}$ – Cota de aplicação da força devido ao vento sobre a luminárias, considerada se localizada no segmento i .

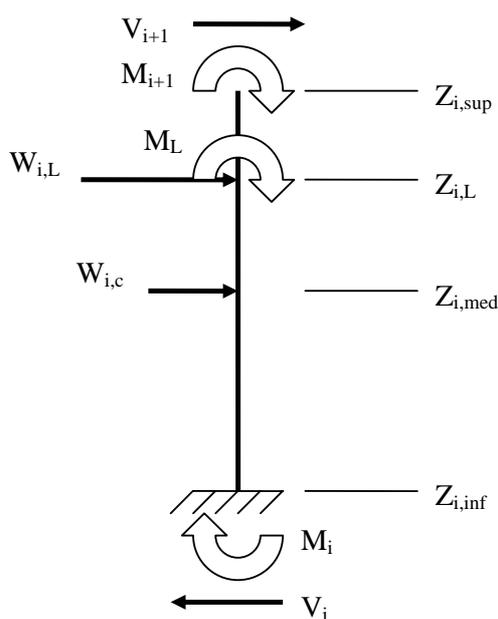


Fig 2 – Discretização do fuste – Elemento tipo

3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As colunas de iluminação podem ser testadas na posição horizontal ou vertical. No caso em que são testadas na posição horizontal, como é o caso do exemplo, o peso próprio do fuste tem que ser devidamente compensado com suportes, utilizando uma carga de compensação do peso próprio da coluna, normalmente colocada a uma distância de 2/3 da altura nominal da base. A coluna é fixa rigidamente através da sua flange aparafusada, utilizando os pernos de serviço. A posição da portinhola tem de ser a mais desfavorável, o que corresponde a ter a abertura do compartimento de base posicionada no plano perpendicular ao da aplicação das forças horizontais (vento),

tratando-se da situação mais onerosa para a estrutura, sendo o ensaio efectuado sem portinhola.

O ensaio compreende as seguintes fases [7]:

- aplicação das forças de teste até atingir o estado limite de serviço;
- aplicação das forças de teste multiplicadas por um factor de ampliação, devidamente calculado, até atingir o estado limite último;
- aplicação de forças até ocorrer a rotura, sendo este teste opcional.

O factor que majora as forças de teste é um produto dado por:

$$\gamma_u = \gamma_t \frac{f_{yT}}{f_y} \frac{I_t}{I}$$

em que:

f_y – tensão limite de elasticidade teórica do material;

f_{yT} – tensão limite de elasticidade real do material, obtida por ensaio de tracção de uma amostra retirada do modelo sob ensaio ou proveniente do certificado do material;

I – inércia teórica da secção;

I_T – inércia real da secção calculada com base em medições do modelo sob ensaio;

γ_t – factor de teste definido de acordo com a tabela 1 de [3].

As parcelas do produto deste factor de majoração apenas são consideradas quando superiores a 1. No caso de existir várias secções e/ou materiais, é considerado sempre o valor mais elevado.

As colunas de iluminação passam os testes de ensaio e o seu projecto fica verificado se os critérios de aceitação seguintes forem verificados [2]:

- EN 40-3-2 – 5.2 a), o deslocamento vertical devido às forças verticais tem de ser inferior a $2.5\%w$;
- EN 40-3-2 – 5.2 b), o deslocamento horizontal tem de ser inferior a $10\%(h+w)$; w é a projecção do braço e h a altura do fuste

- EN 40-3-2 – 5.3 a), o deslocamento horizontal residual tem de ser inferior a 10% do deslocamento horizontal máximo atingido durante o ensaio.

A aplicação das forças de estado limite último permite confirmar o método de cálculo conforme a norma. Com a confirmação estrutural efectuada, todas as colunas da mesma família serão concebidas e verificadas através do método de cálculo, de acordo com a norma.

4 – CASO DE ESTUDO

4.1 - Plano de ensaio de tipo conforme EN 40-3-2:2000

A coluna ensaiada tem a designação Tejo Tronco-Cónica B275 (H-12/DP-76/E-4). Trata-se de uma coluna de aço S275, tronco-cónica de conicidade 15mm/m, 76mm de diâmetro em ponta e espessura constante de 4mm. A luminária equivalente tem área de exposição 0,50m² e 65kg de massa e a projecção horizontal do braço é 1,5m. No que se refere à acção exercida pelo vento sobre o fuste, esta será simulada por aplicação de três forças: a 12, 8 e 4m de cota, a partir do solo. Estas forças são aplicadas de forma a que os momentos nas secções correspondentes sejam iguais aos calculados, obtendo-se desta forma, como se pode ver no gráfico da Fig 3, um momento flector instalado no ensaio sempre maior ou igual ao momento flector estimado pelo carregamento característico. Segundo a norma, apenas os momentos nas secções críticas, tais como bordo inferior da portinhola, bordo superior da portinhola, cota do solo e encavadouro do braço da luminária, têm necessariamente de ser superiores ou iguais aos momentos calculados. Nas restantes secções os momentos deverão ser, no mínimo 95% dos momentos calculados.

