

Métodos numéricos aplicados na concepção arquitetônica e projeto estrutural da construção civil

ORGANIZADORES

João da Costa Pantoja
Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa
Marcio Augusto Roma Buzar
Naiara Guimarães de Oliveira Porto
Nathaly Sarasty Narvaez





CENTRO DE INFORMAÇÃO
OSCAR NIEMEYER
TORRE DE TV DIGITAL DE BRASÍLIA

REITORA
VICE-REITOR
DECANA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
DECANATO DE PÓS GRADUAÇÃO

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Márcia Abrahão Moura
Henrique Huelva
Maria Emília Machado Telles Walter
Lucio Remuzat Rennó Junior

DIRETOR
VICE DIRETORA

FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
Caio Frederico e Silva
Maria Cláudia Candeia

COORDENAÇÃO DE PRODUÇÃO
DIAGRAMAÇÃO
FOTO CAPA

Valmor Cerqueira Pazos
Thalita Dantas Perfeito de Castro
Marcio Augusto Roma Buzar

CONSELHO EDITORIAL

Abner Luis Calixter
Ana Carolina Cordeiro Correia Lima
Humberto Salazar Amorim Varum
Marta Adriana Bustos Romero

ORGANIZADORES

João da Costa Pantoja
Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa
Marcio Augusto Roma Buzar
Naiara Guimarães de Oliveira Porto
Nathaly Sarasty Narvaez

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
(CÂMARA BRASILEIRA DO LIVRO, SP, BRASIL)

Métodos numéricos aplicados na concepção arquitetônica e projeto estrutural da construção civil [livro eletrônico] / organização João da Costa Pantoja...[et al.].
-- 1. ed. --

Brasília, DF : LaSUS FAU : Editora Universidade de Brasília, 2023.
PDF

Vários autores. Outros organizadores: João da Costa Pantoja, Marcio Augusto Roma Buzar, Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa, Naiara Guimarães de Oliveira Porto, Nathaly Sarasty Narvaez.

Bibliografia.

ISBN 978-65-84854-12-3

1. Engenharia civil 2. Estruturas – Análise (Engenharia)

I. Pantoja, João da Costa. II. Buzar, Marcio Augusto Roma.

III. Porto, Naiara Guimarães de Oliveira. IV. Narvaez, Nathaly Sarasty.

V. Inojosa, Leonardo da Silveira Pirillo.

23-152448

CDD-624.15

ÍNDICES PARA CATÁLOGO SISTEMÁTICO:

1. Engenharia civil 624.15

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

ORGANIZADORES E AUTORES

JOÃO DA COSTA PANTOJA | ORGANIZADOR E AUTOR

LEONARDO DA SILVEIRA PIRILLO INOJOSA | | ORGANIZADOR E AUTOR

MARCIO AUGUSTO ROMA BUZAR | ORGANIZADOR E AUTOR

NAIARA GUIMARÃES DE OLIVEIRA PORTO | ORGANIZADOR E AUTOR

NATHALY SARASTY NARVAEZ | ORGANIZADOR E AUTOR

LUIZ FERNANDO MARTHA

LUIZ ELOY VAZ**

OSVALDO LUIZ C. SOUZA

EMIL DE SOUZA SÁNCHEZ FILHO

MARTA DE SOUZA LIMA VELASCO

PAUL ALEJANDRO ANTEZANA**

MARCO AURÉLIO BESSA

LENILDO SANTOS SILVA

JOSÉ HUMBERTO MATIAS DE PAULA

MARCOS H. RITTER DE GREGÓRIO

**** In memoriam**

O Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia é um tradicional evento científico das áreas de Ciências e Engenharias, de regularidade anual, e que tem sido realizado desde o ano de 1977, quando foi organizado na cidade do Rio de Janeiro. A partir do ano de 2007, o CILAMCE tornou-se o evento anual promovido pela ABMEC. Ao longo das décadas, o evento já foi realizado em diversas cidades de todas as regiões do Brasil. Algumas edições também aconteceram em outros países, tais como: Argentina, Chile, Espanha, Itália, Portugal e França. É um evento internacional que atrai renomados pesquisadores e profissionais de diversos países, devido a sua relevância mundial para as áreas relacionadas ao desenvolvimento científico e tecnológico.

