

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto.

AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DE UM PILAR MISTO PARCIALMENTE REVESTIDO VIA MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO COM CONTROLE DE CARGA*

Caline Souto Moraes¹

João da Costa Pantoja²

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a segurança de um pilar misto parcialmente revestido submetido à flexo-compressão através da análise de confiabilidade. As verificações do pilar misto consideraram a ABNT 8800:2008 como base na montagem das funções de falha do modelo. As variáveis aleatórias do problema e suas respectivas distribuições foram definidas para cada diferente modo de falha do pilar. A análise de confiabilidade estrutural foi realizada por meio do Método de simulação de Monte Carlo. Após a obtenção dos resultados da simulação, foi executada uma análise de sensibilidade em vários parâmetros de projeto que interferem diretamente no aspecto segurança da estrutura. Verificou-se que os resultados obtidos tanto para o processo de simulação como para a análise de sensibilidade se complementam em uma avaliação da segurança do modelo probabilístico.

Palavras-chave: Pilar misto; Modos de falha; Confiabilidade estrutural; Monte Carlo.

SECURITY ASSESSMENT OF A COMPOSITE COLUMN PARTIALLY ENCASED THROUGH SIMULATION METHOD OF MONTE CARLO WITH LOAD CONTROL

Abstract

This work aims to assess the security of a composite column partially encased by concrete under bending and compression through reliability analysis. The composite column verification considered the Brazilian Code ABNT NBR 8800:2008 as the base in the assembly of the collapse functions of the model. The random variables of the problem and their respective distributions were defined to each different failure mode of the column. The structural reliability analysis was performed through simulation method of Monte Carlo. After achievement of simulation results, a sensibility analysis was performed in many parameters of design which directly interfere in the security aspect of the structure. It was verified that the results achieved both for the simulation process as for sensibility analysis complement each other in an assessment of probabilistic security model.

Keywords: Composite columns; Failure modes; Structural reliability; Monte Carlo.

¹ Engenharia Civil, Bacharel, Aluna, Faculdade De Tecnologia E Ciências Sociais Aplicadas – FATECS, Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

² Engenharia Civil, DSc, Professor, Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais

O avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de inúmeras técnicas que promovem diversos tipos de economia, seja de tempo ou de material. A utilização de estruturas mistas se enquadra nessa categoria, pois, ao se combinar um perfil metálico com o concreto armado, proporcionando o melhor de cada elemento, resultou em obras mais rápidas e limpas.

Ainda na linha de desenvolvimento de novas tecnologias para promover uma maior economia, novos métodos de dimensionamento estão sendo pesquisados. O método de cálculo de elementos estruturais usado nos dias de hoje, semi-probabilístico, é ainda bastante conservador. Como não há como prever o comportamento da estrutura durante sua vida útil, o dimensionamento é realizado a favor da segurança.

Esse método vem sendo introduzido principalmente pelo JCSS (2001) – Joint Committee on Structural Safety [5], comissão de segurança estrutural suíça, e está sendo estudada por diferentes normas e códigos para que as estruturas e seus elementos sejam dimensionados, executados e conservados de forma que se mantenham adequados durante toda sua vida útil e da forma mais econômica possível.

1.2 Objetivos

Este estudo tem como objetivo analisar a segurança de um pilar misto parcialmente revestido de concreto armado utilizando a teoria da confiabilidade, por meio do Método de Simulação de Monte Carlo e com base na ABNT NBR 8800:2008.

A análise foi realizada a partir da execução de programas computacionais (no caso, MathCAD) e buscou determinar a probabilidade de falha do elemento estrutural ao se considerar as funções de falha da estrutura e a combinação de suas variáveis aleatórias na forma de suas respectivas distribuições.

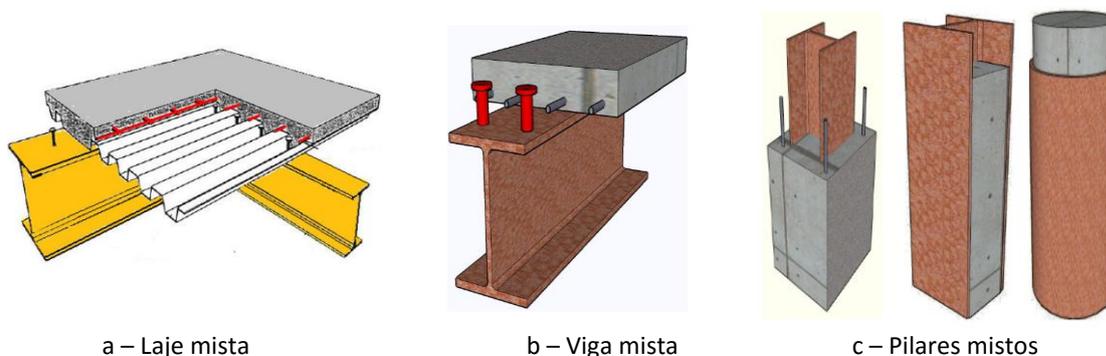
Além disso, para avaliar a segurança do pilar misto, uma análise de sensibilidade foi realizada ao se variar tais variáveis aleatórias e ao se comparar seus índices de confiabilidade.

2. ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

O sistema estrutural misto de aço e concreto é caracterizado pela união de um perfil metálico com concreto, em regra armado, que trabalham juntos como uma só peça estrutural e busca atrelar as vantagens construtivas e estruturais que cada material possui, conciliando a rigidez do concreto e o baixo peso do aço. A Figura 1 representa os tipos de estruturas mistas: laje, viga e pilar.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Figura 1 – Estruturas mistas



Fonte: De Nardin et al. (2012) [2].

Conforme Griffis (1994) [4], os primeiros registros de utilização de elementos mistos foram vigas mistas totalmente revestidas em concreto no Edifício Methodist em Pittsburgh e na ponte Rock Rapids em Iowa, nos Estados Unidos da América, e datam de 1894.

O desenvolvimento de conectores de cisalhamento teve uma contribuição significativa no progresso das estruturas mistas ao aumentar a aderência dos dois materiais, melhorando o desempenho da peça estrutural.

Além da redução do peso próprio e, conseqüentemente, das cargas nas fundações, o uso de estruturas mistas promove racionalização de material, redução e até mesmo dispensa de formas e escoramentos, gerando obras mais rápidas e limpas. A esbeltez do aço permite uma maior flexibilidade e liberdade arquitetônica, pois mesmo revestidos com concreto, possuem seções de menores dimensões. O concreto, por sua vez, ademais de sua capacidade resistente ao incêndio e à corrosão, contribui para a estabilidade da edificação, pelo enrijecimento da seção transversal.