As forças aplicadas são calculadas de acordo com a norma, tendo sido simuladas as condições para zona do território B [5] e categoria de rugosidade do terreno II. O caso de carga é o representado na Figura 1 e o factor de ampliação é:

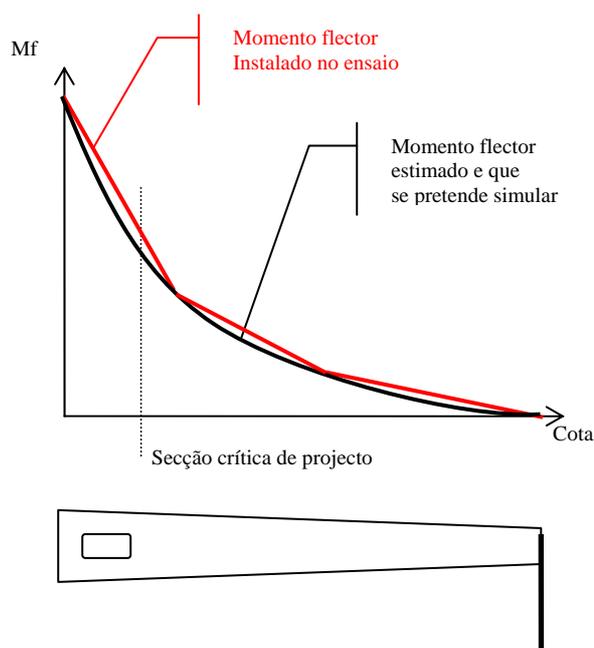


Fig 3 – Momento flector vs cota a partir do solo

$$\sigma_u = 1,2 * (303^1 / 275) * (1 / 1) = 1,32$$

As forças de simulação das cargas de ensaio estão registadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Forças de simulação das cargas de ensaio

Ponto de aplicação das forças	Direcção	Forças (N)	
		Valores de teste	Valores de estado limite último
Luminária 1 (1,5m do eixo longitudinal do fuste)	Horizontal	982	1300
	Vertical	638	844
12m acima da cota do solo	Horizontal	300	397
8m acima da cota do solo	Horizontal	524	694
4m acima da cota do solo	Horizontal	515	682

4.2 – Resultados do ensaio de tipo conforme EN 40-3-2:2000

A Tabela 2 mostra os resultados de deslocamento do encavadouro de fixação da luminária por aplicação das cargas de teste e das cargas de limite mínimas.

¹ Valor obtido em ensaio de tracção de um provete retirado da portinhola do compartimento de base [10]

Tabela 2 – Resultados do ensaio experimental do teste de tipo

Deslocamento vertical do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de teste (forças verticais)	34mm
Deslocamento horizontal do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de teste	797mm
Deslocamento horizontal residual do encavadoiro de fixação da luminária após remoção das cargas de teste (excepto forças verticais)	69mm
Recuperação, como percentagem, do deslocamento horizontal por aplicação das cargas de teste	91%
Deslocamento horizontal do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de limite mínimas	1158mm
Deslocamento vertical do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de limite mínimas	122mm

Confrontando estes resultados com os critérios de aceitação, verifica-se que:

- o deslocamento vertical do encavadoiro por aplicação das cargas verticais é 34mm sendo inferior ao deslocamento máximo (37.5mm), estando em conformidade com este requisito;
- o deslocamento horizontal do encavadoiro por aplicação das cargas horizontais é 797mm, inferior ao deslocamento máximo (1350mm), estando em conformidade com este requisito;
- o deslocamento horizontal residual do encavadoiro é de 69mm, sendo inferior ao máximo de 79.7mm, estando em conformidade com este requisito.

A Tabela 3 resume os resultados obtidos pelo ensaio experimental com cargas teste (cargas de serviço), e confronta estes resultados com os critérios de aceitação.

A coluna de iluminação acima identificada foi ensaiada de acordo com a norma EN 40-3-2: 2000 e os resultados obtidos estão em conformidade com os critérios de aceitação estabelecidos na cláusula 5 daquela norma. Conclui-se e declara-se que a concepção estrutural deste tipo de coluna está, portanto, confirmada.

Tabela 3 – Quadro resumo dos resultados confrontados com os critérios de aceitação.

