



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE UM PÓRTICO PLANO DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO O ANSYS

Victor Wagner Araújo Pereira

Juliana Von Schmalz Torres

victorwap@hotmail.com

julianavst@yahoo.com.br

Universidade Federal de Pernambuco – Campus Caruaru

Rodovia BR-104, Km 59, s/n, 55002-970, Pernambuco, Caruaru, Brasil

Silvana Maria Bastos Afonso

smb@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco – Campus Recife

Av. Professor Moraes Rego, 1235, 50670-901, Pernambuco, Recife, Brasil

Resumo. *A segurança é um aspecto primordial para qualquer tipo de estrutura. Para que as estruturas atendam aos requisitos de segurança desejáveis, é de grande importância que se faça um estudo probabilístico do nível de segurança das mesmas, pois, por mais seguras que sejam, todas possuem uma probabilidade não nula de falha, logo, basta apenas que ela seja a menor possível. O presente trabalho tem por finalidade realizar uma avaliação da segurança em um pórtico plano de concreto armado, utilizando-se da confiabilidade. O método analítico FORM (First Order Reliability Method) será empregado para que sejam encontrados o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha da estrutura. Neste caso, o programa computacional ANSYS será acionado no MATLAB para obtenção da função de falha da estrutura.*

Palavras-chave: *Confiabilidade, Concreto armado, Segurança.*

1 INTRODUÇÃO

Nenhuma estrutura pode ser considerada completamente confiável. Isto se dá pelo fato da existência de incertezas nas variáveis de projeto, o que torna o problema probabilístico e não mais determinístico. A confiabilidade estrutural permite que essas incertezas sejam consideradas. O trabalho consiste em avaliar a segurança de um pórtico plano de concreto armado (ANDRADE, 2010).

As variáveis aleatórias consideradas são a tensão de escoamento do aço, resistência à compressão do concreto e as dimensões das seções transversais. O método analítico FORM (*First Order Reliability Method*) programado na linguagem do MATLAB será aplicado (TORRES, 2009). Este método permite encontrar o índice de confiabilidade e consequentemente a probabilidade de falha da estrutura. Para a avaliação da segurança estrutural se faz necessário a definição de uma função falha para cada elemento (vigas e pilares) baseando-se em um sistema R-S (resistência-solicitação). A solicitação é obtida através dos carregamentos especificados em projeto. Para cálculo dos esforços, os carregamentos nas vigas serão assumidos segundo alguns critérios normatizados referentes às cargas permanentes e às variáveis. O efeito causado pelo vento, seguindo a aplicação da NBR 6123 (1988) será considerado. A solicitação será encontrada via método dos elementos finitos com auxílio de um algoritmo criado na linguagem computacional do programa comercial ANSYS, que é capaz de trabalhar nos módulos de pré-processamento, processamento e pós-processamento. A resistência será obtida por equações que envolvem as variáveis aleatórias do problema seguindo critérios prescritos na NBR 6118 (2014).

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

As estruturas por mais seguras que sejam não podem ser consideradas 100% confiáveis, isso por que existem parâmetros que não podem ser considerados determinísticos, entre eles podem-se citar as imperfeições geométricas, falhas construtivas, entre outros. Pode-se afirmar ainda que a probabilidade de falha é o complemento da confiabilidade (C), assim como pode ser visto na Equação 1.

$$p_f = 1 - C \quad (1)$$

A análise de confiabilidade requer a definição da função de falha (Equação 2) que pode ser representada através do sistema resistência/solicitação, baseando-se no princípio que a máxima solicitação não supere sua capacidade resistente.

$$G(\mathbf{U}) = R - S \quad (2)$$

Nesta equação, o S representa a solicitação enquanto o R a resistência. Onde \mathbf{U} representa o conjunto de variáveis aleatórias do problema em questão, podendo ser escrito como $\mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n)$. Da Equação 2, pode-se concluir que quando $G(\mathbf{U}) < 0$, a resistência do elemento estrutural não foi suficiente para suportar a solicitação e com isso acontece a falha, já quando $G(\mathbf{U}) > 0$, a estrutura foi eficiente e suportou o carregamento. Os pontos em que $G(\mathbf{U}) = 0$, são os pontos sobre a superfície de falha, como apresenta a Figura 1.