3. PILAR MISTO

O pilar misto é um elemento estrutural composto por concreto simples ou armado que preenche ou reveste um perfil de aço. Essa combinação é estabelecida por meio da adesão, do atrito e da ligação mecânica desses componentes. Sua concepção tem como objetivo maximizar a eficiência de cada material utilizado, preferencialmente com o concreto sendo solicitado à compressão e o aço, à tração.

De acordo com Fukumoto (1997) [3], o colapso do pilar misto pode ocorrer pela falha na interação entre o perfil de aço e o concreto. A aderência deve ser garantida para seu bom funcionamento, na utilização de atrito, de conectores de cisalhamento e do próprio contato entre os materiais.

Para Vallenilla & BJORHORDE (1990) [10], durante a execução da estrutura, o espaçamento entre as atividades de montagem da estrutura de aço e de lançamento do concreto não pode ser grande para não afetar a estabilidade da estrutura e nem pequena, pois pode causar a perda da eficiência do andamento da obra.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

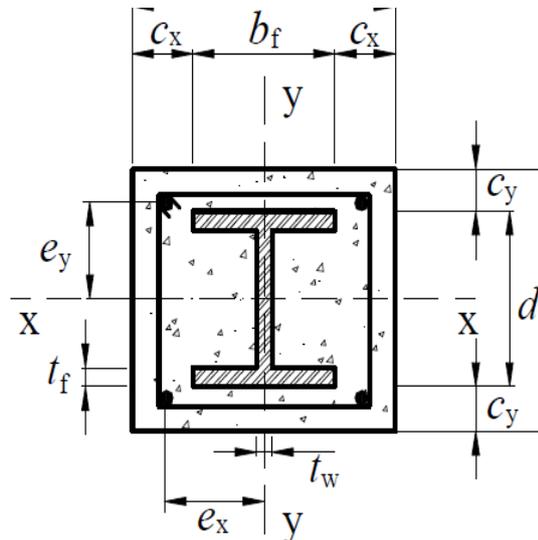
3.1 Classificação dos pilares mistos

3.1.1 Pilar misto revestido

Neste tipo de pilar, o perfil metálico, tipo “I” ou “H”, é completamente revestido com concreto e é indicado que seja utilizado concreto armado para se evitar a fragmentação do revestimento de concreto e para suprimir sua expansão lateral.

Por ser completamente envolto por concreto, possui excelente capacidade resistente ao fogo e à corrosão, não sendo necessária a pintura do perfil ou acabamento. Devido a isso, necessita de uma pequena porcentagem de armadura. A Figura 2 abaixo mostra a seção transversal de um pilar misto totalmente revestido.

Figura 2 – Seção transversal do pilar misto totalmente revestido.



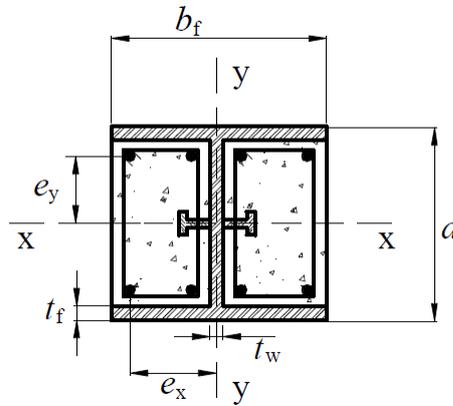
Fonte: ABNT NBR 8800:2008 [1].

3.1.2 Pilar misto parcialmente revestido

O pilar parcialmente revestido é caracterizado pelo preenchimento, com concreto, nos perfis “I” e “H”, da área entre as mesas do perfil metálico.

É necessário que se utilize conectores de cisalhamento em todo o comprimento do pilar por conta da exposição do elemento de aço. Após a concretagem, não há ganho de seção transversal, representada pela Figura 3, o que possibilita maior liberdade arquitetônica com uma capacidade resistente e rigidez maiores que os de um pilar metálico.

Figura 3 – Seção transversal do pilar misto parcialmente revestido.



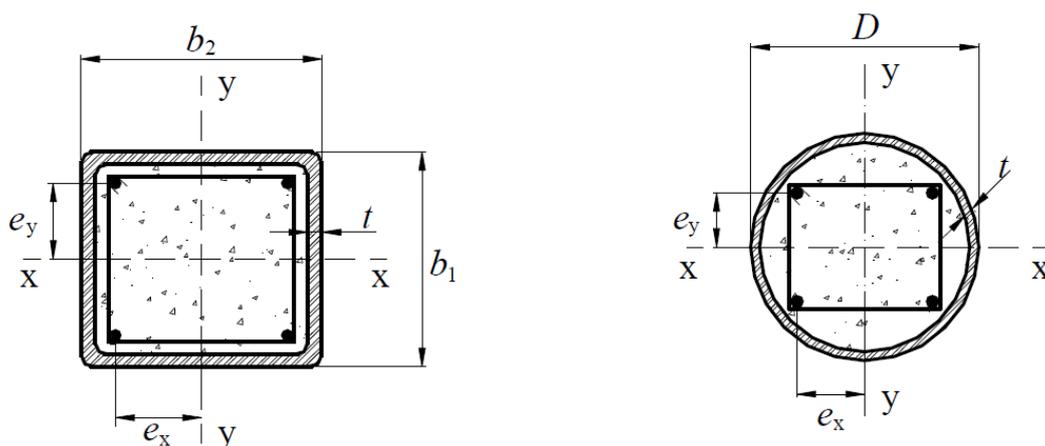
Fonte: ABNT NBR 8800:2008 [1].

3.1.3 Pilar misto preenchido

O pilar misto preenchido é caracterizado pelo preenchimento com concreto dos perfis tubulares, em geral circulares e retangulares, e dispensam a armadura e a forma, sendo essa uma grande vantagem desse tipo de pilar.

A rugosidade da parede do perfil e as imperfeições da seção transversal (Figura 4), segundo VIRDI & DOWLING apud SHAKIR-KHALIL (1988) [9], melhoram ainda mais a aderência em perfis tubulares. Porém, quando é necessário, o posicionamento dos conectores de cisalhamento é dificultado.

Figura 4 – Seção transversal do pilar misto preenchido.



Fonte: ABNT NBR 8800:2008 [1].

