

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS APARECIDA DE GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**DIMENSIONAMENTO DE PILARES: ESTUDO COMPARATIVO
ENTRE AS DIRETRIZES DA NBR 6118:2014 E O MÉTODO DE
CONFIABILIDADE**

**LUCAS ALVES XAVIER
VITÓRIA CASSIMIRO MARQUES**

APARECIDA DE GOIÂNIA
2019



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Lucas Alves Xavier, Vitória Cassimiro Marques

Matrícula: 20151090040198 e 20151090040139

Título do Trabalho: Dimensionamento de pilares: estudo comparativo entre as diretrizes da NBR 6118:2014 e o método de confiabilidade

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 03/02/2020

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Aparecida de Goiânia, 03 / 02 / 2020
Local Data

Lucas Alves Xavier

Vitória Cassimiro Marques

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS APARECIDA DE GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS ALVES XAVIER
VITÓRIA CASSIMIRO MARQUES

**DIMENSIONAMENTO DE PILARES: ESTUDO
COMPARATIVO ENTRE AS DIRETRIZES DA NBR 6118:2014
E O MÉTODO DE CONFIABILIDADE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Aparecida de Goiânia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e desenvolvido na linha de pesquisa métodos numéricos aplicados à engenharia civil sob orientação da Me. Alfredo de Oliveira Assis e coorientação da Me. Silvana da Silva Rodrigues

APARECIDA DE GOIÂNIA
2019



TERMO DE APROVAÇÃO

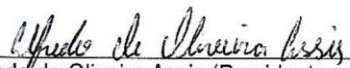
LUCAS ALVES XAVIER
VITÓRIA CASSIMIRO MARQUES

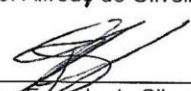
DIMENSIONAMENTO DE PILARES: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS DIRETRIZES DA NBR 6118:2014 E O MÉTODO DE CONFIABILIDADE

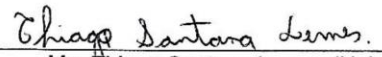
Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Aparecida de Goiânia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e desenvolvido na linha de pesquisa Métodos numéricos aplicados à engenharia sob orientação do Me. Alfredo de Oliveira Assis e coorientação da Me. Silvana da Silva Rodrigues.

Aprovado em 27 de novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA


Me. Alfredo de Oliveira Assis (Presidente - orientador)


Me. Lucas Fernando da Silva (IFG – Campus Aparecida de Goiânia)


Me. Thiago Santana Lemes (Unialfa)

DIMENSIONAMENTO DE PILARES: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS DIRETRIZES DA NBR 6118:2014 E O MÉTODO DE CONFIABILIDADE¹

Lucas Alves Xavier, Instituto Federal de Goiás - IFG
lucasywk@hotmail.com
Vitória Cassimiro Marques, Instituto Federal de Goiás - IFG
vitoriaccassimiro@hotmail.com
Alfredo de Oliveira Assis, Instituto Federal de Goiás - IFG
mat.ufg@gmail.com
Silvana da Silva Rodrigues, Instituto Federal de Goiás - IFG
Silvana_ufg@hotmail.com

RESUMO

Garantir a segurança de uma construção é um dos principais objetivos buscados no dimensionamento de estruturas, para tanto considera-se que muitos parâmetros envolvidos nos cálculos, principalmente para estruturas de concreto armado, não são constantes. Visando contornar as incertezas de projeto e evitar o colapso estrutural, os profissionais responsáveis buscam atender normas regulamentadoras que estipulam condições e diretrizes construtivas. Entretanto, para muitos autores a concepção estrutural pode tornar-se ineficiente, mediante o fato das normas técnicas considerarem um comportamento padrão para as peças, adotando apenas valores de casos críticos. Nesse contexto, a teoria de confiabilidade se torna uma boa alternativa por considerar, com o emprego de análises probabilísticas, a aleatoriedade das variáveis, possibilitando, inclusive, a otimização de elementos estruturais. Diante do fato dos pilares serem fundamentais para a estabilidade global de um sistema estrutural, buscando o desempenho ótimo destes elementos, este trabalho propôs a comparação de dois processos de dimensionamento de pilares: aplicando a teoria de confiabilidade e a metodologia da ABNT NBR 6118:2014, permitindo observar uma diminuição na seção e, conseqüente, na quantidade de materiais e no valor final do pilar otimizado em relação ao dimensionado convencionalmente, possibilitando uma economia de 19,05% no custo por metro do pilar analisado.

Palavras-chave: *Confiabilidade. Pilar. Análises probabilísticas.*

1. INTRODUÇÃO

Casos de queda de construções que entram em estado de ruína como o do edifício Wilton Paes ocorrido em 2018 (MURARO, 2018) e os edifícios da Muzema em 2019 (SABÓIA et al., 2019), localizados no centro da cidade de São Paulo e na Zona Oeste do Rio de Janeiro, respectivamente, retratam a ineficiência de projetos de engenharia que culminam em situações de falha estrutural.

