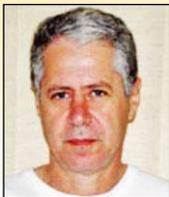


Reliability Evaluation of Reinforced Concrete Pipes in Crack Opening Limit State

Avaliação da Confiabilidade de Tubos de Concreto Armado no Estado Limite de Fissuração



J. L. SILVA ^a
jeffersonlins@gmail.com

M. K. EL DEBS ^b
mkdebs@sc.usp.br

A. T. BECK ^c
atbeck@sc.usp.br

Abstract

Structural reliability theory is used in this paper to verify the capability of Brazilian code on design of concrete structures (NBR 6118:2003) concerning the evaluation of crack width in reinforced concrete pipes. Two limit state equations are defined in terms of crack opening. The First Order Second Moment and Monte Carlo simulation methods are used in the reliability analysis. In an initial reliability analysis, problem parameters that have the largest contributions in failure probabilities are identified. A parametric analysis is performed in these variables, in order to study their influence in failure probabilities. The study shows that the formulation of NBR 6118:2003 leads to non-uniform reliability, for a constant safety factor. This means that the unitary safety coefficient specified by the code for the cracking limit state does not reflect the uncertainty in the tubes resistance parameters.

Keywords: Pipe, Reinforced Concrete, Reliability, Crack.

Resumo

Com a teoria da confiabilidade avaliam-se as duas formulações apresentadas pela norma de projeto de estruturas de concreto NBR 6118:2003 para a estimativa da abertura de fissuras em tubos de concreto armado. Os métodos de confiabilidade *FOSM* (método de primeira ordem e segundo momento) e o método de simulação de Monte Carlo com amostragem por importância são utilizados. Uma primeira análise de confiabilidade revela as variáveis de projeto com maior contribuição nas probabilidades de falha. Uma análise paramétrica é realizada nestas variáveis, de maneira a identificar a influência destas na confiabilidade dos tubos. O estudo mostra que as formulações da NBR 6118:2003 levam a valores não uniformes para o índice de confiabilidade, para um mesmo fator de segurança. Isto significa que o coeficiente de segurança unitário especificado em norma para o estado limite de fissuração não reflete a incerteza nos parâmetros de resistência do tubo.

Palavras-chave: Tubo, Concreto Armado, Confiabilidade, Fissura.

^a Department of Structural Engineering, São Carlos Engineering School, São Paulo University, jeffersonlins@gmail.com, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, CEP: 13566-590, São Carlos, Brasil;

^b Department of Structural Engineering, São Carlos Engineering School, São Paulo University, mkdebs@sc.usp.br, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, CEP: 13566-590, São Carlos, Brasil;

^c Department of Structural Engineering, São Carlos Engineering School, São Paulo University, atbeck@sc.usp.br, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, CEP: 13566-590, São Carlos, Brasil;

1. Introdução

O projeto estrutural de tubos enterrados deve atender aos estados limite último e de serviço, verificados a partir dos esforços internos. A dificuldade no cálculo dos esforços em dutos enterrados resulta do fato destes dependerem da pressão do solo nas paredes dos tubos, sendo que esta pressão depende da forma de instalação (valas, aterros ou por cravação) e do assentamento do tubo (forma da base e condições de compactação do aterro lateral).

Na prática, em projetos de tubos enterrados, é habitualmente empregado o procedimento de Marston e Spangler (ZAILLER [1]), que resume-se em determinar a resultante das cargas verticais atuantes no tubo, empregando-se um fator de equivalência que correlaciona o comportamento do tubo entre as situações em campo e num ensaio padronizado.

Dentre os ensaios padrões existentes, o ensaio de compressão diametral é o mais utilizado, principalmente pela sua facilidade de realização. Este ensaio também é usualmente chamado de ensaio de três cutelos, como mostra a Figura 1.

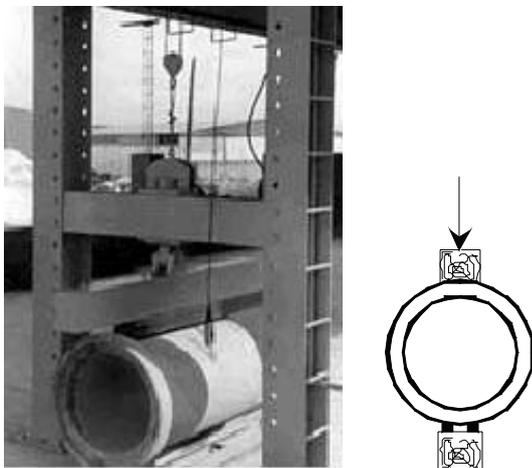
O fator de equivalência α_{eq} é utilizado para determinar a força F de compressão diametral no ensaio padrão, correspondente à resultante das cargas verticais atuantes no tubo na situação real, de forma a ter os máximos momentos fletores iguais para as duas situações. Com isto, temos:

$$F = \gamma(q + q_m) / \alpha_{eq} \quad (1)$$

onde:

q é a resultante das cargas verticais do solo;
 q_m é a resultante das cargas verticais móveis;
 α_{eq} é o fator de equivalência;
 γ é o fator de segurança de projeto.