Requisito	Critério de aceitação	Resultados	
EN 40-3-2 – 5.2 a)	37.5mm	34mm	Conforme
EN 40-3-2 – 5.2 b)	1350mm	797mm	Conforme
EN 40-3-2 – 5.3 a)	79.7mm	69mm	Conforme

4.3 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Como estudo adicional, os resultados experimentais são confrontados com os resultados obtidos por cálculo recorrendo a uma modelação de elementos finitos.

Recorreu-se a um software de modelação 3D, SolidWorks, onde se modelou a superfície da coluna e respectiva flange. A superfície modelada foi exportada no formato IGES para o programa de análise com o Método dos Elementos Finitos (MEF), o Abaqus. Com este software foi construída uma malha para o fuste com elementos de placa de 4 nós, de integração reduzida, e que incluem os efeitos de segunda ordem. O braço utilizado no ensaio experimental foi um tubo de aço macio, quadrado, de dimensões 100x100x3, soldado no topo da coluna. Foi modelado com elementos viga tridimensionais e rigidamente ligado ao topo da coluna. À semelhança do ensaio experimental, foram aplicadas as cargas devido à acção do vento no fuste e luminária, e peso próprio da luminária, aplicada a 1,5m do eixo longitudinal do fuste (ver Tabela 1). Nas condições de fronteira, utilizou-se o encastramento, simulando uma fixação rígida da base ao solo.

Após simulação numérica não linear, incluindo os efeitos de grandes deformações e deslocamentos, os resultados obtidos são registados na Tabela 4.

Confrontando estes resultados com os critérios de aceitação, verifica-se que:

- o deslocamento vertical do encavadoiro por aplicação das cargas verticais é 33.8mm sendo inferior ao deslocamento máximo (37.5mm), estando em confor-

Tabela 4 - Resultados da simulação numérica do teste de tipo

Deslocamento vertical do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de teste (forças verticais)	33.8mm
Deslocamento horizontal do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de teste	788.1mm
Deslocamento horizontal residual do encavadoiro de fixação da luminária após remoção das cargas de teste (excepto forças verticais)	72.7mm
Deslocamento horizontal do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de limite mínimas	1153mm
Deslocamento vertical do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de limite mínimas	119.7mm

midade com este requisito;

- o deslocamento horizontal do encavadoiro por aplicação das cargas horizontais é 788.1mm, inferior ao deslocamento máximo (1350mm), estando em conformidade com este requisito;
- o deslocamento horizontal residual do encavadoiro é de 72.7mm, sendo inferior ao máximo de 78.8mm, estando em conformidade com este requisito.

A Tabela 5 resume os resultados obtidos pela simulação numérica com cargas teste (cargas de serviço), e confronta estes resultados com os critérios de aceitação.

Os resultados da simulação numérica do ensaio experimental recorrendo ao método dos elementos finitos, estão conforme os critérios de aceitação. Contudo não se pode confirmar a concepção estrutural deste tipo de coluna com base em resultados numéricos, dado que as normas não contemplam esta possibilidade.

Tabela 5 – Quadro resumo dos resultados confrontados com os critérios de aceitação.

Requisito	Critério de aceitação	Resultados	
EN 40-3-2 – 5.2 a)	37.5mm	33.8mm	Conforme
EN 40-3-2 – 5.2 b)	1350mm	788.1mm	Conforme
EN 40-3-2 – 5.3 a)	78.8mm	72.7mm	Conforme

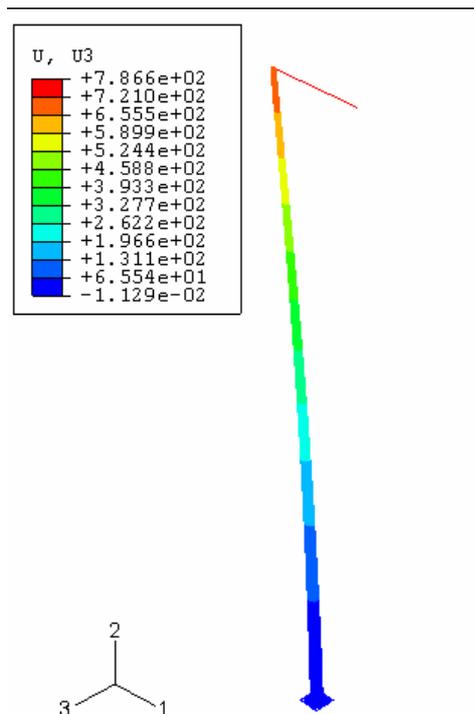


Fig 4 - Modelo em elementos finitos. Deslocamento na direcção 3 (vento) por aplicação de cargas teste