Os projetos estruturais, conforme Alves (2014), precisam ser desenvolvidos para minimizar

¹ XAVIER, L. A.; MARQUES, V. C.; ASSIS, A.O.; RODRIGUES, S.S. **Dimensionamento de pilares: estudo comparativo entre as diretrizes da NBR 6118:2014 e o método de confiabilidade.** Aparecida de Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019.

os custos e atender a requisitos básicos de segurança, durabilidade e sustentabilidade, evitando assim ocorridos como aqueles apresentados inicialmente.

Contudo, os dimensionamentos estruturais não são isentos de riscos de falha uma vez que são envoltos por diversas incertezas associadas à variabilidade de alguns parâmetros utilizados nos cálculos, tais como: as propriedades dos materiais, a geometria das peças e os carregamentos atuantes na estrutura (ROCHA; REAL; MOURA, 2015).

Visando contornar a probabilidade de falha dos sistemas estruturais boa parte dos profissionais adotam premissas advindas de normas regulamentadoras que, baseadas no método dos estados limites, direcionam, por meio de coeficientes, as aproximações feitas no estudo para uma margem aceitável de erro, ou seja, valores que não impliquem negativamente na segurança da construção. Em contrapartida, Verzenhassi (2008) afirma que esse é um procedimento conservador à medida que estabelece uma avaliação semelhante para todos os tipos de estruturas, podendo acarretar em coeficientes de segurança inadequados e em construções pesadas e de custo elevado.

Outra alternativa para trabalhar com as incertezas dos parâmetros intrínsecos aos cálculos estruturais, apresentada por Sakamoto (2016), refere-se a aplicações numéricas baseadas no método de análise de confiabilidade, procedimento este que, conforme o estudo realizado por Kroetz (2019), ao tratar as variáveis de dimensionamento como aleatórias possibilita a calibração de coeficientes de segurança normativos para que sejam atendidas as especificidades de cada projeto.

A teoria da confiabilidade, iniciada pelos alemães Max Mayer e Carl Forssell em 1926 para avaliar fatores de segurança e reduzir custos estruturais, respectivamente (ELISHAKOFF (2004); FRANGOPOL (1995)), pode ser entendida como uma medida probabilística que relaciona e quantifica as variáveis de um sistema estrutural dentro de um período determinado, minimizando variações, para avaliar a probabilidade de a construção corresponder aos critérios de projeto (BECK, 2019). Para tanto, de acordo com Krüger (2008), é preciso garantir que as forças resistentes sejam superiores as solicitantes em qualquer etapa da vida útil do sistema para não levar a nenhum desempenho inadequado da estrutura, ou seja, conforme a ABNT NBR 6118:2014, assegurar que o estado limite último (ELU), referente ao colapso estrutural, e os estados limites de serviço (ELSs), ligados a situações de desempenho de conforto, durabilidade e aparência da estrutura, não sejam violados.

Algumas organizações internacionais já demonstram preocupação quanto à necessidade da inclusão da teoria da confiabilidade para a calibração de coeficientes de cálculo estrutural, como o caso da ISO 2394:2015 que apresenta recomendações sobre valores de índices de confiabilidade objetivo, a SEI-ASCE 7 com determinações que variam conforme as combinações e o período de projeto, a EN 1990:2002 apresentando três classes de confiabilidade para uma vida útil que pode variar até 50 anos e o JCSS (*Joint Committee on Structural Safety* - Comitê de Segurança Estrutural) que define confiabilidades objetivo conforme o custo da segurança e as consequências de falha (VIEIRA, 2017; ERASO, 2011).

Os estudos de confiabilidade para estruturas de concreto armado enfrentaram muitas barreiras, devido à dificuldade inerentes da composição heterogênea e anisotrópica do concreto (CHAVES, 2004). Gomes (2001) reforça a necessidade de aprimorar as metodologias existentes para análise de sistemas complexos, tal como o sugerido neste estudo, de modo que passem a contemplar a não-linearidade do comportamento e das características dos materiais.

No dimensionamento e construção de estruturas em concreto armado, Nogueira (2006) enfatiza que os pilares devem ser tratados com maior cautela, principalmente por contribuírem de forma significativa para a estabilidade global da construção. Frente a isso, considerando a grande quantidade de incertezas envolvidas no processo de concepção dliesse componente, é sugerido o emprego de métodos de confiabilidade para a análise de segurança dessas peças (VIEIRA, 2017).

Muitas pesquisas que envolvem a confiabilidade de pilares de concreto armado remetem a otimização dos elementos, como por exemplo, os trabalhos desenvolvidos por Sias e Alves (2015) e Chaves (2004) que visaram à diminuição dos custos da construção através do tratamento, prioritário, das dimensões da seção transversal das peças e da área de armadura longitudinal. Dos estudos apresentados, o primeiro, com a utilização de exemplos conhecidos na literatura, comprovou através de sua função objetivo a eficácia da teoria da confiabilidade através da obtenção de uma redução de até 26% da área e 65% do preço por metro de seção transversal de um pilar.