Durante o congresso são apresentados e discutidos desenvolvimentos de ponta relacionados aos Métodos Computacionais com aplicações diversas em Ciências Aplicadas, como a Arquitetura e Engenharia. O Congresso também abrange áreas como: Aeroespacial, Nuclear, Inteligência Artificial, Materiais Avançados, Indústria, Infraestrutura, Comunicações, Energias Renováveis, Monitoramento e Prevenção de Desastres Naturais, Saneamento Básico, Construção Civil, Segurança Hídrica, entre outras. Por este motivo, o CILAMCE tem papel fundamental como fórum de debate para pesquisadores e desenvolvedores de tecnologia de ponta de grande relevância para o desenvolvimento do país.

O mini simpósio denominado Métodos Numéricos Aplicados na Concepção Arquitetônica e Projeto Estrutural da Construção Civil presente desde 2016 no CILAMCE, visa aproximar as áreas do conhecimento e mostrar que o dimensionamento do sistema estrutural desempenha um papel essencial na determinação do projeto arquitetônico. Projetos que exploram a relação entre arquitetura e estrutura e a relação direta entre forma e estrutura, onde a definição do sistema estrutural tem participação efetiva desde sua concepção, proporcionam obras marcadas pela ousadia estrutural e grandes desafios tecnológicos.

Este mini simpósio visa reunir contribuições e obter dados que, por meio de análises que utilizam tecnologias computacionais e métodos numéricos, permitam entender como o projeto estrutural aliado à criação arquitetônica proporciona resultados estéticos inovadores. Estudos nesse sentido ressaltam a importância do conhecimento técnico para a realização de projetos de boa qualidade, evidenciando o protagonismo do sistema estrutural na forma arquitetônica. Essas análises contribuem para o entendimento da importância do conhecimento técnico e tecnológico promovido via métodos numéricos na produção de uma arquitetura inovadora.

A coordenação do mini simpósio Métodos Numéricos Aplicados na Concepção Arquitetônica e Projeto Estrutural da Construção Civil é feita desde 2016 pelos professores Dr. Eng. João Costa Pantoja e Dr. Eng. Márcio Augusto Roma Buzar, ambos do Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e pelo Dr. Arq. Leonardo da Silveira P. Inojosa do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia, todos professores da Universidade de Brasília (UNB). Este livro traz uma coletânea de contribuições dos coordenadores em conjunto com outros autores, pesquisadores colaboradores da área desde 2009, com artigos que precederam e deram origem à criação do mini simpósio, abrangendo o período de 2016 até 2022 já apresentados no mini simpósio.

Aproveitamos para agradecer ao Grupo de Pesquisa da Universidade do Porto da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC) pela parceria e participação na montagem e revisão dos textos dos artigos envolvidos.

Agradecemos imensamente a contribuição dada por todos.

Junho de 2023

ÍNDICE

MODELO DE BIELAS E TIRANTES GERADOS POR OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA E ELEMENTOS INDUTORES

1	INTRODUÇÃO	19
2	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA COMO PROCEDIMENTO DE PROJETO	20
3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA VIA MÉTODO SIMP	21
3.1	Minimização da energia de deformação com aplicação das restrições	21
4	RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	24
4.1	Método das Assíntotas Móveis – MMA	24
5	ELEMENTOS INDUTORES	27
6	EXEMPLOS	28
6.1	Estrutura de Viga Parede – VP1	28
6.2	Estrutura de Viga Parede – VP2	31
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
8	AGRADECIMENTOS	34
9	REFERÊNCIAS	34

UM CRITÉRIO BASEADO EM CONFIABILIDADE PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