Figura 1- Ensaio de três cutelos



De acordo com a NBR 8890:2003 [2], os fatores de segurança aplicados à expressão da resultante das cargas verticais são dados por: $\gamma = 1,0$ para o estado limite de fissuração e $\gamma = 1,5$ para o estado limite de ruptura. Note-se que estes fatores independem da variabilidade das solicitações ou das resistências.

A carga de ruptura corresponde à máxima força atingida no ensaio de compressão diametral, o que equivale ao estado limite último do tubo. A carga de trinca é aquela a partir da qual aparecerá no tubo uma fissura de 0,25 mm de abertura, com comprimento de 300 mm ou mais, o que corresponde ao estado limite de fissuração.

De acordo com a força a ser resistida no ensaio de compressão diametral, a NBR 8890:2003 [2] enquadra os tubos em classes resistentes, em função da carga de trinca e da carga de ruptura do tubo. Esta norma fixa também os requisitos e métodos de ensaio para a aceitação de tubos circulares de concreto simples e armado, destinados à condução de águas pluviais e esgotos sanitários.

A NBR 6118:2003 [3] apresenta duas formulações para o cálculo do valor característico da abertura de fissuras. O objetivo deste trabalho é avaliar a segurança e a confiabilidade destas formulações semi-empíricas em tubos circulares de concreto armado, especificamente tubos utilizados em situação de drenagem de água pluvial, e armados com telas soldadas. Para isto, primeiramente são avaliados os principais parâmetros mecânicos e geométricos que influenciam a confiabilidade dos tubos submetidos ao ensaio de compressão diametral. Em seguida, são realizadas análises paramétricas destas variáveis.

Este trabalho é motivado pela ausência, na literatura, de análises de segurança e confiabilidade no estado limite de fissuração de tubos circulares de concreto armado.

2. Estado limite de fissuração

A verificação da abertura de fissura pode ser feita com as indicações da NBR 6118:2003 [3], que fornece as seguintes expressões para determinar a grandeza da abertura de fissura:

$$w_a = \frac{\phi}{12,5 \cdot \eta} \frac{\sigma_s}{E_s} \frac{3 \cdot \sigma_s}{f_{ctm}} \quad (2)$$

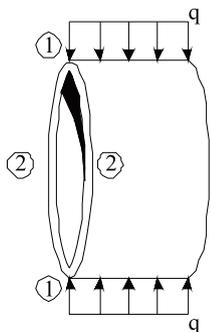
$$w_s = \frac{\phi}{12,5 \cdot \eta} \frac{\sigma_s}{E_s} \left(\frac{4}{\rho_r} + 45 \right) \quad (3)$$

Os parâmetros utilizados nas equações (2) e (3) tem a seguinte notação:

ϕ é o diâmetro do fio da tela soldada tracionada;
 η é o coeficiente de aderência dos fios da armadura tracionada;
 E_s é o módulo de elasticidade do aço;
 f_{ctm} é a resistência média à tração do concreto;
 w_a e w_s são, respectivamente, a fissuração assistemática e sistemática;
 σ_s é a tensão na armadura tracionada que pode ser calculada por:

$$\sigma_s = \frac{M_d}{0,9 \cdot d \cdot A_s} \quad (4)$$

Figura 2 - Comportamento estrutural idealizado por meio de uma faixa de largura unitária, sendo 1 e 2 as seções correspondentes ao coroamento/base e flanco, respectivamente



Na eq. (4):

d é a altura útil da seção;

M_d é o momento correspondente à carga de fissura (trinca), por metro linear;

A_s é a área da tela soldada tracionada, por metro linear;

ρ_r é a taxa geométrica do fio de tela soldada em relação a área A_{cr} , dada por:

$$\rho_r = \frac{A_{si}}{A_{cr}} \tag{5}$$

Na eq. (5):

A_{cr} é a área do concreto de envolvimento do fio de tela soldada (NBR 6118:2003 [3]);

A_{si} é a área do fio tracionado da tela soldada empregada.

Destaca-se que atualmente, no Brasil, as telas soldadas só têm sido produzidas com fio nervurado. Na falta de indicações mais precisas para o valor de η , recomenda-se utilizar $\eta = 2,25$ nas

expressões da avaliação da abertura de fissuras, que corresponde ao caso de barra de alta aderência.