Os métodos de otimização das estruturas por meio dos princípios de confiabilidade vêm ganhando espaço no processo de dimensionamento e análise das mesmas, fato este que influenciou o desenvolvimento de muitas técnicas de estimativa visando facilitar o processo, dentre elas são recorrentes: o método de confiabilidade de primeira ordem (First Order Reliability Method - FORM), o método de confiabilidade de segunda ordem (Second Order Reliability Method - SORM) e técnicas de simulação (BARBOSA, 2004).

Eraso (2011) apresenta o FORM como uma das opções mais adotadas para análises de confiabilidade devido a sua eficiência e, ainda conforme o mesmo autor, de acordo com Yang et al (2006) apud Eraso (2011), esse é também o método recomendado pelo JCSS.

De acordo com o que foi apresentado anteriormente é possível notar que os estudos de confiabilidade, principalmente para elementos de concreto armado, ainda enfrentam uma barreira em relação a sua difusão e aplicação pelos profissionais da área, fato este que provém da existência de normas técnicas que são consideradas satisfatórias por apresentarem diretrizes que garantam a segurança das construções, mesmo com a possibilidade de levar a concepção de estruturas volumosas que podem representar danos significativos ao meio ambiente e, conseqüentemente, à sociedade.

Deste modo, o presente trabalho propõe um estudo comparativo do dimensionamento de pilares intermediários de concreto armado, para o ELU, otimizados através da teoria de confiabilidade com aqueles dimensionados conforme a ABNT NBR 6118:2014, através da análise do comportamento dos dimensionamentos perante a variação da força normal aplicada ao eixo do pilar. Para a concretização do estudo são propostos objetivos específicos que delimitam o desenvolvimento da pesquisa, sendo estes: realização do levantamento bibliográfico de estudos referentes ao tema para embasamento teórico do trabalho, verificação das recomendações de dimensionamento de pilares no ELU propostos pela ABNT NBR 6118:2014, obtenção do índice de confiabilidade dos pilares analisados por meio do método FORM e análise de custo entre os pilares dimensionados pelos dois métodos.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi adotado o método apresentado por Beck (2019) em seu livro “Confiabilidade e segurança das estruturas”. O processo consiste em encontrar o índice de confiabilidade do pilar a partir da minimização das distancias das variáveis aleatórias do problema físico, as quais se situam no conjunto onde a função de desempenho estrutural é nula, ou seja, as condições nas quais a estrutura está mais propícia a falhar. Para esse processo de otimização é implementado o método FORM e a transformação de Hasofer-Lind.

A seguir são apresentados os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento deste trabalho. O primeiro tópico consiste na apresentação dos dados que caracterizam o estudo de caso, incluindo as especificidades do Pilar Padrão, do pilar otimizado e das variáveis utilizadas. Posteriormente é demonstrada a função de desempenho para a estrutura analisada e apresentado os níveis de confiabilidade com o método de cálculo de confiabilidade estrutural aplicada para a análise dos pilares obtidos conforme a variação da força normal. Por fim, é disposta a função para análise de custo adotada para a comparação

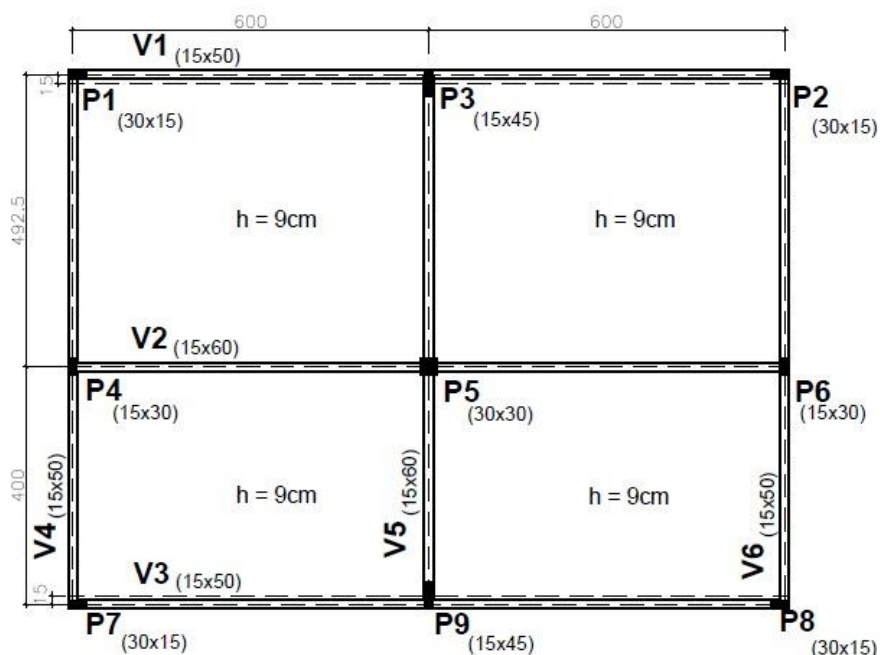
dos pilares.