1	INTRODUÇÃO	39
2	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA COMO PROCEDIMENTO DE PROJETO	40

2.1	Exemplo	41
3	MODELO PROPOSTO PELO ACI 318-02 (2002)	42
4	MODELO OBTIDO VIA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA 39	43
5	CRITÉRIO BASEADO EM CONFIABILIDADE	44
6	FUNÇÕES DE ESTADO DOS MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	46
7	MODELO 1 E 2	46
8	RESULTADOS	47
9	CONCLUSÕES	57
10	REFERÊNCIAS	58

O IMPACTO DAS INCERTEZAS EPISTÉMICAS SOBRE O NÍVEL DE SEGURANÇA DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS A TORÇÃO PURA E REFORÇADAS COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO – CFRP

1	INTRODUÇÃO	59
2	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	59
3	DESCRIÇÃO DA ANÁLISE	62
3.1	Modelo Considerado	62
3.2	Variáveis Aleatórias do Problema	63
3.3	Funções de Estado	64
3.4	Método de Resolução	65
4	RESULTADOS OBTIDOS	66
5	CONCLUSÕES	68
6	REFERÊNCIAS	69

DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA VIA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDA AO ESFORÇO CORTANTE

1	INTRODUÇÃO	75
2	EXPRESSÕES DE DIMENSIONAMENTO DE UMA SEÇÃO DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDA AO ESFORÇO CORTANTE	76
2.1	Expressões da NBR 6118-2003 pelo Modelo I para viga sem reforço	76
2.2	Expressões da NBR 6118-2003 pelo Modelo I para viga sem reforço	77
2.3	Modelo de Cálculo Considerando Falha por Ruptura do Compósito	78
2.4	Modelo de Cálculo Considerando Falha por Descolamento do Compósito	80
2.5	Espaçamento das faixas	82
3	ANÁLISE DA CONFIABILIDADE	82
4	FUNÇÕES DE FALHA ASSOCIADAS ÀS EXPRESSÕES DE DIMENSIONAMENTO DE UMA SEÇÃO DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDA AO ESFORÇO CORTANTE	84
4.1	Funções de falha para análise de confiabilidade da viga sem reforço	84
4.2	Funções de falha para análise de confiabilidade da viga com reforço	85
4.3	Função de falha relativa à ruína por tração diagonal, devido à ruptura do reforço	86
5	EXEMPLO DE APLICAÇÃO	87
5.1	Dimensionamento da armadura de estribo da seção S1 da viga V2 pela NBR 6118 – 2003	87

5.2	Análise de confiabilidade da seção S1 da viga V2 dimensionada no item	88
5.3	Dimensionamento baseado em confiabilidade da seção S1 da viga V2 dimensionada no item 5.1.	89
5.4	Mudança na solicitação. Análise de confiabilidade da seção S1 da viga V2 dimensionada no item 5.3.	90
5.5	Dimensionamento da área da seção de fibra de carbono CFC da seção S1 da viga V2 submetida às novas cargas acidentais conforme a metodologia de Chen e Teng (2003 a, b.)	91
5.6	Análise de confiabilidade da seção S1 da viga V2 dimensionada no item 5.5.	91
5.7	Dimensionamento baseado em confiabilidade da área da seção de fibra de carbono CFC da seção S1 da viga V2 dimensionada no item 5.5.	92
6	CONCLUSÕES	93
7	REFERÊNCIAS	94

MODELO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA E CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE PARA A CONCEPÇÃO E ANÁLISE DE REGIÕES-D COMPLEXAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

1	INTRODUÇÃO	99
2	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	99
3	ÍNDICE DE CONFIABILIDADE	101
4	FORM (First Order Reliability Method)	102
5	MÉTODO DE MONTE CARLO	102
6	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	103

6.1	Estrutura analisada	103
7	INCERTEZAS ALEATÓRIAS OU RANDÔMICAS	104
8	INCERTEZAS EPISTÊMICAS	105
9	METODOLOGIA DE ANÁLISE	107
10	APLICAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÃO	107
11	REFERÊNCIAS	109

GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE ENVOLTÓRIAS TOPOLOGICAS APLICADAS EM MODELOS DE BIELAS E TIRANTES UTILIZANDO TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

1	INTRODUÇÃO	114
2	GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	115
3	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	115
3.1	Metodologia SIMP	116
3.2	Envoltória topológica	119
4	OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	119
4.1	Definição do problema	119
4.2	Conceito de ótimo de Pareto	120
4.3	Métodos de geração de pontos de Pareto	121
4.4	Método dos coeficientes de ponderação	122
5	APLICAÇÕES NUMÉRICAS E DISCUSSÕES	123
5.1	Consolo curto com furo no centro	123
5.2	Viga parede com balanço e com furo no centro	125

6	CONCLUSÕES	127
7	REFERÊNCIAS	128

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA TORRE TV DIGITAL DE BRASÍLIA

1	INTRODUÇÃO	133
2	PROCEDIMENTOS ADOTADOS	135
2.1	Carregamentos	135
3	ANÁLISE DAS FUNDAÇÕES	137
3.1	Apresentação da fundação	137
3.2	Verificação da Fundação	139
4	ANÁLISE DA ESTRUTURA DA TORRE	140
4.1	Apresentação da estrutura analisada	140
4.2	Análise estrutural	141
4.3	Verificação do dimensionamento	142
5	ANÁLISE DA TORRE COMO HASTE	142
6	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DEVIDO À ATUAÇÃO DA CARGA DE VENTO	146
7	CONCLUSÃO	148
8	REFERÊNCIAS	148

ANÁLISE DO PROJETO ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO DO RESTAURANTE JUNTO AO PRÉDIO ADMINISTRATIVO DO SUPERIOR TRIBUNAL DE JUSTIÇA - STJ

1	INTRODUÇÃO	152
2	CONTEXTO ARQUITETÔNICO	152

2.1	Bloco da Administração	154
2.2	Blocos dos Ministros I e II	154
2.3	Bloco dos Plenários	154
2.4	Bloco do Tribunal Pleno	155
2.5	Bloco do Auditório	155
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	155
3.1	Características Técnicas	156
3.2	Normas	157
3.4	Topologia	158
3.5	Ações	158
4	ANÁLISE ESTRUTURAL	159
4.1	Análise Estática Linear e Não Linear	159
3.2	Análise de Instabilidade Global	163
5	VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA	164
5.1	Lajes do Teto do Subsolo	164
5.2	Análise de Instabilidade Elástica	164
5.3	Análise de Frequência Natural da Estrutura de Concreto	166
6	CONCLUSÃO	167
7	AGRADECIMENTOS	167
8	REFERÊNCIAS	167

ANÁLISE DE SEGURANÇA E DESEMPENHO ESTRUTURAL DO AUTÓDROMO INTERNACIONAL DA CAPITAL FEDERAL DO BRASIL, BRASÍLIA-DF

1	INTRODUÇÃO	172
2	ENSAIOS TECNOLÓGICOS E OBSERVAÇÕES DE CAMPO	174
2.2	Ensaio de Carbonatação	174
2.3	Constatações da Inspeção	177
3	ANÁLISE NUMÉRICA	180
3.1	Análise limite em serviço	181
3.2	Análise de Vibrações Livres (Análise Modal)	183
3.3	Análise de Instabilidade elástica	187
3.4	Análise de esforços e dimensionamento	189
4	CONCLUSÕES	190

CÁLCULO DE REAÇÕES EM VIGAS DE BORDO PARA LAJES NERVURADAS UNIDIRECIONAIS

1	INTRODUÇÃO	197
2	NORMATIZAÇÃO	198
2.1	Lajes disponíveis no Mercado	198
3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	199
3.1	Reações dos apoios das lajes	199
4	METODOLOGIA	200
5	RESULTADOS	203
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	204