O menor dos valores entre as duas expressões (w_a e w_s) corresponde à avaliação da abertura de fissura. Este valor deve ser limitado a 0,25 mm, que corresponde à definição da *carga de fissura (trinca)* do ensaio de compressão diametral. Salienta-se que existe uma razoável incerteza no cálculo deste parâmetro, o que pode ser observado com a colocação da NBR 6118:2003 [3], que se refere a ele como ordem de grandeza.

2.1 Esforços internos solicitantes

O tubo deve ser dimensionado para o ensaio de compressão diametral. Nesta situação, o tubo está sujeito a uma força uniformemente distribuída ao longo do seu eixo. Considerando estado plano de deformações, o tubo pode ser bem definido por meio de uma faixa de largura unitária, conforme mostra a Figura 2.

O tubo é analisado para duas seções de referência: a seção do *coroamento/base* e a seção do *flanco*, onde esforços solicitantes e deslocamentos são máximos. Usando a teoria elástica aplicada a anéis delgados, encontram-se os esforços solicitantes ao longo do anel circular sujeito à compressão diametral, o que é ilustrado de forma esquemática na Figura (3).

3. Confiabilidade estrutural

O problema fundamental da confiabilidade pode ser formulado em termos de duas variáveis solicitação S e resistência R . O evento falha ocorre quando $R - S < 0$ ou $R / S < 1$. FREUDENTHAL *et al.* [4] e ANG & TANG [5] definem a probabilidade de falha como sendo a integral sobre o domínio do produto das funções $F_R(s)$ e $f_S(s)$, como mostram a Equação 6 e a Figura 4. A probabilidade de falha definida pela Equação 6 considera a independência entre as variáveis S e R .

$$p_F = \int_0^{+\infty} F_R(s) f_S(s) ds \tag{6}$$

Figura 3 - Esforços solicitantes produzidos por duas forças diametralmente opostas

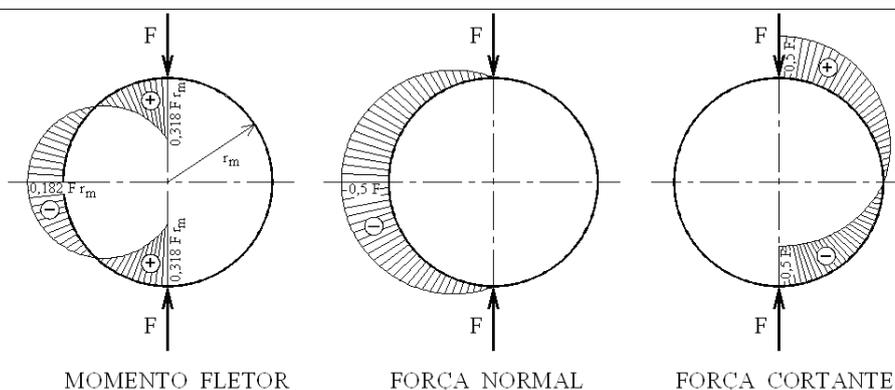
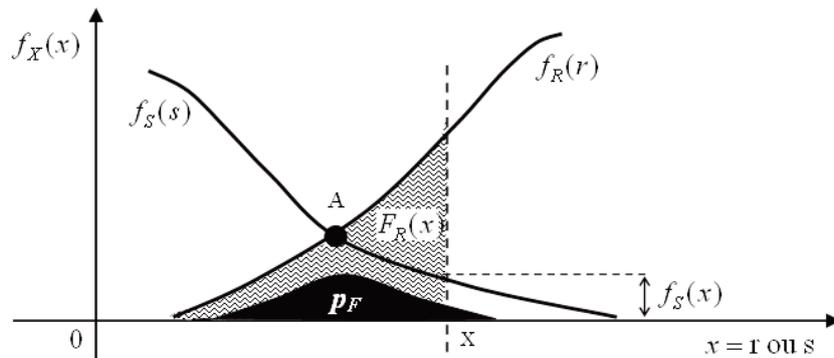


Figura 4 – Funções densidades $f_r(r)$ e $f_s(s)$ – Fonte: SILVA (2006)



A área em preto na Figura 4 representa a probabilidade de falha p_F , que é proporcional à interferência entre as curvas de resistência e solicitação. Quanto maior a região de interferência, maior a probabilidade de falha, ou seja, menor a confiabilidade.