2.1 Estudo de caso

2.2.1 Pilar Padrão

A planta de forma de uma construção indica a posição de pilares e vigas, e fornece dados necessários para a determinação das cargas atuantes na edificação e em cada elemento estrutural. Para este trabalho foi adotada a planta de um projeto residencial, apresentada na Figura 1, composta por quatro planos de laje com 9 centímetros de altura e as vigas externas e internas com secções de 15x50 cm e 15x60 cm, respectivamente.

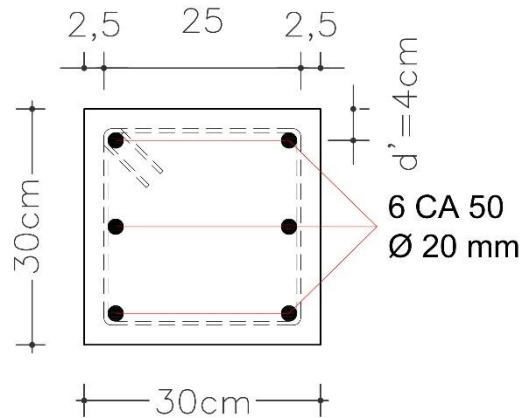
Figura 1 - Planta de forma do problema modelo



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

O pilar adotado como objeto de estudo é o P5 (Figura 2), caracterizado por ter a seção quadrada, ser semi-esbelto e intermediário, ou seja, recebe os carregamentos das vigas V2 e V5 de forma contínua de modo que a excentricidade inicial não é levada em consideração para os cálculos.

Figura 2 – Pilar Padrão



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

As principais características do pilar em estudo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do pilar P5

Concreto (MPa)	Fck 30
Cobrimento nominal (cm)	2,5
Comprimento do Pilar (cm)	590
Seção transversal (cm)	30x30
Força normal característica do pilar (kN)	996
Distância do eixo da bitola a face do pilar (cm)	4,0
Aço	CA50

Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Para a análise do Pilar Padrão foi considerada a variação de carga de compressão em seqüências de 50kN a partir de 850kN até 1800kN.

2.2.2 Pilar otimizado

O JCSS, conforme apresentado por Andrade (2013), disponibiliza bases de cálculo para calibração de normas referentes ao concreto e ao aço, considerando modelos obtidos por meio de probabilidades.

Para a otimização do Pilar Padrão foi adotado os valores de confiabilidade objetivo com consequência moderadas de falha e custos de segurança normais, estabelecidos pelo JCSS e apresentados por Eraso (2011) (Tabela 2).

Tabela 2 – Índices de confiabilidade referência

Medida relativa do custo de segurança	Consequências leves de falha	Consequências moderadas de falha	Consequências graves de falha
Grande (A)	$\beta_{obj.} = 3,1$	$\beta_{obj.} = 3,3$	$\beta_{obj.} = 3,7$
Normal (B)	$\beta_{obj.} = 3,7$	$\beta_{obj.} = 4,2$	$\beta_{obj.} = 4,4$
Pequeno (C)	$\beta_{obj.} = 4,2$	$\beta_{obj.} = 4,7$	$\beta_{obj.} = 4,7$

Fonte: Eraso (2011)

Com a determinação dos valores da confiabilidade para as solicitações programadas, é necessário analisar os dados e propor uma nova seção, que resista o mesmo carregamento suportado pelo pilar otimizado com o $\beta_{obj.}$, para ser dimensionada seguindo a NBR 6118:2014.

2.2.3 Variáveis de projeto

As variáveis determinísticas adotadas para o desenvolvimento dos cálculos foram referentes a excentricidade da peça, o comprimento do pilar e a taxa de armadura. Em contrapartida, as variáveis aleatórias (VA) consideradas nesta pesquisa serão: seção transversal do elemento (h^{pilar}), propriedades mecânicas do concreto armado (f_c^{c30} e f_y) e as ações atuantes na estrutura cargas permanentes e variáveis (G e Q).

Em resumo, a Tabela 3 apresenta as características dos parâmetros variados neste trabalho, com dados relativos ao tipo de distribuição, média e coeficiente de variação (CV), as informações apresentadas foram reunidas e disponibilizadas por Kroetz (2019) mediante ao levantamento realizado por meio de consultas com empresas que realizaram os ensaios experimentais.