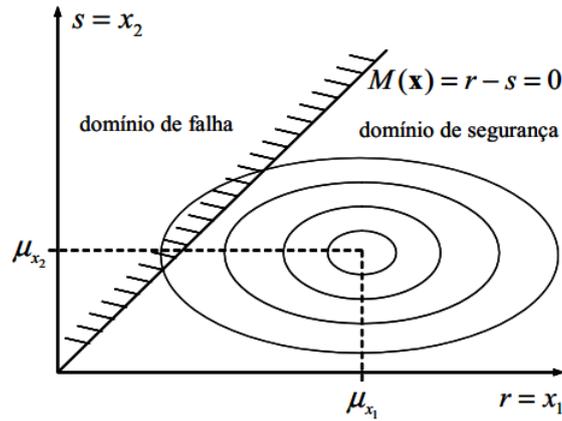


Figura 1. Função falha (caso bidimensional) (BECK, 2010)

A Equação 3 mostra a probabilidade de falha em termos do domínio de falha.

$$p_f = P(G(\mathbf{U}) \leq 0) \quad (3)$$

Devido a difícil solução via integração da função densidade de probabilidade conjunta das variáveis, os métodos analíticos tornam-se uma solução viável para o problema, neste trabalho, o método utilizado será o FORM (SAGRILO, 2002).

O método analítico FORM é uma ferramenta que tem por finalidade encontrar o índice de confiabilidade para que dentro de uma linha de pesquisa, possam ser feitas análises como a avaliação da segurança de uma estrutura. Neste método as variáveis que estão no espaço original \mathbf{U} , são transformadas para o espaço das variáveis reduzidas \mathbf{V} , nesse espaço reduzido as variáveis possuem média nula e desvio padrão unitário. A função falha $G(\mathbf{U})$ passa a ser escrita em função dessas variáveis reduzidas (Equação 4).

$$G(\mathbf{U}) = r\sigma_R + \mu_R - s\sigma_S - \mu_S \quad (4)$$

Com essa nova superfície onde $g(\mathbf{V}) = 0$, aproxima-se a mesma a uma superfície linear e encontra-se a distância entre um ponto na superfície (\mathbf{V}^*) e a origem. O método FORM busca então minimizar a distância desse ponto de projeto no espaço das variáveis reduzidas, em busca de um maior índice de confiabilidade e conseqüentemente uma menor probabilidade de falha.

$$\beta = |\mathbf{V}^*| \quad (5)$$

Em seguida, para encontrar a probabilidade de falha, evita-se resolver o problema de difícil solução que seria a resolução da integral da Equação 6, logo, essa mesma expressão mostra a finalização do método FORM e a solução aproximada pelo método analítico:

$$p_f = \int_{G(\mathbf{V}) \leq 0.0} f_v(\mathbf{V}) d\mathbf{v} \approx \Phi(-\beta) \quad (6)$$

Onde o Φ é a função cumulativa da distribuição normal padrão e o β é o índice de confiabilidade aqui encontrado aplicando o FORM.

Para que sejam encontradas as solicitações necessárias para uso na função de falha, é utilizado o programa de elementos finitos ANSYS. Este programa é apto a realizar desde o pré-processamento, processamento e pós-processamento do problema em questão.

Inicialmente, no pré-processamento, é feita a modelagem da estrutura, caracterizando-a com os parâmetros necessários como dimensões, tipo de material, definição das forças e condições de contorno. A Figura 2 apresenta o elemento beam3 estudado no ANSYS, apropriado para o estudo do pórtico plano em questão. Na seção de processamento, é realizada a solução do problema estudado para em seguida entrar no pós-processamento, extraindo-se os resultados do problema.