Generalizando para um problema envolvendo n variáveis aleatórias, a probabilidade de falha é obtida pela Equação 7, onde $f_X(x)$ é uma função conjunta de densidade de probabilidade e D_f corresponde ao domínio de falha, definido por uma equação de estado limite $g(\mathbf{X})$, escrita em função das variáveis de projeto \mathbf{X} .

$$p_F = \int_{[g(\mathbf{X}) < 0]} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (7)$$

Os métodos utilizados para determinar a probabilidade de falha diferenciam-se em termos das aproximações em $f_X(x)$ e D_f . A função conjunta de densidades $f_X(x)$ é determinada com base na informação existente, basicamente as funções de distribuições marginais ($f_S(s)$ e $f_R(r)$), por exemplo) e ainda o coeficiente de correlação entre pares de variáveis (ρ_{RS}).

O FOSM, método de primeira ordem e segundo momento, sigla derivada do inglês: *First Order Second Moment*, tem como características principais:

- a) a equação de estado limite é aproximada por uma função linear;
- b) a construção da função conjunta $f_X(x)$ se baseia nos momentos de até segunda ordem (média e covariância), o que equivale assumir variáveis com distribuição normal, possivelmente correlacionadas.

O FORM - *First Order Reliability Method*, método de confiabilidade de primeira ordem, se diferencia do FOSM, pois nesse método toda a informação estatística sobre as variáveis aleatórias é utilizada. Isto permite resolver problemas envolvendo variáveis aleatórias não-Gaussianas. A equação de estado limite ainda é aproximada por uma função linear.

A estimativa da probabilidade de falha pode ser obtida também através de simulação. O método de Monte Carlo é bastante utilizado, por sua simplicidade, e consiste na repetição de soluções determinísticas, a partir de um conjunto de valores gerados a partir das distribuições de probabilidades das variáveis aleatórias

do problema. É comum utilizar o método de Monte Carlo para verificar soluções aproximadas, tal como FOSM or FORM. No método de Monte Carlo é possível ainda utilizar técnicas para reduzir o número de simulações necessárias, principalmente quando a probabilidade de falha é pequena (caso típico da confiabilidade estrutural). Dentre as técnicas comumente utilizadas está a amostragem por importância ou amostragem inteligente, que desloca os pontos amostrados para regiões importantes do domínio de falha D_f evitando simular excessivamente pontos longe de D_f .

A partir da probabilidade de falha, definida nas equações 6 e 7, pode-se definir o índice de confiabilidade β , que é dado por: $\beta = -\Phi^{-1}(p_F)$. Nesta expressão, $\Phi^{-1}(\cdot)$ é a inversa da função de probabilidade acumulada normal padrão.

O índice de confiabilidade β pode ser comparado com o chamado fator de segurança central (FS), segundo as equações 8 e 9 (SILVA [6]). Estas equações se aplicam a uma situação envolvendo duas variáveis aleatórias R e S correlacionadas e com distribuição normal. O fator de segurança central FS é a relação entre a resistência média e a solicitação média. O índice de confiabilidade β vem a ser a razão entre a margem de segurança média e o desvio padrão da margem de segurança.

$$FS = \frac{m_R}{m_R - \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2 - 2 \rho_{RS} \sigma_R \sigma_S}} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1 - 1/FS}{\sqrt{v_R^2 + (1/FS)^2 v_S^2 - \frac{2 \rho_{RS} \sigma_R \sigma_S}{m_R^2}}} \quad (9)$$

Nestas equações:

m_R é o valor médio da variável resistência;

σ_R e σ_S são o desvio padrão da resistência e solicitação, respectivamente;

v_R e v_S são o coeficiente de variação de R e S, respectivamente;

ρ_{RS} é o coeficiente de correlação entre R e S.

Pode-se notar que a relação entre β e FS é altamente não linear, e depende dos momentos estatísticos de R e S .

4. Metodologia de análise

Inicialmente, realizou-se uma análise de confiabilidade para determinar os parâmetros mais importantes no estudo de confiabilidade. Após esta verificação, foram executadas análises paramétricas, alterando os parâmetros das variáveis aleatórias mais influentes. Estas análises consistem em determinar os valores do fator de segurança central FS e o índice de confiabilidade β , considerando-se duas funções de estado limite explícitas. O programa computacional utilizado nas análises foi desenvolvido por BECK[7].

A seguir, são detalhados os procedimentos para a obtenção das equações de estado limite e os dados utilizados nas análises numéricas.

4.1 Equações de estado limite

De acordo com as expressões apresentadas pela NBR 6118:2003 [3] para a estimativa da abertura de fissuras em estruturas de concreto armado, pode-se chegar à duas funções de estado limite a partir das quais é possível avaliar a confiabilidade apresentada por um tubo de concreto armado em termos de não alcançar a carga mínima de fissuração, conforme definida pela NBR 8890:2003 [2], quando especificada a classe a qual pertence o tubo.