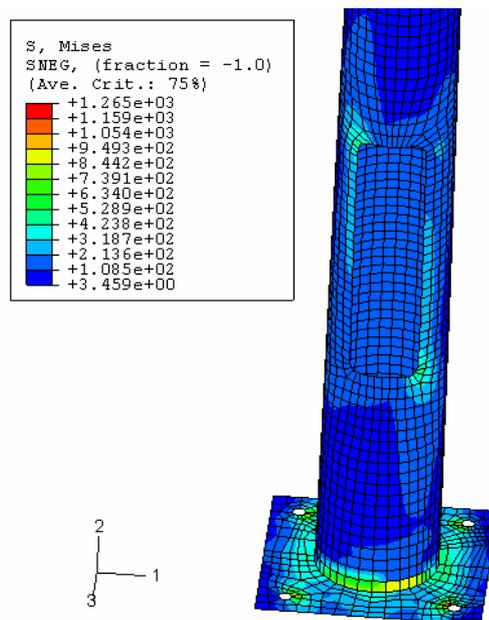


Fig 5 - Tensões máximas por aplicação de cargas de teste

Outra vantagem de se fazer a simulação numérica é prever a localização das tensões máximas, e poder quantificá-las. Na Fig 5, pode-se visualizar que as tensões máximas estão localizadas na abertura do compartimento de base, e na ligação da coluna à base. O máximo da escala é a concentração de tensões na fronteira dos

furos que simulam o encastramento. Com este auxílio pode-se prever a aplicação de reforços da abertura da portinhola, como é previsto na norma, e podem ser dimensionados através de cálculo [3] e verificar os esforços na base.

A EN 40 ainda não contempla a verificação da base, e sendo um local onde se concentram os esforços máximos, torna-se importante caracterizar as deformações desta, e não só da secção da coluna que está à mesma cota.

4.4 – Comparação de resultados

Uma vez que não é possível confirmar a concepção estrutural das colunas através de simulação numérica, os resultados destas simulações poderão ser, contudo, confrontados com os resultados obtidos experimentalmente (ver Tabela 6).

Após análise dos resultados conclui-se que o erro máximo no deslocamento é de 5.4%, que coincide com o caso em que o resultado apresentado pela simulação é superior ao resultado medido experimentalmente. Nos restantes casos o erro é inferior a 2%.

5 – CONCLUSÃO

O MEF quando aplicado devidamente, pode prever o comportamento da coluna a ensaiar, evitando resultados desastrosos nos ensaios experimentais tais como colapso das colunas e deformações acima dos critérios de aceitação, entre outras situações. Deste modo, pode-se avançar para o ensaio experimental com alguma confiança de que a coluna cumpre os critérios de aceitação. O ensaio experimental poderá então verificar a concepção estrutural da coluna de iluminação e o método de cálculo a utilizar nas colunas da mesma família, à primeira tentativa, sem necessidade de outros ajustes ou redimensionamentos, seguidos de novo ensaio.

Tabela 6 – Comparação dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente

Resultados	Ensaio	FEM	erro
Deslocamento vertical do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de teste (forças verticais)	34mm	33.8mm	0.6%
Deslocamento horizontal do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de teste	797mm	788.1mm	1.1%
Deslocamento horizontal residual do encavadoiro de fixação da luminária após remoção das cargas de teste (excepto forças verticais)	69mm	72.7mm	5.4%
Deslocamento horizontal do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de limite mínimas	1158mm	1153mm	0.4%
Deslocamento vertical do encavadoiro de fixação da luminária por aplicação das cargas de limite mínimas	122mm	119.7mm	1.9%

REFERÊNCIAS

- [1] EN 40-3-1:2000 “Design and verification – Specification for characteristic loads”.
- [2] EN 40-3-2:20000 “Design and verification – Verification by testing”.
- [3] EN 40-3-3:2003 “Design and verification – Verification by calculation”.
- [4] EN 40-5:2002 “Requirements for steel lighting columns”.
- [5] ENV 1991-2-4: “Acções do vento e os respectivos documentos de aplicação Nacional”.
- [6] Especificação Técnica ET/DSV/002 – Apoios de Iluminação, Dimensionamento Estrutural, 5ª Edição, Schröder Iluminação, SA.
- [7] Instrução de Trabalho IT/DSV/005 – Apoios de Iluminação, Ensaio de Verificação da Concepção Estrutural, Edição N°3, Schröder Iluminação, SA.
- [8] Nota de Cálculo: Ncalc ISQ – TB712764 – B.xls
- [9] Portela, A. e Silva, A. (1996) “Mecânica dos Materiais”. Plátano Ed. Técnicas.
- [10] Relatório: RINAVE 03.L.03425