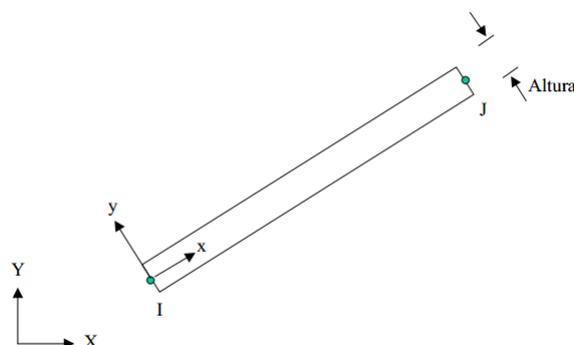


Figura 2. Elemento estrutural beam3 do ANSYS

Como a rotina principal foi implementada no programa computacional MATLAB, se fez necessário realizar uma interface entre os programas (MATLAB x ANSYS) para que os esforços solicitantes encontrados via ANSYS possam compor a função falha no algoritmo FORM. Essa interação entre os programas ocorre com a criação de um arquivo pelo MATLAB em formato de blocos de notas com linguagem compatível para a leitura no ANSYS, contendo todos os dados e parâmetros de entrada para a modelagem da estrutura. Por fim, o ANSYS escreve os esforços solicitantes em novos arquivos para que os mesmos possam ser lidos novamente pelo MATLAB, compondo a solicitação da função falha.

A JCSS (*Join Committee on Structural Safety*, 2001) – *Basis of Design* apresenta uma tabela com o índice de confiabilidade alvo associando o custo relativo a medida de segurança dentro e as conseqüências da falha da estrutura, de um período de um ano (Tabela 1).

Tabela 1. Índices de confiabilidade alvos para os estados limites últimos

<i>Custo relativo da medida de segurança</i>	<i>Conseqüências de falha mínima</i>	<i>Conseqüências de falha moderada</i>	<i>Conseqüências de falha elevada</i>
<i>Alto (A)</i>	$\beta = 3,1$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-3}$)	$\beta = 3,3$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-4}$)	$\beta = 3,7$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-4}$)
<i>Normal (B)</i>	$\beta = 3,7$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-4}$)	$\beta = 4,2$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-5}$)	$\beta = 4,4$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-5}$)
<i>Pequeno (C)</i>	$\beta = 4,2$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-5}$)	$\beta = 4,4$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-6}$)	$\beta = 4,7$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-6}$)

Para a definição das funções de falha tanto dos pilares quanto das vigas foram necessários realizar os dimensionamentos dos mesmos (CARVALHO & FIGUEIREDO, 2014). Para as vigas, foram aplicadas as prescrições da norma NBR 6118 (2014) para encontrar a taxa de armadura das mesmas, aplicando-a em seguida na função falha. A partir as equações de equilíbrio ($\sum F = 0$; $\sum M = 0$), é possível encontrar a Equação 7, referente ao momento resistente para o caso de uma viga com armadura simples submetida à flexão simples, assim como a Equação 8 referente a vigas com armadura dupla (ARAÚJO, 2003).

$$M_d = A_s f_{yd} \left(h - c - \frac{\Phi_t}{2} - \frac{0,4 A_s f_{yd}}{0,68 f_{cd} b} \right) \quad (7)$$

$$M_d = (0,85 f_{cd} \cdot 0,8 x_{lim} b) \cdot (d' - 0,4 x_{lim}) + A_s f_{yd} \cdot (d - d') \quad (8)$$

Na qual o A_s é a taxa de armadura; f_{yd} é a tensão resistente de cálculo do aço; h é a altura da seção transversal; b é a base da seção transversal; c é o cobrimento; Φ_t é o diâmetro da armadura transversal; f_{cd} é a resistência de cálculo a compressão do concreto; d é a distância do centro de gravidade da última camada de armadura até a borda mais comprimida; d' é a distância do centro de gravidade da primeira camada de armadura até a borda mais comprimida.