Encontrando nas expressões da NBR 6118:2003 [3] a força capaz de provocar abertura média de fissuras no ensaio de compressão diametral, chegam-se às seguintes equações de estado limite

$$\text{EEL1: } g(X) = F_1 - F \tag{10}$$

$$\text{EEL2: } g(X) = F_2 - F \tag{11}$$

(EEL), definidas em termos da força aplicada no ensaio (F):
 Nas equações (10) e (11) temos:

$$F_1 = \frac{0,9 \cdot d \cdot A_s}{C \cdot R_m} \cdot \sqrt{\frac{12,5 \cdot w \cdot \eta \cdot E_s \cdot f_{ctm}}{3 \cdot \phi}} \tag{12}$$

$$F_2 = \frac{0,9 \cdot 12,5 \cdot w \cdot \eta \cdot E_s \cdot d \cdot A_s}{C \cdot \phi \cdot R_m \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right)} \tag{13}$$

onde:

R_m é o raio médio da seção circular do tubo;

C é a constante que varia em função do diagrama de momentos fletores no ensaio de compressão diametral. O seu valor é igual a

0,318 caso não considere o arredondamento nos momentos fletores do coroamento (EL DEBS [8]);

F é a força mínima para a abertura de fissura de 0,25 mm prescrita pela norma NBR 8890:2003 [2] para a classe para a qual o tubo foi especificado.

As expressões F_1 e F_2 representam duas condições de resistências para o estado limite de fissuração de tubos de concreto armado.

Para realizar o cálculo do índice de confiabilidade no estado limite de fissuração algumas hipóteses foram consideradas:

- a) Até a abertura da fissura de 0,25 mm, os momentos fletores crescem linearmente com o carregamento. Com isso, não são considerados redistribuições significativas de esforços decorrentes das não-linearidades presentes na estrutura. Esta hipótese se apresenta razoável uma vez que se está trabalhando com ações em serviço, próxima da carga de fissuração do tubo de concreto.
- b) Para uma avaliação preliminar, as funções de distribuição das variáveis básicas de cálculo são consideradas com distribuição normal.
- c) À princípio, as variáveis básicas são consideradas não-correlacionadas, pois inexistente informação sobre correlação das mesmas.
- d) As expressões 12 e 13 foram determinadas para a seção do coroamento, onde os momentos fletores se apresentam de maneira mais crítica em relação ao aparecimento de fissuras, como mostra a Figura 3.

4.2 Dados utilizados

No dimensionamento de tubos circulares de concreto armado para diâmetros nominais inferiores a 800 mm, é usualmente empregada armadura circular simples. De acordo com esta sugestão de caráter prático, foram considerados tubos circulares com diâmetros nominais de 800 mm, de modo a avaliar o comportamento nesta situação prática de projeto.

Baseando-se em informações de um fabricante brasileiro, é possível definir que para tubos de 800 mm, as espessuras das paredes (h) têm valor padronizado de 72 mm, a altura útil da seção (d) apresenta média de 45 mm e o concreto utilizado na produção dos tubos têm resistência característica à compressão (f_{ck}) de 35 MPa.

A variabilidade do concreto é definida de acordo com os preceitos da NBR 12655:1996 [9]. De acordo com esta norma, a resistência do concreto depende das condições do seu preparo. Básica-

Tabela 1 - Valores das variáveis de projeto

V.A.	Média	Desvio-Padrão	C.O.V.(%)
X1 = d	45mm	4,5mm	10
X2 = f_c	41,6MPa	4MPa	9,62
X3 = h	72mm	7,2mm	10
X4 = F	32kN	0,32kN	1
X5 = E_s	2,1e5MPa	50,4e2MPa	2,4

Tabela 2 – Ponto de projeto, sensibilidade e confiabilidade das EEL1 e EEL2

V.A.	EEL1		EEL2	
	Ponto de Projeto	Sensibilidade	Ponto de Projeto	Sensibilidade
X1 = d	2.772	92.38%	4.179	54.53%
X2 = f _c	3.749	6.52%	4.158	0%
X3 = h	7.340	0.24%	7.656	43.18%
X4 = F	32.07	0.35%	32.017	0.34%
X5 = E _s	20855.9	0.51%	20932.2	1.95%
β_{FOSM}	3.995		0.964	
$p_{F,FOSM}$	3.227e-5		1.674e-1	

mente, a variabilidade é medida em função do desvio padrão da resistência média do concreto que pode apresentar os seguintes valores: 4 MPa; 5,5 MPa e 7 MPa.