6.1	Altura da Capa	204
6.2	Lambda	206
6.3	Altura da nervura	206
6.4	Rigidez das vigas de bordo	208
6.5	Fissuração das vigas de bordo	209
6.6	Rigidez dos pilares	209
6.7	Avaliação global	209
7	CONCLUSÕES	217
8	REFERÊNCIAS	218

O impacto das incertezas epistêmicas sobre o nível de segurança das vigas de concreto armado sujeitas a torção pura e reforçadas com polímero reforçado com fibra de carbono – CFRP

Oswaldo Luiz C. Souza

Universidade Federal rural do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Rio de Janeiro-RJ, Brasil
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5413841619454533>

João da Costa Pantoja

Universidade de Brasília,
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Brasília-DF, Brasil
Pesquisador do Grupo CONSTRUCT-LESE - Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto
joaocpantoja@gmail.com
lattes: <http://lattes.cnpq.br/6879105340639188>

Luiz Eloy Vaz

Universidade Federal Fluminense
Rio de Janeiro-RJ, Brasil
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4321281058166070>

Emil S. Sanchez Filho

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Civil
Rio de Janeiro-RJ, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7266906180520143>

O impacto das incertezas epistêmicas sobre o nível de segurança das vigas de concreto armado sujeitas a torção pura e reforçadas com polímero reforçado com fibra de carbono – CFRP

João da Costa Pantoja | Luiz Fernando Martha |

Luiz Eloy Vaz | Emil S. Sanchez Filho

Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar a variação da segurança de vigas de concreto reforçadas com aço e polímero reforçado com fibra de carbono - CFRP, sujeitas à torção pura como resultado da consideração das incertezas do modelo do fator de resistência. Os resultados são obtidos a partir da análise de confiabilidade utilizando metodologia e configurações de reforço existentes na literatura. Os valores de concepção dos momentos de torção para a configuração são obtidos com o método semi-probabilístico (L.E.) de acordo com a NBR 6118 (2007). A variação do índice de confiabilidade das vigas em consequência da alteração dos valores para os modelos probabilísticos do fator de resistência é analisada, tendo sido demonstrada a influência do fator de resistência e do coeficiente de variação sobre a confiabilidade do sistema.

Palavras-chave

Índice de confiabilidade, probabilidade de falha, reforço a torção.

The impact of epistemic uncertainties over safety level of reinforced concrete beams subjected to pure torsion and reinforced with carbon fiber reinforced polymer - CFRP

Abstract

The aim of this paper is to evaluate the variation of security of concrete beams reinforced with steel and Carbon Fiber Reinforced Polymer – CFRP, subjected to pure torsion as a result of the consideration of the uncertainties of the resistance factor model. The results are obtained from reliability analysis using methodology and configurations of reinforcement existent in the literature. The design values of the torsion moments for the configuration are obtained with the semi-probabilistic method (L.E.) in accordance with the NBR 6118 (2007). The variation of the index of reliability β_{sis} of the beams in consequence of the change of the values for the probabilistic models of the resistance factor ϕ_R is analyzed. It was shown the influence of resistance factor and variation coefficient over the system reliability.

Keywords

Reliability Index, Probability of Failure, Torsion Reinforcement.

1 INTRODUÇÃO

O funcionamento adequado, a segurança e a durabilidade são os requisitos fundamentais aos elementos estruturais quando solicitados por diversos tipos de carregamento.

A intensidade e distribuição das ações permanentes e variáveis, os parâmetros geométricos, as propriedades mecânicas, hipótese e limitações dos modelos de cálculo e de análise estrutural constituem um conjunto de incertezas a ser considerado na elaboração de um projeto estrutural. Essas incertezas mantêm-se presentes durante toda a vida útil da construção

ANBR 6118 (2007) tem como filosofia de dimensionamento o método dos estados limites (E. L. U.), que considera as incertezas referentes às variáveis envolvidas no dimensionamento, indiretamente, a partir de um enfoque semi-probabilístico por meio de coeficientes parciais, que aplicados sobre os valores característicos das resistências e solicitações, transformam-nas em resistência de cálculo R_d e solicitação de cálculo S_d , respectivamente.