Já para os pilares, estão submetidos a esforços normais de compressão juntamente com um momento fletor (TORRES, 2001). Como a carga axial é aplicada com excentricidade na direção de um dos eixos principais de inércia, a solitação é dita flexocompressão normal, nela, a posição da linha neutra é uma incógnita do problema. Foi implementado na linguagem MATLAB, um algoritmo para que a linha neutra seja determinada assim como os outros parâmetros dependentes dela, tal como como a taxa de armadura. A Figura 3 apresenta as forças atuantes na peça de concreto.

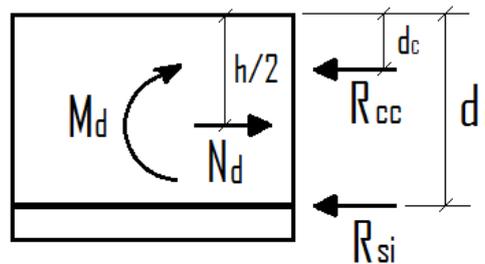


Figura 3. Forças atuantes em uma peça submetida à flexocompressão normal.

A Equação 9 mostra o momento resistente para os pilares submetidos a flexo-compressão normal.

$$M_d = N_d \frac{h}{2} - 0,8 \cdot b \cdot x \cdot \sigma_{cd} \cdot d_c - \sum_{i=1}^{n'} R_{si} \cdot d_i \quad (9)$$

Na qual o N_d é o esforço normal de cálculo; h é a altura da seção transversal; b é a base da seção transversal; R_{si} é a força atuante de cada camada de barras de aço na peça estrutural; d_i é a distancia de cada camada de barras à borda mais comprimida da peça; σ_{cd} é a tensão de

cálculo do concreto; x é a posição da linha neutra e d_c é a distância do centróide da região comprimida do concreto até a borda mais comprimida.

A probabilidade de falha de toda a estrutura (pórtico) foi avaliada como sendo as probabilidades parciais dos componentes da estrutura (vigas e pilares) dispostas em série com a independência dos eventos. Essa probabilidade de falha é encontrada através da expressão do limite superior da inequação a seguir (BECK, 2010).

$$\max_i P[E_i] \leq P_f \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P[E_i]) \quad (10)$$

Na qual $P[E_i]$ são as probabilidades de falha de cada viga e pilar de toda a estrutura. Com o conhecimento da probabilidade de falha do pórtico pode-se realizar a avaliação da segurança, assim como a execução de um projeto baseado em confiabilidade.

3 RESULTADOS

O pórtico plano de 3 pavimentos apresentado na Figura 4b será avaliado quanto a segurança. Este modelo pode corresponder a uma “fatia” da estrutura, representando uma simplificação para o comportamento tridimensional, tal como pode ser visualizado na Figura 4a. O mesmo está submetido a carregamentos distribuídos ao longo das vigas do pórtico, assim como um carregamento devido a força dos ventos na parede lateral impermeável.