4. DIMENSIONAMENTO

Para que o pilar tenha requisito de ser calculado como o anexo “P” da norma, ele deve possuir uma contribuição de aço, calculada pela Equação 1, cujo valor esteja entre 0,2 e 0,9. Caso seja menor que 0,2, deve ser calculado segundo a ABNT NBR 6118:2014, como pilar de concreto armado; se o resultado for maior que 0,9, deve ser calculado segundo recomendações da ABNT NBR 8800:2008, como de pilar de aço:

$$\delta = \frac{A_c \times f_{yd}}{N_{pIRd}} \quad (1)$$

sendo:

A_c : área da seção transversal de concreto;

f_{yd} : capacidade resistente de projeto ao escoamento do aço;

N_{pIRd} : força axial de compressão resistente nominal à plastificação total.

Para um pilar misto, a carga resistente N_{Rd} é dada por:

$$N_{Rd} = N_{Rdpl} \cdot \chi \quad (2)$$

onde:

N_{Rdpl} : força axial de compressão resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total;

χ : fator de redução em relação à esbeltez.

A carga solicitante, N_{Sd} , é definida por:

$$N_{Sd} = N_g + N_q \quad (3)$$

onde:

N_g : carga permanente;

N_q : carga acidental.

Para a verificação quanto a flexo-compressão, é calculado o Modelo 1, modelo de cálculo mais simplificado para determinação dos pontos da curva de interação.

Para a relação $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$, o *Modelo₁* é dado por:

$$Modelo_1 = \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sdx}}{M_{Rdplx}} + \frac{M_{Sdy}}{M_{Rdply}} \right) \quad (4)$$

e para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$, o *Modelo₁* é dado por:

$$Modelo_1 = \frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sdx}}{M_{Rdplx}} + \frac{M_{Sdy}}{M_{Rdply}} \right) \quad (5)$$

onde:

N_{Rd} : carga resistente de compressão simples;

N_{Sd} : carga solicitante de compressão simples;

M_{Sdx} : momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo x da seção mista;

M_{Rdplx} : momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x da seção mista;

M_{Sdy} : momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo y da seção mista;

M_{Rdply} : momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo y da seção mista.

5. CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

5.1 Segurança estrutural

A segurança estrutural está associada à predisposição da estrutura em resistir aos esforços solicitantes sem romper (ELU) e sem perder a funcionalidade para qual foi projetada (ELS). Ao se categorizar os modos de falha inerentes ao projeto estrutural em variáveis aleatórias, pode-se relacionar a segurança estrutural com a confiabilidade determinando a probabilidade de falha dessa estrutura.

Nesse trabalho, o método de simulação de Monte Carlo será usado para calcular a probabilidade de falha de um pilar misto parcialmente revestido.

5.2 Análise de confiabilidade

A confiabilidade estrutural tem como grande vantagem o fato de determinar a probabilidade de um modo de falha de uma estrutura ocorrer sem considerar a utilização de coeficientes de segurança.

De acordo com Neves (2004) [7], confiabilidade pode ser caracterizada como a probabilidade de um elemento estrutural se comportar da forma que foi projetado durante sua vida útil considerando a possibilidade dele alcançar o estado limite último ou o estado limite de serviço. A confiabilidade pode ser definida, em formas estatísticas, pelo complemento da probabilidade de falha, sendo:

$$C = 1 - pf \quad (6)$$

onde:

C: confiabilidade;

pf: probabilidade de ocorrer um modo de falha.

Para obras civis, são utilizados os valores na ordem de 10^{-3} a 10^{-6} para a probabilidade de falha e esse valor é considerado como parâmetro de confiabilidade de uma estrutura.

Após a determinação dos modos de falha, devemos identificar as variáveis pertinentes ao problema, que caracterizam as incertezas da estrutura. As variáveis que se caracterizarem por processos aleatórios são compiladas em um vetor que contém as variáveis de projeto: $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ (VERZENHASSI, 2008 [11]).

A equação de estado limite $G(\cdot)$, descrita abaixo, é função das variáveis de projeto X para cada estado limite considerado:

$$G(X) = G(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0 \quad (7)$$

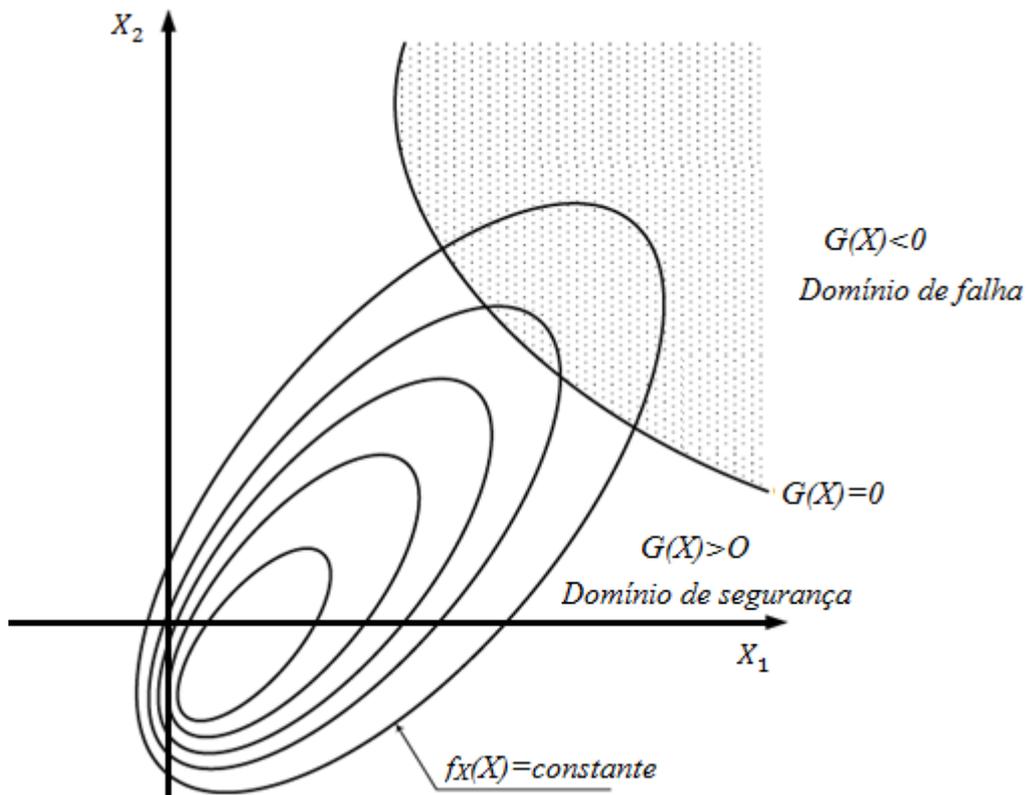
tendo $G(X) \leq 0$ como falha na estrutura.