Segundo a NBR 8890:2003 [2] que determina a força a ser resistida no ensaio de compressão diametral, a carga mínima de trinca para a situação de drenagem de água pluvial utilizada nas análises é de 32 kN/m. Esta força já incorpora o coeficiente de segurança de projeto, conforme equação (1).

Os valores da abertura de fissura, do coeficiente de conformação superficial da armadura tracionada e do diâmetro do fio da tela soldada tracionada, valem, respectivamente, $w = 0,25\text{ mm}$; $\eta = 2,25$ e $\phi = 7,1\text{ mm}$.

Vale comentar que, como não se dispõem de dados experimentais para a caracterização dos parâmetros de cada variável aleatória, fez-se necessário adotar os demais valores citados a seguir, ora conforme a literatura técnica, ora conforme inferência advinda da experiência dos autores.

5. Resultados e discussões

5.1 Análise de confiabilidade inicial

Dentre os métodos utilizados para o cálculo do índice de confiabilidade, adotou-se neste trabalho o FOSM para uma análise de sensibilidade das variáveis de projeto. Através da sensibilidade das variáveis de projeto é possível medir quais os parâmetros mais importantes que devem ser focados num estudo numérico e/ou experimental, especialmente quando a questão da confiabilidade for considerada.

Para as duas equações de estado limite, as seguintes variáveis aleatórias foram consideradas: altura útil (d), resistência do concreto à compressão (f_c), espessura da parede do tubo (h), força de compressão diametral do ensaio padrão (F) e módulo de elasti-

Figura 5 – Sensibilidade das variáveis aleatórias para as equações de estado limite EEL1 e EEL2

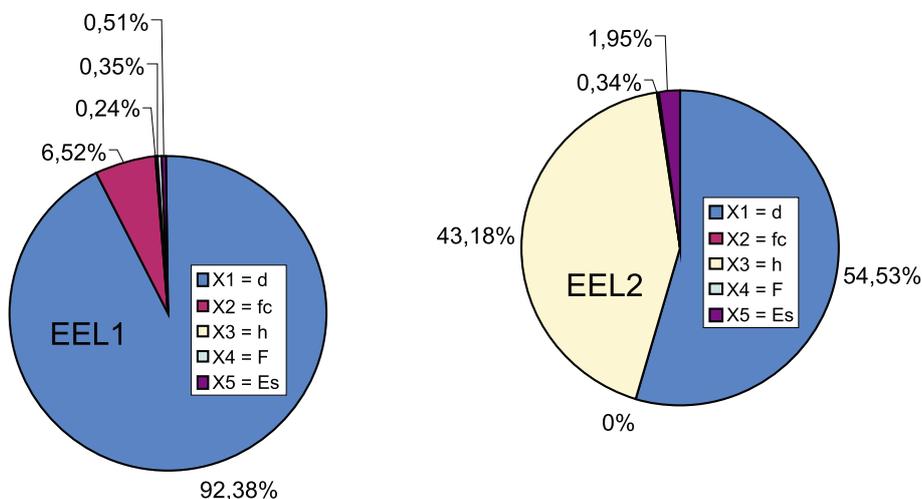


Tabela 3 – Valores das Análises Paramétricas

Tipos	Desvio Padrão		C.O.V. (%)	
	d (mm)	f _c (MPa)	d	f _c
Caso 1	4,5	4	10	9,62
Caso 2	4,5	5,5	10	12,48
Caso 3	4,5	7	10	15,05
Caso 4	9	4	20	9,62
Caso 5	9	5,5	20	12,48
Caso 6	9	7	20	15,05

dade do aço (E_s). A Tabela 1 mostra os parâmetros adotados para cada variável aleatória do problema.

A Tabela 2 mostra, respectivamente, os pontos de projeto, valores de sensibilidade, índices de confiabilidade e probabilidade de falha para cada equação de estado limite. Observe que não foi avaliada apenas a equação de estado limite que oferecesse o menor valor para a abertura de fissura, conforme indicação da NBR 6118-2003 [3], pois a intenção é avaliar o comportamento de ambas as equações de estado limite frente à segurança e confiabilidade.

A Figura 5 mostra a influência de cada variável em cada equação de estado limite (EEL1 e EEL2) para os parâmetros indicados na Tabela 1. Note que, como era de se esperar, não houve influência da variável f_c na EEL2, simplesmente pelo fato desta variável não pertencer a esta equação, como indica a equação 13.

No caso da EEL1 as variáveis mais importantes são: altura útil (d) e a resistência do concreto à compressão (f_c). Para EEL2 se destacaram a altura útil (d) e a espessura da parede do tubo (h).