Tabela 3 – Variáveis aleatórias adotadas no trabalho

VA	Distribuição	Média	CV
f_c^{c30}	Normal	$1,22 \cdot f_{ck}$	0,15
h^{pilar}	Normal	h^{pilar}	$10/h^{pilar}$
G	Normal	$1,06 \cdot G_k$	0,12
Q	Gumbel	Q_k	0,25
f_y	Normal	$1,19 f_y$	0,10

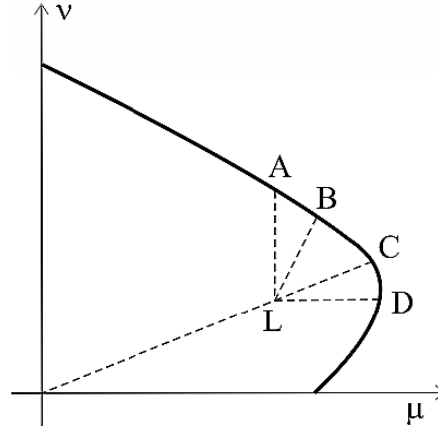
Fonte: Kroetz (2019) adaptado pelos autores (2019)

2.2 Função desempenho

Para a determinação da função desempenho a Figura 3, trabalhada por Diniz e Frangopol (1997), demonstra quatro casos que influenciam na segurança de um elemento estrutural, cada qual com equações específicas de cálculo, de modo que: no LA o momento é

considerado constante, em LB a carga axial e o momento fletor são não correlacionados, em LC as excentricidades são fixas e LD possui carga axial constante.

Figura 3 – Critérios de falha



Fonte: Diniz e Frangopol (1997) adaptado pelos autores (2019)

Este trabalho considera as excentricidades como variáveis fixas, sendo assim a Equação 01 descreve a função desempenho ideal com as considerações necessárias para as características do estudo.

$$G(X) = \left(P^2 + \left(\frac{P \cdot e}{h} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left\{ (G + Q)^2 + \left[(G + Q) \frac{e}{h} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (01)$$

Onde:

- $G(X)$ = Função de desempenho;
- P = Resistência no eixo do pilar a partir de uma dada excentricidade;
- h = Altura da seção transversal do pilar;
- e = Excentricidade;
- G = Carga permanente; e
- Q = Carga Variável.

A resistência no eixo do pilar pode ser obtida pela Equação 02 (NOGUEIRA, 2006). Para tanto, ainda conforme o mesmo autor, O produto dos coeficientes $k_3 \cdot k_4$ na ausência de dados experimentais é considerado igual a 0,85.

$$P = k_3 \cdot k_4 \cdot f_c (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \quad (02)$$

Onde:

- k_3 = Coeficiente de redução devido aos efeitos de longa duração – “Rüşh”;
- k_4 = Coeficiente de redução devido ao deslocamento do cobrimento;
- f_c = Resistência do concreto;
- A_g = Área da seção total do pilar;
- A_{st} = Área da seção das barras longitudinais; e
- f_y = Resistência do aço.

As ações provenientes de cargas variáveis (Q_k) e cargas permanentes (G_k) serão sintetizadas pelas Equações 03 e 04, respectivamente (DAMAS, 2015).

$$Q_k = G_k \frac{1 - r}{r} \quad (03)$$

$$G_k = \frac{N_{sd}}{1,4 \left(1 + \frac{1 - r}{r} \right)} \quad (04)$$

Onde:

- Q_k = Ações de cargas variáveis;
- G_k = Ações de cargas permanentes;
- N_{sd} = Força normal solicitante de cálculo; e
- r = Razão entre carga permanente e carga total, para este trabalho foi selecionada uma relação de 0,75 que, de acordo com Damas (2015), é o mais usual para pilares de residências convencionais.

2.3 Confiabilidade estrutural

2.3.1 Níveis de confiabilidade

Segundo Madsen, Krenk e Lind (1986) os métodos de confiabilidade são classificados em níveis variando de 0 a 4, cada nível estabelece uma relação de calibração pelo nível anterior (VIEIRA, 2017).

Para este trabalho é proposta uma comparação entre o método dos estados limites do nível 1, onde são aplicados coeficiente de ponderação para majorar as ações provenientes dos carregamentos e minorar as resistências, com o nível 2 do método do índice de confiabilidade, que considera as incertezas dentro de um modelo probabilístico empregando os valores de média, desvio-padrão e uma medida de correlação (covariância) para definição do índice de confiabilidade (VIEIRA, 2017).