Essa função de falha é utilizada para determinar a probabilidade de suceder um evento de falha na estrutura:

$$pf = P(G(X) < 0) \quad (8)$$

A Figura 5 abaixo representa a definição do domínio de falha para as variáveis X_1 e X_2 .

Figura 5 – Definição do domínio de falha



Fonte: Adaptado de Melchers (2002) [6].

Segundo Melchers (2002) [6], a avaliação da probabilidade de falha ao se comparar um carregamento S com uma capacidade resistente R é denominado caso fundamental ou problema básico da confiabilidade e é dada por:

$$pf = P[\{R \leq S\}] = P[\{R - S\} \leq 0] \quad (9)$$

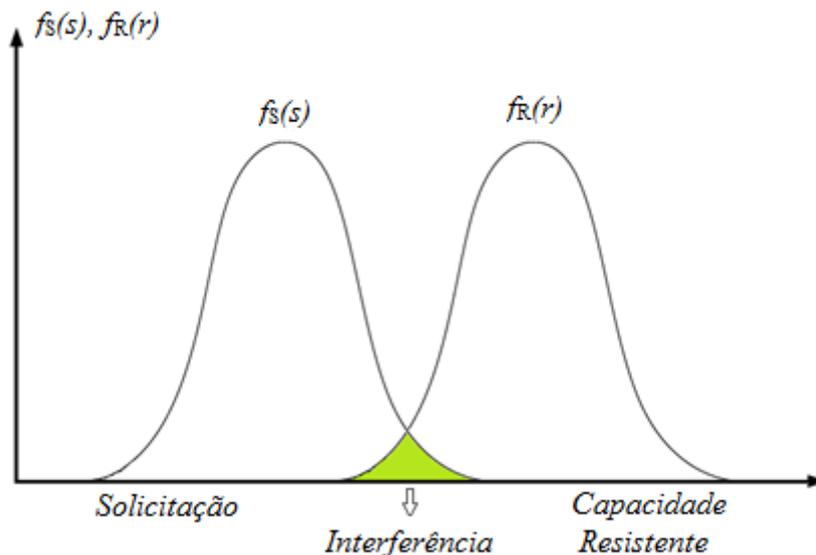
A probabilidade de falha pode ser definida como o somatório de todos os pontos de probabilidade inseridos no domínio de falha, ou seja, pode ser representada pela integral da função de probabilidade:

$$pf = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^S f_{RS}(r,s) dr ds \quad (10)$$

onde $f_{RS}(r,s)$ é a função de densidade de probabilidade de R e S .

Verzenhassi (2008) [11] menciona que a área de interferência entre as distribuições R e S é simétrico, porém não é igual, à probabilidade de falha, apresentada na Figura 6. Essa probabilidade pode ter seu valor reduzido pela melhora no controle de fabricação dos materiais, no processo construtivo e por outros meios que diminuam as incertezas relacionadas ao problema e podem ser relacionados ao desvio padrão da capacidade resistente.

Figura 6 – Problema fundamental da confiabilidade



Fonte: Adaptado de Melchers (2002) [6].

Constatando que o índice de confiabilidade β é a distância entre o valor médio da variável aleatória G (estado limite) e o ponto limite do estado de falha ($G = 0$) medido em unidades de desvio padrão, β pode ser representada por:

$$\mu_G - \beta \sigma_G = 0 \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad (12)$$

A partir de uma função de distribuição acumulada da variável normal padrão $\Phi(\cdot)$, de média nula e desvio padrão unitário, obtém-se a probabilidade de falha para cada modo de falha (VERZENHASSI, 2008 [11]):

$$pf = \Phi(-\beta) \quad (13)$$

Conforme Sagrilo (2003) [8], no espaço normal padrão das variáveis aleatórias reduzidas não correlacionadas, o índice de confiabilidade β pode ser definido geometricamente como a distância do ponto de projeto (ou o ponto mais suscetível de falha) até a origem.

Valores alvo do índice de confiabilidade para estados limites últimos foram propostos pelo JCSS (2001) e são reproduzidos na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Valores alvo para o índice de confiabilidade β e probabilidades de falha associadas, relacionados a estados limites últimos.

Medida relativa do custo de segurança	Consequências leves de falha	Consequências moderadas de falha	Consequências graves de falha
Grande (A)	$\beta = 3,1$ (pf $\approx 10^{-3}$)	$\beta = 3,3$ (pf $\approx 10^{-4}$)	$\beta = 3,7$ (pf $\approx 10^{-4}$)
Normal (B)	$\beta = 3,7$ (pf $\approx 10^{-4}$)	$\beta = 4,2$ (pf $\approx 10^{-5}$)	$\beta = 4,4$ (pf $\approx 10^{-6}$)
Pequeno (C)	$\beta = 4,2$ (pf $\approx 10^{-5}$)	$\beta = 4,4$ (pf $\approx 10^{-6}$)	$\beta = 4,7$ (pf $\approx 10^{-6}$)

Fonte: JCSS (2001) [5].

5.3 Método de simulação de Monte Carlo

O método de simulação de Monte Carlo é bastante utilizado por ser apropriado para problemas que envolvem variáveis aleatórias com distribuição de frequência já bem definidas. Consiste na execução de inúmeras repetições randômicas do processo de simulação para cada variável aleatória de entrada.

A função de falha é avaliada em cada simulação realizada, que é testada diversas vezes, fazendo uma comparação com os N conjuntos de simulações geradas e os n valores de eventos de falha atingidos. A probabilidade de falha é obtida por:

$$pf = \frac{n(G(X) < 0)}{N} \quad (14)$$

onde $n(G(X) < 0)$ indica quantas vezes a função de falha incidiu na região de falha.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Para incorrer em um resultado satisfatório, uma elevada quantidade de resultados independentes é obtida e é possível alcançar uma estimativa central (média) do valor da integral. Este método soluciona o problema da integração ao considerá-la como um valor médio.