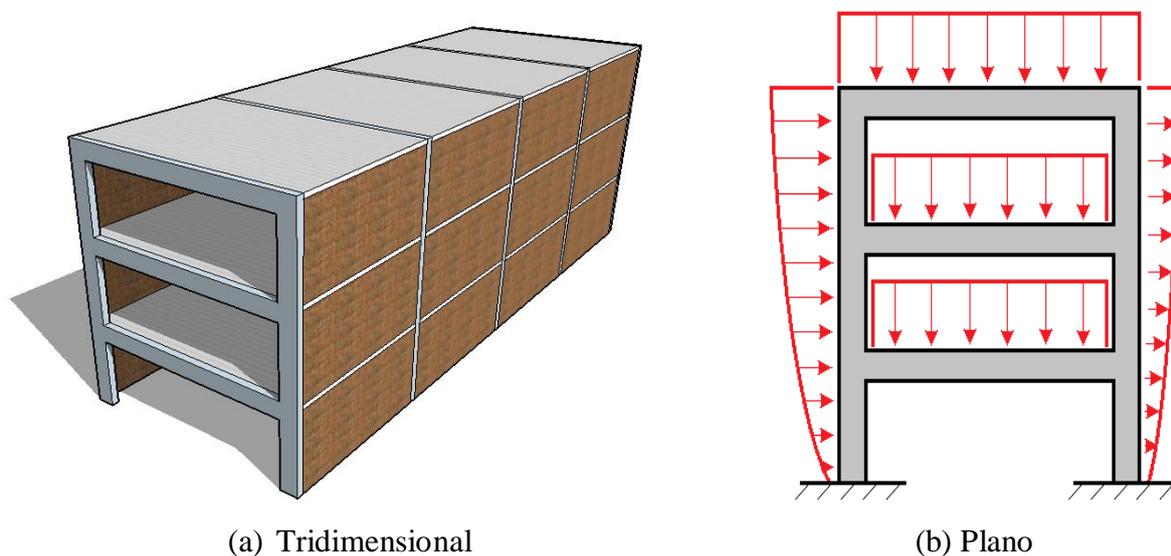


Figura 4. Modelo pórtico de 3 pavimentos estudado

O carregamento distribuído nas vigas adotado foi de 20 kN/m e a força resultante do vento foi formulada segundo a NBR 6123 (1988), possuindo forma parabólica e exercendo uma pressão no ponto mais alto do lado do barlavento de 3,04 kN/m enquanto que para o sotavento a mesma foi de 0,91 kN/m. A velocidade inicial do vento adotada foi de 35 m/s (velocidade característica da cidade de Recife - PE).

Os pilares dos pórticos dessa estrutura foram adotados com 3 metros de comprimento e seção transversal inicial com dimensões 40x20 cm. Foram consideradas vigas com 6 metros de vão e seção transversal inicial de 35x20 cm. O concreto adotado possui um f_{ck} de 20 MPa, enquanto que o aço adotado é um CA-50 com f_{yk} de 500 MPa.

Após ser realizada a análise via método dos elementos finitos através do programa ANSYS, foram obtidos os maiores esforços para a realização do dimensionamento da taxa de armadura para todas as vigas e pilares. A Figura 5 apresenta os momentos atuantes para as condições de carregamento descritas.

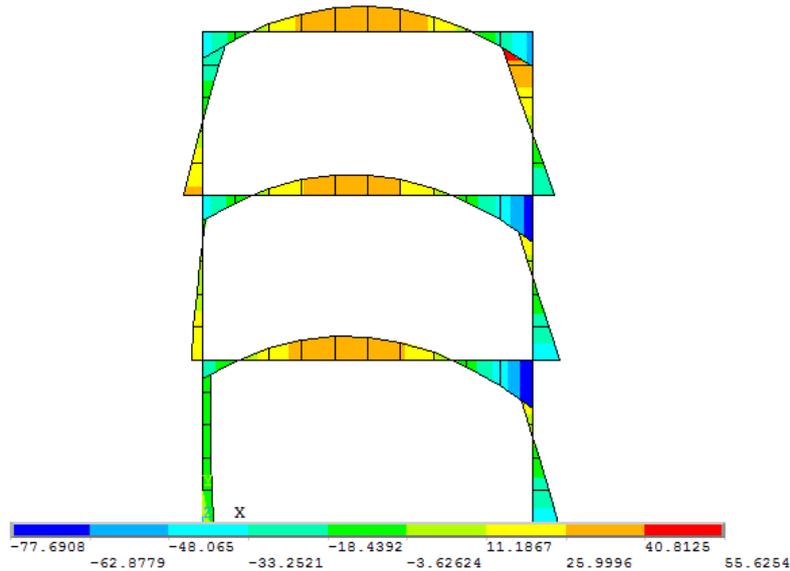


Figura 5. Momentos atuantes no pórtico estudado

As variáveis aleatórias adotadas para as vigas estão definidas na Tabela 2. Nesta tabela, estão os valores das médias, os coeficientes de variação, assim como a distribuição de probabilidade das variáveis adotadas para o estudo das vigas. Esses valores estão descritos em Paliga et al (2008) e Henrique (2006).