5.2 Análises paramétricas

Com a análise de confiabilidade inicial, identificou-se que as variáveis aleatórias altura útil e resistência do concreto têm a maior contribuição na probabilidade de falha dos tubos. Neste item são realizadas análises paramétricas com variações dos desvios-padrão destas variáveis, empregando-se o método FOSM (First

Order Second Moment) e a Simulação de Monte Carlo com Amostragem por Importância.

Em função da variabilidade da altura útil (d) e da resistência do concreto (f_c), a análise paramétrica é composta por 6 casos, como mostra a Tabela 3. Para todos os casos, a espessura da parede do tubo (h) foi considerada com desvio-padrão de 7,2 mm.

As Tabelas 4 e 5 resumem os parâmetros de confiabilidade e segurança para cada equação de estado limite, EEL1 e EEL2, respectivamente. Os parâmetros de confiabilidade calculados foram: o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha pelo método FOSM (β_{FOSM}, p_{F,FOSM}) e pela simulação de Monte Carlo com Amostragem por Importância (β_{MCAI}, p_{F,MCAI}), e ainda o fator de segurança central e o índice de confiabilidade calculados a partir das equações 8 e 9. O índice de confiabilidade encontrado a partir da equação 9 representa uma aproximação linear da equação de estado limite realizada no ponto médio. A simulação de Monte Carlo com Amostragem por Importância foi realizada com amostragem de 1000 pontos.

As duas fórmulas apresentadas na NBR 6118/2003 para avaliação da abertura de fissuras representam um sistema em série, pois a falha é caracterizada pelo menor valor de força obtido a partir das duas expressões

Nas Tabelas 4 e 5, para os fatores de segurança centrais relacionados a EEL1 e EEL2, pode-se notar que não houve uma diferença significativa, quando comparados com a variação no valor do índice de confiabilidade aferido pelo método FOSM, simulação de Monte Carlo com amostragem por importância e a equação 9.

Comparando os valores dos índices de confiabilidade apresentados nas Tabelas 4 e 5, pode-se observar que os valores do β_{FOSM} e β_{MCAI} são maiores que β_{equação9}. Porém, o mesmo não se verificou na Tabela 4, nos casos 1, 2 e 3 da simulação de Monte Carlo.

Ainda de acordo com as tabelas 4 e 5, com o aumento do coeficiente de variação de d e fc houve uma diminuição nos valores de β_{FOSM}, β_{MCAI}, β_{equação9} e um aumento na probabilidade de falha, o que intuitivamente era de se esperar. Observa-se também na tabela 4 que a diminuição no valor do índice de confiabilidade foi mais influenciada pelo aumento do coeficiente de variação de d, como mostram os casos 4, 5 e 6.

É válido frisar que o índice de confiabilidade reflete a variabilidade associada a cada caso, o que não ocorre com o fator de segurança central, que permaneceu constante para EEL1 e EEL2. De modo geral, percebe-se que somente especificar o fator de segurança central para o projetista não é aconselhável, pois pode levar

Tabela 4 – Resultados para a análise paramétrica da EEL1

Tipos	β _{FOSM}	p _{F,FOSM}	β _{MCAI}	p _{F,MCAI}	FS	β _{equação9}
Caso 1	4.018	2.931e-5	3.633	1.399e-4	1.705	3.863
Caso 2	3.884	5.127e-5	3.581	1.711e-4		3.662
Caso 3	3.613	1.515e-4	3.360	3.892e-4		3.440
Caso 4	2.054	1.999e-2	2.042	2.057e-2		2.031
Caso 5	2.041	2.061e-2	2.043	2.050e-2		2.000
Caso 6	2.024	2.148e-2	2.009	2.225e-2		1.961

Tabela 5 – Resultados para a análise paramétrica da EEL2

Tipos	β_{FOSM}	$P_{F,FOSM}$	β_{MCAI}	$P_{F,MCAI}$	FS	$\beta_{equação9}$
Caso 1						
Caso 2	0,975	1,646e-1	0,973	1,652e-1		0,891
Caso 3						
Caso 4					1,182	
Caso 5	0,595	2,757e-1	0,636	2,624e-1		0,565
Caso 6						

a projetos com índices de confiabilidade bastante diferentes, em função da variabilidade dos parâmetros do problema. Esta conclusão pode ser encontrada em outras aplicações, como em AOKI [10] e SILVA [11].

Os pontos de projeto no espaço físico para EEL1 e EEL2 estão mostrados na Figura 6. Nesta figura, μ_x representa o ponto médio, $X1^*$ e $X2^*$ são os pontos de projeto, onde $X1^*$ e $X2^*$ estão associados a EEL1 e EEL2, respectivamente. As linhas sobre as quais se situam $X1^*$ e $X2^*$ são superfícies de falha. De modo geral, a Figura 6 ilustra que a equação de estado limite EEL2 se aproxima mais do estado limite de fissuração. É claro que esta inferência não deve ser entendida como conclusiva, pois reflete apenas a configuração de tubo de concreto estudada neste trabalho.