6. METODOLOGIA APLICADA

Para avaliar a segurança do pilar misto em questão, o método de simulação de Monte Carlo foi utilizado para a obtenção da probabilidade de falha da estrutura.

O método foi implementado via software MathCAD, que realiza uma quantidade de simulações randômicas automáticas pré-definidas e combina as variáveis geradas para avaliar uma possível situação de falha do elemento estrutural.

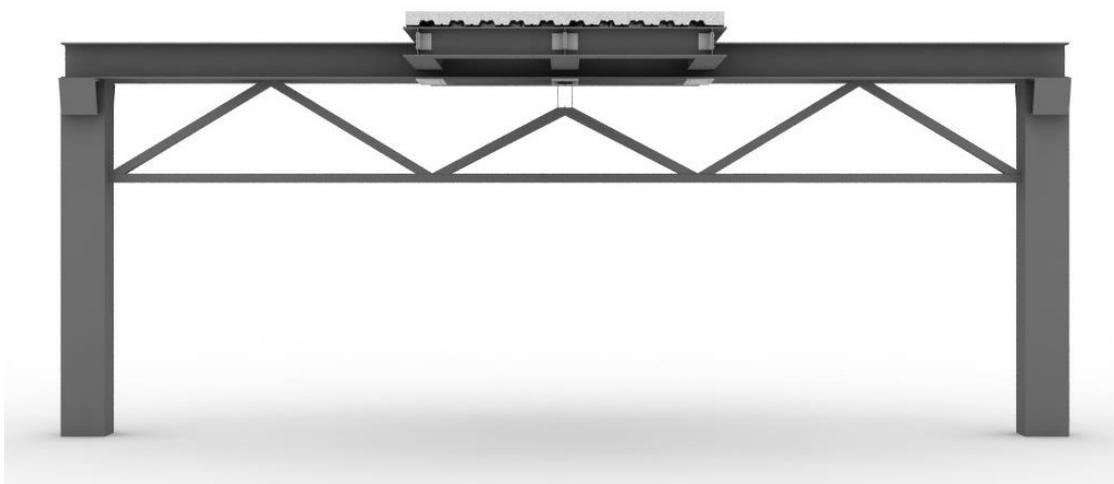
Após a obtenção da probabilidade de falha, foi realizada uma análise de sensibilidade do problema ao se variar os parâmetros aleatórios da estrutura para observar quais as características mais influenciam no comportamento do pilar.

7. EXEMPLO DE UM PILAR MISTO SUBMETIDO A FLEXO-COMPRESSÃO

7.1 Apresentação do problema

Como ilustração prática do tema proposto, foi analisado um pilar misto parcialmente revestido de concreto armado decorrente de um reforço estrutural de um pilar para a introdução de uma passarela no Boulevard Shopping Brasília como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Passarela Boulevard Shopping Brasília



Fonte: Autora.

O problema proposto trata de um pilar misto parcialmente revestido de concreto armado engastado com $L = 15$ metros de altura. Os materiais utilizados são aço ASTM A36 para o perfil metálico, aço CA-50 para as barras de aço e $f_c = 30$ MPa para o concreto. O perfil metálico é o CS 450 280 e os conectores de cisalhamento são do tipo pino com cabeça, de diâmetro de 19 mm e de altura nominal de 110 mm. As solicitações consideradas se encontram na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Solicitações

	Valor	Posição (m)
Normal Compressão (kN)	66,2	0
Momento fletor em X (kN.cm)	2,5	15
Momento fletor em Y (kN.cm)	474,0	0

Fonte: Autora

As dimensões do pilar misto são apresentadas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Dimensões do pilar misto

Dimensões	mm
b_f	500
d	500
t_f	31,5
t_w	19

Fonte: Autora

7.2 Variáveis aleatórias

A Tabela 4 apresenta as variáveis aleatórias definidas e suas respectivas distribuições consideradas:

Tabela 4 – Variáveis aleatórias

	Variável aleatória		Distribuição	μ	δ
Solicitação	Carga permanente	g_1	Normal	*	5%
	Carga variável	q_1	Gumbel	*	25%
Capacidade Resistente	Capacidade resistente do Concreto	f_c	Log-normal	30 MPa	17%
	Capacidade resistente do Aço	f_y	Log-normal	250 MPa	5%
		f_t	Log-normal	500 MPa	5%

*Variam para cada verificação

Fonte: Autora.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

7.3 Funções de falha

Para o cálculo da probabilidade de falha do pilar misto apresentado, foram realizadas 10^6 simulações randômicas para cada variação de cada parâmetro definido para a análise de segurança do elemento estrutural. Essas simulações foram feitas com base nas funções de falha apresentadas a seguir.

A função de falha G_1 é referente ao esforço axial (compressão centrada) e é dada por:

$$G_1 = N_R - N_S \quad (15)$$

onde:

N_R : carga resistente média de compressão simples;

N_S : carga solicitante média de compressão simples.

A função de falha G_2 é referente à flexo-compressão (Modelo 1) e é dada por:

$$G_2 = 1 - Modelo_1 \quad (16)$$

onde:

$Modelo_1$: modelo de cálculo mais simplificado para determinação dos pontos da curva de iteração.

Para a relação $\frac{N_S}{N_R} \geq 0,2$, o $Modelo_1$ é dado por:

$$Modelo_1 = \frac{N_S}{N_R} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sx}}{M_{Rplx}} + \frac{M_{Sy}}{M_{Rply}} \right) \quad (17)$$

e para $\frac{N_S}{N_R} < 0,2$, o $Modelo_1$ é dado por:

$$Modelo_1 = \frac{N_S}{2N_R} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sx}}{M_{Rplx}} + \frac{M_{Sy}}{M_{Rply}} \right) \quad (18)$$

onde:

M_{Sx} : momento fletor solicitante de cálculo médio em relação ao eixo x da seção mista;

M_{Rplx} : momento fletor resistente de cálculo médio em relação ao eixo x da seção mista;

M_{Sy} : momento fletor solicitante de cálculo médio em relação ao eixo y da seção mista;

M_{Rply} : momento fletor resistente de cálculo médio em relação ao eixo y da seção mista.

7.4 Variação dos parâmetros

Inicialmente, com o propósito de avaliar o programa, foi realizada uma análise de sensibilidade para o índice de probabilidade β das funções de falha com carga de compressão fixa através da variação dos parâmetros:

- 50% para carga permanente e 50% para carga acidental;
- Variação do M_x e M_y entre 10 kNcm e 20000 kNcm;
- Capacidade resistente do concreto, variando de 20 MPa a 35 MPa.