2.3.1 Índice de confiabilidade

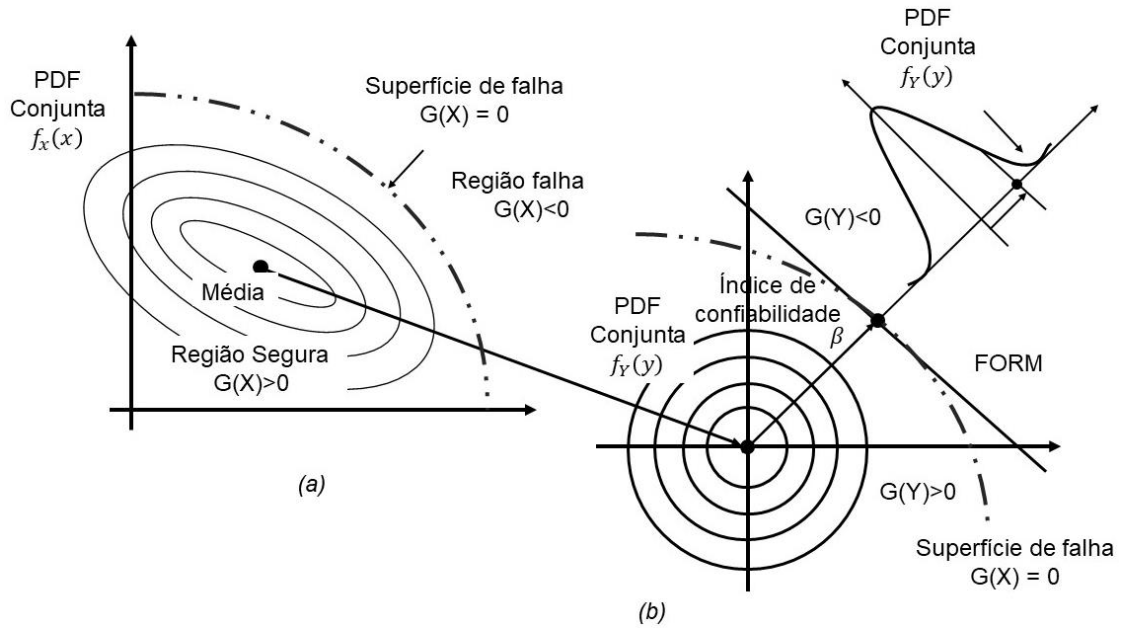
A partir da função de falha, Equação 05 (BECK, 2014), onde R são variáveis de resistência e S de solicitação de uma função conjunta de distribuição de probabilidade (a), é transformada em uma função de distribuição Gaussiana padrão multivariada (b) com variáveis aleatórias Y (BECK, 2014), como ilustrado pela Figura 4. Segundo Eraso (2011), a superfície de falha $G(Y)$ é aproximada por uma outra superfície linear ou hiperplano no ponto que está mais perto da origem (MPP), através deste comprimento da origem até o MPP é obtido o índice de confiabilidade β .

$$G(x) = R - S \quad (05)$$

Onde:

- $G(x)$ = Função de falha;
- R = Variáveis dos esforços resistentes; e
- S = Variáveis dos esforços solicitantes.

Figura 4 – Transformação do espaço original (a) para espaço reduzido (b)



Fonte: Choi e Youn (2001) adaptado por Eraso (2011) e pelos autores (2019)

2.4 Análise de custo

Com as características dos dois pilares obtidos pelos métodos proposto é possível comparar o custo e a economia resultante pela Equação 6 (Eraso, 2011).

$$C_t = V_c \cdot C_c + V_{aço} \cdot \mu_{aço} \cdot C_{aço} \quad (06)$$

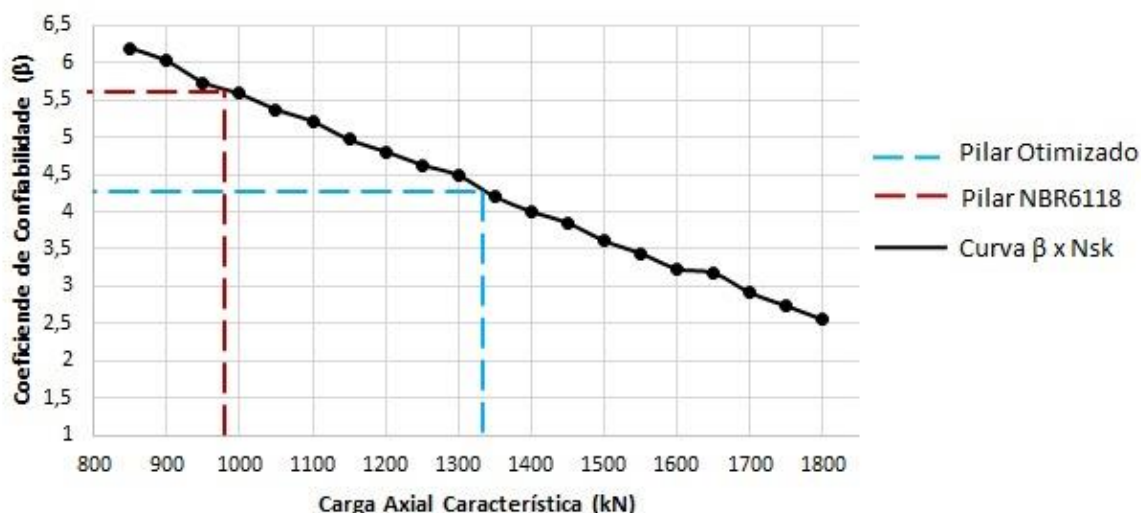
Onde:

- C_t = Função custo;
- V_c = Volume de concreto em m^3 ;
- C_c = Custo do metro cúbico do concreto;
- $V_{aço}$ = Volume de aço das bitolas em m^3 ;
- $\mu_{aço}$ = Massa específica do aço; e
- $C_{aço}$ = Custo do quilograma do aço.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mediante a finalização dos dois processos de dimensionamento do Pilar Padrão propostos neste trabalho, pelo método normativo e o otimizado, foi possível elaborar o Gráfico apresentado na Figura 5, que remete aos valores de confiabilidade obtidos conforme as cargas resistidas pelos dois pilares com a mesma seção transversal (Figura 2).

Figura 5 – Características dos pilares dimensionados



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Neste gráfico é possível perceber que a mesma seção do pilar dimensionada pelos fatores de segurança da NBR 6118:2014 que resiste a uma carga de 996,8 kN com um β de 5,58, ao ser otimizada com uma confiabilidade objetivo de 4,2, estipulada pela JCSS (Tabela 2), passou a resistir 1.349,7 kN, fato este que remete aos métodos utilizados em cada um dos níveis de confiabilidade estrutural estudados. Para Andrade (2013) os pilares obtidos por meio do nível 2 consideram todas as especificidades de projeto, de modo que sejam fornecidos resultados mais concisos para o sistema, permitindo evitar o dimensionamento de elementos superestimados.

A comparação quantitativa entre os métodos foi possível com o redimensionamento do Pilar Padrão pelas diretrizes da norma para a carga otimizada de 1.349,7 kN, gerando novos valores para a seção de concreto e aço. Ressalta-se ainda que como premissa foi assegurado que a taxa de armadura permanecesse constante para ambos os casos.

Para a seção transversal de concreto redimensionada pela norma foi obtida as dimensões de 32,7x32,7 cm, o que significou um aumento de 18,81% da quantidade de concreto empregada se comparado com o pilar otimizado de 30x30 cm. O aço, que pelo método convencional foi representado por 8 barras de 20 mm, com a otimização passou para 6 barras de 20mm, acarretando em uma economia 33,33% do material.

Por fim, a análise de custo estimou um valor de R\$36,00 para o pilar dimensionado pela norma e R\$30,41 para o pilar dimensionado pelo método de confiabilidade, gerando uma economia de 19,05% no valor final dos elementos. Os valores de custo unitários foram retirados da tabela de insumos do SINAPI do mês de outubro de 2019 para o estado de Goiás.

4. CONCLUSÕES

Por fim, perante todos os dados apresentados, foi possível perceber que, mesmo resultando em uma peça que atenda às necessidades de projeto, dentro de um valor de confiabilidade que garanta a segurança do sistema, a norma NBR 6118:2014 pode superestimar o elemento estrutural, à medida que trabalha com a pior situação em que a estrutura será submetida, levando a valores de confiabilidade maiores do que o necessário com peças volumosas e onerosas.

A vantagem econômica obtida por meio da otimização dos pilares apresentada neste estudo, que alcançou uma economia de 19,05% no custo por metro da peça, corrobora com os

exemplos levantados na introdução deste trabalho por Sias e Alves (2015) e sustenta os benefícios de aplicação dos métodos probabilísticos como alternativa para o dimensionamento de elementos estruturais.

Frente a preocupação social cada vez maior em tópicos relacionados a sustentabilidade, uma vez que a indústria da construção civil, com a utilização do concreto, lança na atmosfera cerca de 600 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido, conforme dados de 2014 apresentados pelo SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), é de extrema importância que sejam buscados meios de racionalizar o consumo de concreto. Sendo assim, com os resultados obtidos nesta pesquisa é possível enfatizar o teor sócio-ambiental acrescido nos resultados, uma vez que foi demonstrada como a aplicação do método de confiabilidade permite reduzir a quantidade de material empregado em elementos estruturais.