Os resultados das Tabelas 4 e 5 podem ser comparados com as recomendações do Eurocode 1 [12] e do CEB [13]. O Eurocode 1 indica para os valores dos índices de confiabilidade: 1,5 para o estado limite de serviço e 3,8 para o estado limite último. O CEB [13] também apresenta algumas sugestões de acordo com classes de segurança requeridas, como mostra a Tabela 6. Os valores desta tabela podem ser utilizados como meta num dimensionamento ou verificação estrutural, ou seja, projeta-se ou verifica-se a confiabilidade de uma estrutura de modo que o índice de confiabilidade esteja próximo ao apresentado.

A partir das comparações entre índices de confiabilidade apresentados no Eurocode 1 [12] e no CEB [13] com os casos analisados nas Tabelas 4 e 5, pode-se dizer que:

- todas as análises do EEL1 satisfazem a sugestão do Eurocode 1 [11], quanto ao estado limite de serviço; o que não ocorreu com a EEL2;
- as análises 1, 2 e 3 da Tabela 4 satisfazem a recomendação do nível de segurança 1 e 2 do CEB [13], o que não ocorreu com a EEL2 e com os casos 4, 5 e 6 da Tabela 4.

Tabela 6 – Índices de Confiabilidade de acordo com classes de segurança. Fonte: CEB (1991)

Nível de Segurança	1	2	3
Estado Limite de Serviço	2.5	3.0	3.5
Estado Limite Último	4.2	4.7	5.2

6. Conclusões

Este trabalho traz uma contribuição sobre o estado limite de serviço (fissuração) em dutos de concreto armado, um tema pouco abordado na literatura.

Nas formulações propostas pela NBR 6118:2003 [3] para o cálculo do valor característico da abertura de fissuras em tubos de concreto armado, as variáveis mais importantes são: a altura útil da armadura, a resistência do concreto à compressão e a espessura da parede do tubo.

O estudo mostrou que, para um mesmo fator de segurança central, as formulações da NBR 6118:2003 levaram a valores do índice de confiabilidade bastante distintos, para variações dos parâmetros das variáveis em estudo. Logo, o projeto baseado em fator de segurança central não garante confiabilidade uniforme. O mesmo vale para o projeto de tubos de concreto armado no estado limite de fissuração. O coeficiente de segurança estipulado em norma para este estado limite ($\gamma = 1,0$) não reflete a incerteza nos parâmetros de resistência do tubo.

7. Agradecimentos

Ou autores agradecem a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e CNPq – Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pelo apoio financeiro a este projeto de pesquisa.

8. Referências bibliográficas

- [01] ZAILLER, W.. Projetos estruturais de tubos enterrados. PINI Editora, São Paulo, S.P., 1983.
- [02] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8890: Tubos de concreto, de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitários – requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2003.
- [03] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003.
- [04] FREUDENTHAL, A. M.; GARRELTS, J. M. & SHINOZUKA, M.. The Analysis of Structural Safety. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 92, No ST1, February, p. 267-325, 1966.

- [05] ANG, A.H-S & TANG, W.. Probability concepts in engineering planning and design. Volume II: Decision, Risk and Reliability. Jonh Wiley & Sons. New York. 562p, 1984.
- [06] SILVA, J. L.. Metodologia de Projeto de Fundações por Estacas incluindo Probabilidade de Ruína. Escola de Engenharia de São Carlos/USP. Dissertação (Mestrado), 103 paginas, São Paulo, 2006.
- [07] BECK, A. T.. Computer-aided teaching of structural reliability. XXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Porto - Portugal, 2007.
- [08] EL DEBS, M. K.. Projeto estrutural de tubos circulares de concreto armado. 1 ed. São Paulo: IBTS, 2003.
- [09] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto – Preparo, Controle e Recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.
- [10] AOKI, N.. Probabilidade de falha e carga admissível de fundação por estacas. Revista Militar de Ciência e Tecnologia. Vol. XIX, pp. 48-64, Brasil, 2002.
- [11] SILVA, J. L. & AOKI, N.. Determinação simples da probabilidade de ruína de grupo de pilares de um edifício de concreto armado. Congresso de Pontes e Estruturas, ABPE, Rio de Janeiro, 2005.
- [12] EUROCODE 1. Basis of Design and Actions on Structures. Comité Européen de Normalisation (GEN/TC250/SC1), ENV 1991-1, 1993.
- [13] COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB) & FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE (FIP) Model Code 1990 – Design code. Lausanne: Thomas Telford Services Ltd, 1991.