8. RESULTADOS

8.1 Análise global

Para que seja possível analisar a probabilidade de falha da estrutura via método de Monte Carlo, o índice de confiabilidade deve variar entre 0,0 e 2,0, o que limita o número de iterações. Para isso, é necessário fazer uma calibração com o aumento das cargas.

A Tabela 5 abaixo mostra a variação entre os momentos para cada simulação.

Tabela 5 – Variação de M_x e M_y

	N (kN)	M_x (kNcm)	M_y (kNcm)
S1	11000,0	10,0	10,0
S2	11000,0	20000,0	20000,0
S3	11000,0	20000,0	10,0
S4	11000,0	10,0	20000,0

Fonte: Autora.

Para averiguar o programa desenvolvido para o método, foi feita uma calibração deste para verificar a coerência entre os modos de falha. Foram realizadas simulações, variando o f_c entre 20 MPa e 35 MPa, acerca do modo de falha 1, compressão centrada, denominado CC, e do modo de falha 2, flexo-compressão, denominado MODELO1.

Essa verificação foi feita para comprovar que CC é um caso particular do MODELO1, pois ao se desconsiderar os momentos neste último, ele deve se comportar de forma semelhante ao CC, pois vai trabalhar considerando apenas a compressão centrada.

Os resultados da simulação S1 (Tabela 6 e Figura 8) provou a condição descrita e confirmou a veracidade do método desenvolvido a partir das formulações sugeridas pela ABNT NBR 8800:2008 referente a dimensionamento de pilares mistos.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 6 – S1 - Índices de confiabilidade para CC e MODELO1

f_c (MPa)	β	
	CC	MODELO1
20,0	0,62	0,62
22,5	0,91	0,91
25,0	1,11	1,11
27,5	1,27	1,27
30,0	1,43	1,43
32,5	1,60	1,60
35,0	1,67	1,67

Fonte: Autora.

Figura 8 – Gráfico Índice de confiabilidade X f_c – CC caso particular de MODELO1



Fonte: Autora.

À medida que se foi aumentado o f_c do concreto, observou-se que o índice de confiabilidade se elevou gradualmente, o que era de se esperar ao aumentar a rigidez do concreto, que aumenta assim, a rigidez da peça estrutural mista e sua capacidade resistente.

Os índices de confiabilidade β da simulação S2 (Tabela 7 e Figura 9) foram obtidos ao se considerar os momentos M_x e M_y com valores relevantes para que o MODELO1 se comportasse à flexo-compressão.

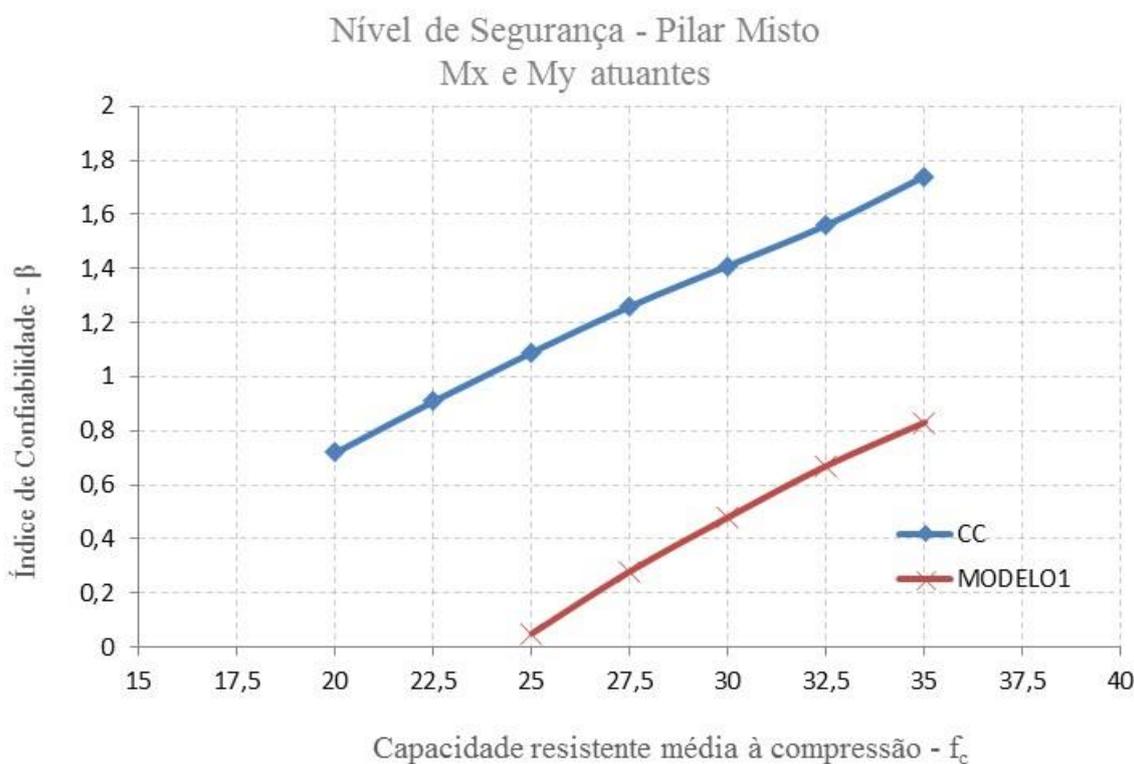
* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 7 – S2 - Índices de confiabilidade para CC e MODELO1

f_c (MPa)	β	
	CC	MODELO1
20,0	0,72	-
22,5	0,91	-
25,0	1,09	0,05
27,5	1,26	0,28
30,0	1,41	0,48
32,5	1,56	0,67
35,0	1,74	0,83

Fonte: Autora.

Figura 9 – Gráfico Índice de confiabilidade X f_c – Mx e My atuantes



Fonte: Autora.

Ao se elevar os momentos no eixo x e no eixo y, o índice de confiabilidade do MODELO1 diminuiu, pois se acrescentou maior solicitação e possíveis instabilidades no pilar, demonstrando sua sensibilidade aos momentos e aumentando, assim, a probabilidade de falha do sistema.