Tabela 2. Dados estatísticos das variáveis aleatórias para as vigas.

Vigas				
Variável Aleatória	Unidade	Distribuição	Média	Coefficiente de Variação
h_v	cm	Normal	Variável	0,01
b_v	cm	Normal	Variável	0,02
f_{cd}	MPa	Normal	14,28	0,15
f_{yd}	MPa	Normal	434,78	0,10

A Tabela 3 revela os valores das médias e coeficientes de variação para o caso das variáveis aleatórias adotadas para os pilares.

Tabela 3. Dados estatísticos das variáveis aleatórias para os pilares

Pilares				
Variável Aleatória	Unidade	Distribuição	Média	Coeficiente de Variação
h_p	cm	Normal	Variável	0,01
b_p	cm	Normal	Variável	0,02
σ_{cd}	MPa	Normal	14,28	0,15

Realizando um estudo na busca de um índice de confiabilidade alvo, foi variada a altura da seção transversal das vigas do pórtico. A Figura 6 mostra a variação do índice de confiabilidade com o aumento da altura da seção transversal das vigas. É perceptível que a altura ideal neste caso seria de aproximadamente 39 centímetros. O índice encontrado foi o mais elevado possível. É perceptível que as vigas atendem ao critério do índice de confiabilidade alvo de 3,1 (custo alto relativo a medida de segurança para uma consequência de falha mínima), com pode ser visto na Tabela 1. No entanto, o índice combinado da estrutura não atinge essa marca, ficando com um valor de 2,85.

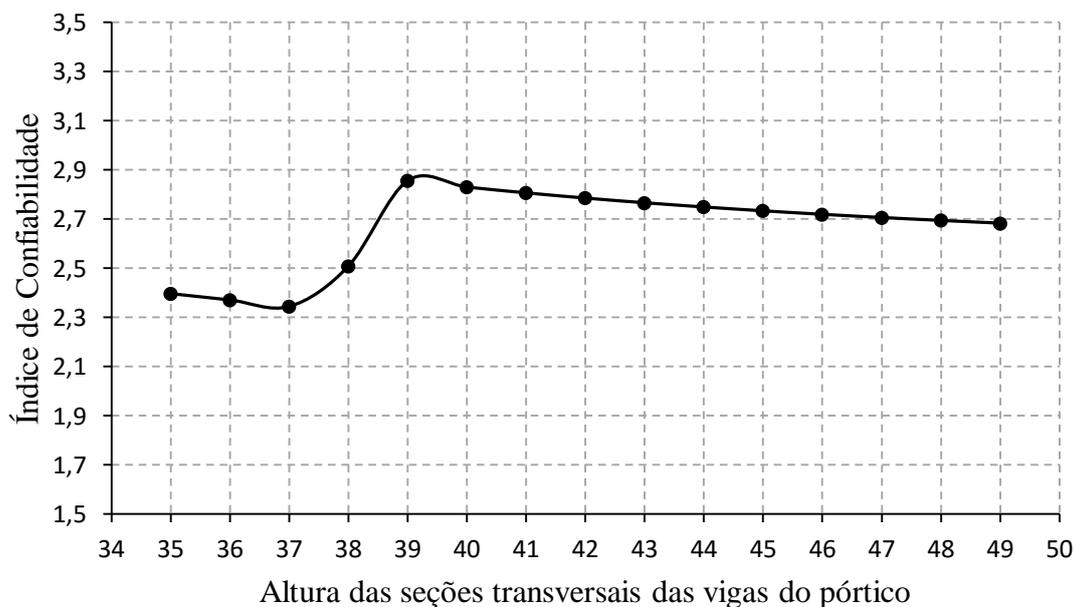


Figura 6. Relação da altura das vigas com o índice de confiabilidade

Para a referida altura nas vigas (39 cm), na Tabela 4 pode-se observar os índices de confiabilidade de todas as vigas e pilares da estrutura (pórtico) assim como o índice de toda estrutura, calculado partir da Equação 10.