Sugere-se para futuras pesquisas:

- O estudo dos coeficientes de minoração devido ao deslocamento do cobrimento e do efeito Rüşh;
- Um estudo experimental em corpos de prova para o dimensionamento otimizado;
- A consideração entre as diversas classes de risco e custo com segurança e manutenção e impactos ambientais; e
- A formulação de um software para o dimensionamento com dados de entradas simplificadas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. R. **Obtenção do índice de confiabilidade de ligações de perfis formados a frio com o emprego do método FORM**. 2014. 89 f. Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE 7 – Minimum design loads for buildings and the other structures**. Structural Engineering Institute. Virginia, 2013.
- ANDRADE, N. F. de A. **Análise e otimização estocásticas de concepções de estruturas de concreto armado utilizando modelos de seleção**. 2013. 257 f. Universidade Federal de Pernambuco, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- BARBOSA, A. H. **Análise de confiabilidade estrutural utilizando o método de Monte Carlo e redes neurais**. 2004. 124 f. Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.
- BECK, A. T. **Confiabilidade e segurança das estruturas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- CHAVES, I. A. **Otimização de pilares de concreto armado mediante uniformização do índice de confiabilidade**. 2004. 178 f. Universidade de São Paulo, 2004.
- CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. 2007. 305 f. Universidade de São Paulo, 2007.
- DAMAS, A. P. **Estudo de Confiabilidade no Projeto de Pilares Esbeltos de Concreto de Alta Resistência**. 2015. 183 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- DINIZ, S. M. C.; FRANGOPOL, D. M. **Realibility bases for high-strength concrete columns**. Journal of Structural Engineering, V.123, 1997. p.1375-1381.
- ELISHAKOFF. **Safety factors and reliability: Friend or Foes?** [S.l: s.n.], 2004.
- ERASO, A. I. R. **Análise de confiabilidade de longarinas de pontes ferroviárias de concreto armado**. 2011. 128 f. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode: Basis of structural design – EN 1990**. Bruxelas, 2002.
- FRANGOPOL, D. M. Reliability-Based Optimum Structural Design. In: SUNDARARAJAN, C.R. **Probabilistic Structural Mechanics Handbook: theory and industrial applications**. Chapman & Hall, 1995. p. 352–387.
- GOMES, H. M. **Técnicas de avaliação da confiabilidade em estruturas de concreto armado**. 2001. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2394: General principles on reliability for structures**. Switzerland ,2015.
- KROETZ, H. M. **Otimização estrutural sob incertezas : métodos e aplicações**. 2019. 141 f. Universidade de São Paulo, 2019.

KRÜGER, C. M. **Análise de confiabilidade estrutural aplicada às barragens de concreto**. 2008. 146 f. Universidade Federal do Paraná, 2008.

MADSEN, H. O.; KRENK, S.; LIND, N. C. **Methods of structural safety**. Mineola: Dover publications, INC, 1986.

MURARO, Cauê. **Edifício Wilton Paes de Almeida: prédio que desabou em SP foi projetado na década de 1960 e era patrimônio histórico**. G1, São Paulo. 2018. Disponível em: < <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/edificio-wilton-paes-de-almeida-predio-que-desabou-em-sp-foi-projetado-na-decada-de-1960-e-era-patrimonio-historico.ghtml> >. Acesso em: mai. de 2019.

NOGUEIRA, H. A. T. **Avaliação da confiabilidade de pilares curtos em concreto armado projetados segundo a NBR 6118 : 2003**. 2006. 126 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

ROCHA, R. G.; REAL, M. D. V.; MOURA, M. W. **Estudo de confiabilidade de vigas de concreto protendido**. ENGEVISTA, v. 17, p. 573–587, 2015.

SABÓIA, Gabriel et al. **Prédios desabam no Rio de Janeiro**. UOL, Rio de Janeiro. 2019. Disponível em: < <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2019/04/12/predios-desabam-no-rio-de-janeiro.htm> >. Acesso em: mai. de 2019.

SAKAMOTO, B. S. **Análise de confiabilidade estrutural utilizando o método FORM com múltiplos modos de falha para edifício alto submetido à ação do vento**. 2016. 97 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

SERPA, V. C. **Análise de confiabilidade de vigas em concreto armado : sensibilidade dos parâmetros de dimensionamento**. 2018. 137 f. Instituto Federal de Santa Catarina, 2018.

SIAS, F. M.; ALVES, É. C. **Dimensionamento Ótimo de Pilares de Concreto Armado Segundo a NBR 6118:2014**. Engenharia Estudo e Pesquisa, v. 14, p. 46–57, 2015.

VERZENHASSI, C. C. **Otimização de risco estrutural baseada em confiabilidade**. 2008. 154 f. Universidade de São Paulo, 2008.

SISTEMA NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Sustentabilidade: Indicadores**. Disponível em: <<http://snic.org.br/sustentabilidade-indicadores.php>>. Acesso em: nov. de 2019.

VIEIRA, R. N. C. **Confiabilidade de pilares curtos em concreto de alta resistência dimensionados segundo a ABNT NBR 6118:2014**. 2017. 241 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2017. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUBD-AK3MJX>>. Acesso em: mai. de 2019.



**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS

Documento Digitalizado Público

TCC - Versão Final

Assunto: TCC - Versão Final
Assinado por: Matheus Souza
Tipo do Documento: Documentos
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Público
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Matheus Pereira de Souza, ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 03/02/2020 14:06:57.

Este documento foi armazenado no SUAP em 03/02/2020. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 40533

Código de Autenticação: 743ebeb846