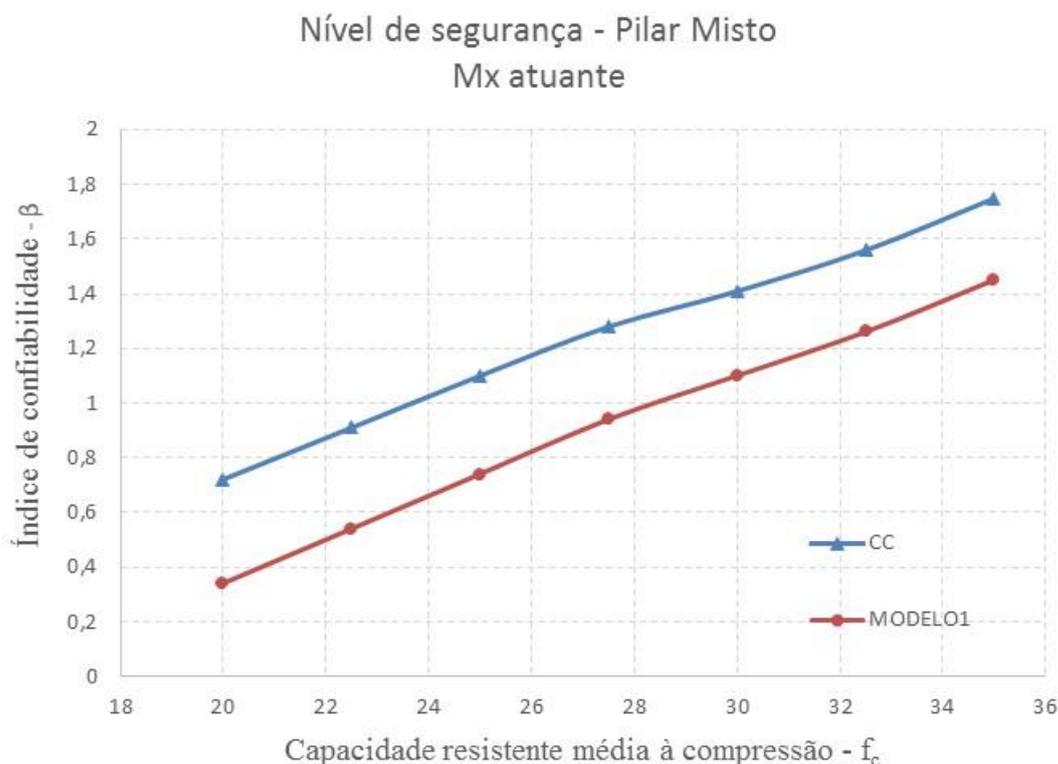
A simulação S3 (Tabela 8 e Figura 10) considerou um momento M_x alto e um momento M_y quase irrelevante para avaliar o comportamento do MODELO1 com aplicação de um esforço apenas no eixo x do elemento estrutural.

Tabela 8 – S3 - Índices de confiabilidade para CC e MODELO1

f_c (MPa)	β	
	CC	MODELO1
20,0	0,72	0,34
22,5	0,91	0,54
25,0	1,10	0,74
27,5	1,28	0,94
30,0	1,41	1,10
32,5	1,56	1,26
35,0	1,75	1,45

Fonte: Autora.

Figura 10 – Gráfico Índice de confiabilidade X f_c – M_x atuante



Fonte: Autora.

A simulação S3 promoveu resultados coerentes com o esperado: o índice de confiabilidade de CC não se alterou com a introdução do momento em x, pois não apresenta sensibilidade a momentos, e a probabilidade de falha do MODELO1, modelo de cálculo mais

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

simplificado para determinação dos pontos da curva de iteração considerado pela ABNT NBR 8800:2008, aumentou ao se considerar apenas o M_x e a carga de compressão centrada.

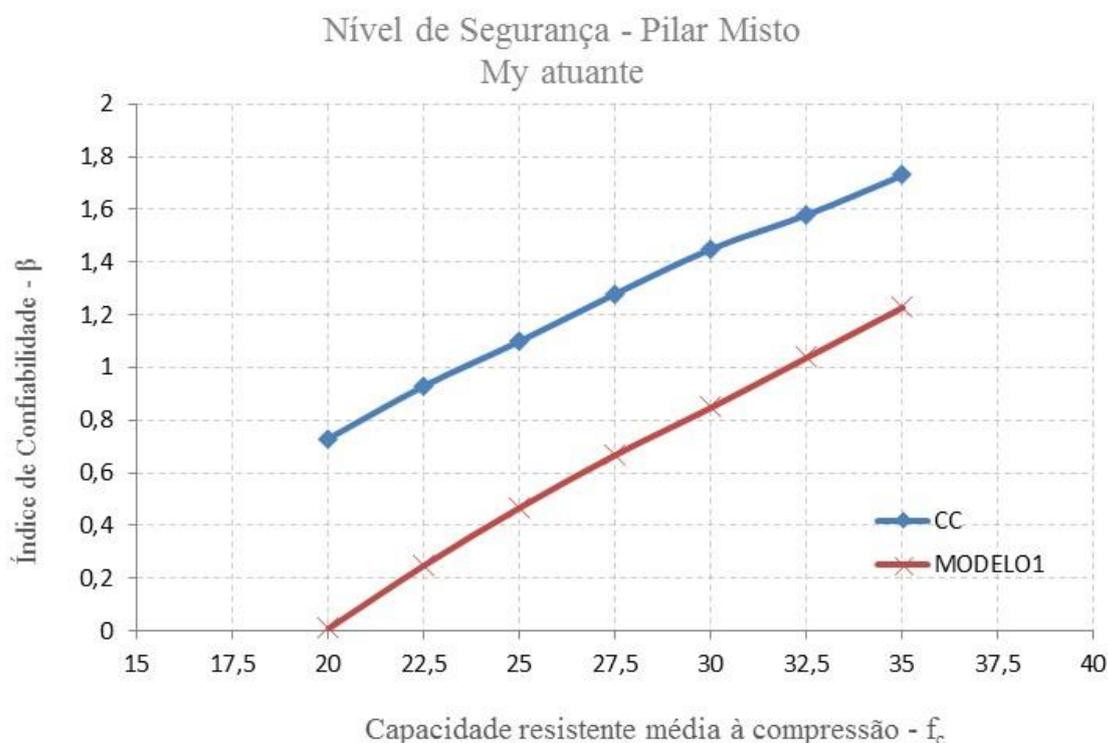
Os resultados dos índices de confiabilidade da última simulação considerada, S4 (Tabela 9 e Figura 11), foram obtidos pelo acréscimo do momento M_y e diminuição do momento no eixo x do pilar, buscando-se observar o comportamento do MODELO1 para essa solitação, visto que o modo de falha CC não apresenta sensibilidade aos momentos.