Tabela 4 - Índices de confiabilidade de todas as vigas e pilares do pórtico

Elemento	Pavimento	β
Viga	1	3,25
	2	3,22
	3	3,11
Pilar Esquerdo	1	16,53
	2	10,46
	3	13,85
Pilar Direito	1	5,39
	2	8,64
	3	13,25
β (para toda estrutura)		2,85

Realizando-se uma análise de sensibilidade para o caso em questão, ficou perceptível que as variáveis da tensão resistente de cálculo do aço e a tensão resistente de cálculo do concreto possuem mais importância na análise que a base das vigas por exemplo, que poderiam ser, inclusive, tratadas como variáveis determinísticas.

Tabela 5 - Fatores de importância para as variáveis das vigas dos pavimentos

Pavimento	Variável	Fator de Importância
1	h_v	0,0099
	b_v	0,0005
	f_{cd}	0,0369
	f_{yd}	0,9526
2	h_v	0,0096
	b_v	0,0004

	f_{cd}	0,0305
	f_{yd}	0,9594
3	h_v	0,0084
	b_v	0,0002
	f_{cd}	0,0123
	f_{yd}	0,9791

Fixando-se a altura de 39 centímetros para a viga, foi realizado um estudo paramétrico variando-se crescentemente o carregamento aplicado nas vigas. Conforme esperado, o índice de confiabilidade reduziu com o aumento da carga. Os resultados dessa análise podem ser vistos na Figura 7.

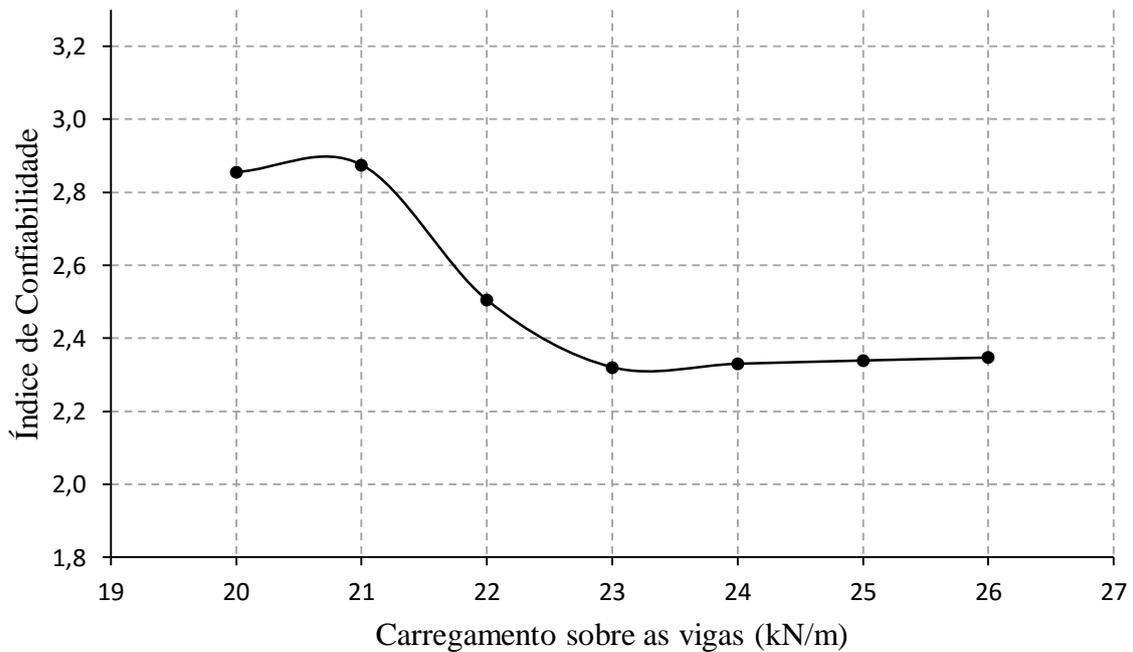


Figura 7. Relação do índice de confiabilidade com o aumento do carregamento aplicado nas vigas