Tabela 9 – S4 - Índices de confiabilidade para CC e MODELO1

f_c (MPa)	β	
	CC	MODELO1
20,0	0,73	0,01
22,5	0,93	0,25
25,0	1,10	0,47
27,5	1,28	0,67
30,0	1,45	0,85
32,5	1,58	1,04
35,0	1,73	1,23

Fonte: Autora.

Figura 11 – Gráfico Índice de confiabilidade X f_c – M_y atuante



Fonte: Autora.

Os resultados obtidos na simulação S4 apresentaram diminuição do índice de confiabilidade do MODELO1, visto que a direção y do pilar misto possui menor inércia do que a

direção x, o que promove maior instabilidade do pilar e aumenta a probabilidade de falha do sistema. O MODELO1 apresenta maior sensibilidade ao acréscimo do momento na direção y do que na direção x, resultando em um índice de confiabilidade de praticamente metade do obtido ao se considerar o momento na direção x. Conforme o esperado, os índices de confiabilidade obtidos para CC não sofreram alteração, pois esse modo de falha só considera a carga de compressão centrada, não apresentando sensibilidade ao acréscimo de momentos.

8.2 Análise do pilar misto do Shopping Boulevard Brasília

O pilar misto do Shopping Boulevard Brasília antes de receber a passarela, já apoiava duas rampas, uma de cada lado. A sua análise levou em consideração duas situações: a primeira considerou apenas uma rampa solicitada e o peso da nova estrutura. A segunda, as duas rampas solicitadas e o peso da passarela a ser instalada.

Foram adotadas solicitações médias para a verificação. A Tabela 10 abaixo mostra as solicitações consideradas para a determinação da probabilidade de falha do pilar.

Tabela 10 – Solicitações médias para o pilar misto do Exemplo

	1ª situação	2ª situação
N (kN)	1066	2066
Mx (kNcm)	50000	2,5
My (kNcm)	474	474

Fonte: Autora.

Os índices de confiabilidade determinados para o pilar misto decorrente de um reforço estrutural do Shopping Boulevard Brasília são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Índices de confiabilidade determinados para o Exemplo

	1ª situação	2ª situação
β_1	2,85	1,89
β_2	2,04	1,88

Fonte: Autora.

9. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação de segurança de um pilar misto parcialmente revestido de concreto armado dimensionado com base na ABNT NBR 8800:2008 a partir da teoria da confiabilidade. Tal avaliação foi realizada por meio de uma análise de sensibilidade ao se variar parâmetros que podem influenciar no comportamento e na capacidade resistente do pilar misto.

A variação dos momentos nas direções do pilar misto resultou na confirmação de que o modo de falha G_1 , que considera apenas cargas de compressão centrada, é um caso particular no modo de falha G_2 , o Modelo1, que apresenta sensibilidade a cargas de compressão centrada e a momentos, pois quando o Modelo1 é solicitado com momentos

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

desprezíveis, seus índices de confiabilidade e suas probabilidades de falha são iguais aos do modo CC.

A inércia na direção x do pilar misto é maior que em sua direção y, o que promove maior rigidez e capacidade resistente nesse eixo. As simulações realizadas mostraram que o eixo y apresenta maior sensibilidade ao acréscimo de momentos e possui menores índices de confiabilidade e, conseqüentemente, maior probabilidade de falha que o eixo x.

O aumento da capacidade resistente à compressão do concreto (f_c), como esperado, aumentou a rigidez da peça estrutural o que promoveu o ganho de capacidade resistente do pilar misto. Os índices de confiabilidade dos dois modos de falha, G_1 e G_2 , aumentaram na mesma proporção do aumento do f_c .

O estudo de confiabilidade permite o dimensionamento de uma peça sem os coeficientes de segurança normalmente utilizados para cálculo com base no índice de confiabilidade da peça estrutural. Esse método busca promover um dimensionamento mais econômico e ao mesmo tempo, seguro.

Os níveis de segurança para o dimensionamento de um pilar misto podem ser calibrados com o objetivo de se normatizar os índices de segurança de cada modo de falha, assim, as probabilidades de falha serão também uniformizadas e os modos irão ser solicitados de forma uniforme. Como apresentado no exemplo, quando há solicitação desprezível do momento em y, o índice de confiabilidade é bem maior do que quando há uma solicitação considerável. Essa consideração pode resultar em um dimensionamento mais enxuto e em uma promoção de economia em todo o investimento do empreendimento.

Com isso, o dimensionamento de pilares mistos pode se tornar economicamente mais vantajoso sem deixar de levar em conta a segurança.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008). NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro.
2. DE NARDIN, S.; SOUZA, A.C.S; PEREIRA, M.F. Análise comparativa de soluções de pilares para galpões: pilares de aço, pré-moldados e mistos de aço e concreto. Congresso Latinoamericano da construção metálica. 2012.
3. FUKUMOTO, Y. Structural stability design: steel and compo-site structures. 1 ed. Grã-Bretanha: Pergamon, 1997, 417p.
4. GRIFFIS, L. G. (1994). The 1994 T.R. High Lecture: Compo-site Frame Construction. In: National Steel Construction Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, 18 – 20 may, 1994. Proceedings. New York, AISC. v.1, p.1.1-1.72.
5. JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY – JCSS (2001), The probabilistic model code. Available in <www.jcss.byg.dtu.dk>.
6. MELCHERS, R. E. Structural Reliability Analysis and Prediction, New York, John Wiley & Sons, 2002.
7. NEVES, R. A. Desenvolvimento de Modelos Mecânicos-Probabilísticos para estruturas de Pavimentos de Edifícios. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos/SP, 2004.
8. SAGRILLO, L. V. S. Apostila do Curso de Confiabilidade Estrutural, UFRJ, Rio de janeiro, Brasil, 2003.

* Contribuição científica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

9. SHAKIR-KHALIL, H. Full-scale tests on composite connections. Engineering Foundation Conference on Composite Construction; Composition Construction II. Potosi, Missouri, USA. June 1992.
10. VALLENILLA, C.; BJORHOVDE, R. (1990) Behaviour of composite frames during construction. Journal of Construc-tional Steel Research. v.15, n.1-2, p.3-21.
11. VERZENHASSI, C. C. Otimização de Risco Estrutural Baseada em Confiabilidade. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos/SP, 2008.