4 CONCLUSÕES

Com a teoria da confiabilidade pode-se realizar uma avaliação da segurança das estruturas de concreto armado. Neste trabalho, ficou notório que as variações dos dados iniciais do dimensionamento possuem grande influência na confiabilidade da estrutura.

Outra consideração relevante foi a análise da importância das variáveis utilizadas, observou-se que a tensão resistente de cálculo do aço (vigas) e do concreto (pilares) possuem maior influência no índice de confiabilidade. Portanto, um erro como um traço mal executado

que altere o valor da resistência característica do concreto pode aumentar a probabilidade de falha. Já as bases das vigas possuíram uma baixa medida de sensibilidade, ou seja, sua variação praticamente é imperceptível para o sistema, podendo ser estudada como variável determinística.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a FACEPE pelo tanto pelo apoio institucional com financeiro no tocante à viabilidade deste projeto (BIC-2253-3.01/15) assim como aos revisores do texto para que este artigo recebesse melhorias.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. Ansys Release 14.5 Documentation: Operations Guide (Chapter 3) and Structural Guide (Chapter 8).
- ANDRADE, A. F.; OLIVEIRA, A. H.; AFONSO, A. M. B., *Análise de confiabilidade de pórticos planos via método analítico FORM, considerando a não linearidade geométrica*, In: Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Buenos Aires, Argentina, págs. 8869-8880, Novembro 2010.
- ARAÚJO, J. M., *Curso de concreto armado*. 2ª edição. Rio Grande: Dunas, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 256p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123*: Força devido ao vento em edificações – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66p.
- BASTOS P. S. S., *Fundamentos do concreto armado*, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, UNESP, São Paulo, 2006.
- BECK, A. T., *Curso de Confiabilidade Estrutural*, Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 2010.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. *Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado – Segundo NBR 6118:2014*. 4ª edição. São Carlos: EdUFSCar, 2014.
- JCSS (Joint Committee on Structural Safety), 2001, “Probabilistic Model Code – Part I”, Internet Publication, <http://www.jcss.ethz.ch/>.
- MATLAB R2008b, 2007, The Language of Technical Computing.
- NOGUEIRA, H. A. T., 2006. *Avaliação da confiabilidade de pilares curtos em concreto armado projetados segundo a NBR 6118:2003*. Tese de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- PALIGA, C. M.; REAL, M. V.; FILHO, A. C., *Estudo da confiabilidade de vigas de concreto armado deterioradas pela agressividade do ambiente marinho*, Universidade Federal do Rio Grande, 2008.
- SAGRILO, L. V. S.; LIMA, E. C. P., 2002, *Apostila curso confiabilidade estrutural*, Programa de Engenharia Civil, COOPE-UFRJ, Rio de Janeiro.
- SANTOS, D. M.; STUCCHI, F. R.; BECK, A. T., *Confiabilidade de vigas projetadas de acordo com as normas brasileiras*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Vol. 7, Número 5. págs. 723-746. Outubro 2014.

- TORRES, J. V. S.; AFONSO, S. M. B.; FONTE, A. O. C., *Estudo comparativo do uso das normas americana e brasileira no dimensionamento e otimização de pórticos de concreto armado*, Recife, p.1-16, 2002.
- TORRES, J. V. S., 2009. *Uma metodologia para verificação da segurança e dimensionamento ótimo de dutos com defeitos causados por corrosão*, Tese de doutorado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.