A análise de confiabilidade permite a consideração analítica dessas incertezas a partir das suas respectivas distribuições estatísticas, e por meio dessa é possível avaliar o nível de desempenho e segurança da estrutura analisada.

Este artigo avalia os resultados obtidos na análise de confiabilidade de viga de concreto armado solicitada pelo seu respectivo valor médio de resistência à torção pura, reforçada longitudinalmente e transversalmente com compósito de fibras de carbono (CFC), em conformidade com a metodologia de SILVA FILHO (2007).

2 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A confiabilidade de uma estrutura consiste na avaliação da probabilidade de não ocorrência de falha da mesma ao desempenhar os objetivos para os quais foi dimensionada. Considerando-se a impossibilidade da inexistência de falha define-se a confiabilidade de uma estrutura como o complemento da probabilidade de falha da mesma:

(1)

$$C = 1 - P_f$$

A probabilidade de falha, em termos de análise de confiabilidade, é definida a partir de um valor mínimo de índice de confiabilidade de referência β_a . A definição do índice de referência está vinculada a fatores que ultrapassam o âmbito de atuação do engenheiro, tais como: fatores sociais, econômicos, políticos e outros.

O problema básico de confiabilidade estrutural é definido por meio de duas variáveis independentes R e S , que representam, respectivamente, uma resistência e uma solicitação.

Esse problema é resolvido por meio da definição da margem de segurança representada por uma variável Z , dada por:

(2)
$$Z = R - S$$

A violação do Estado Limite Último – ELU é representada a partir dos valores negativos de Z , caracterizada a partir de uma resistência R inferior a uma solicitação S .

Nesse caso, a probabilidade de falha é dada por:

(3)
$$P_f = P(Z = R - S \leq 0)$$

Para uma situação particular, em que R e S são variáveis Normais com médias μ_R e μ_S e variâncias σ_R^2 e σ_S^2 , a margem de segurança é representada por uma variável normal Z , com média μ_Z e variância σ_Z^2 obtidas por:

(4)
$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S$$

(5)
$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2$$

A Figura 1 ilustra a função densidade de probabilidade da margem de segurança, onde se encontram representados a probabilidade de falha P_f e o índice de confiabilidade β para esse problema.

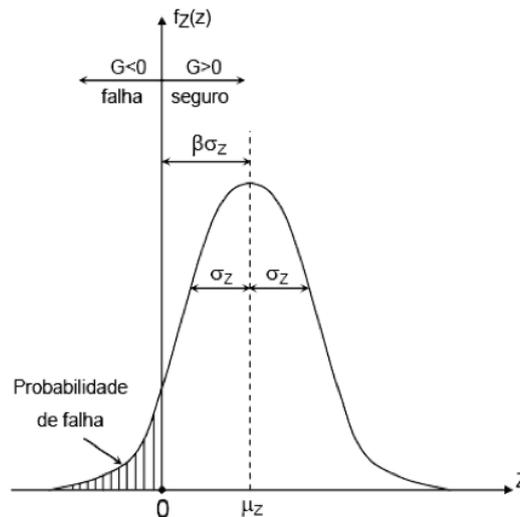


Figura 1:
 Distribuição da margem de segurança.
 Fonte: Adaptado de MELCHERS (2002)

A variável normal Z pode ser escrita como:

(6)
$$Z = \mu_Z - \beta \sigma_Z = 0$$

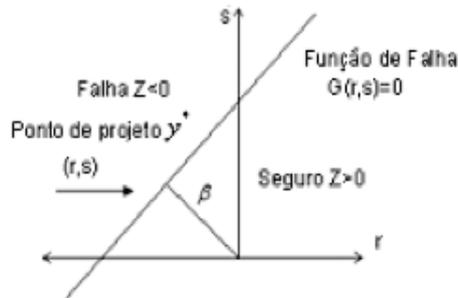
Considerando-se que a falha se dá a partir de $Z = 0$, o índice de confiabilidade do problema básico β é obtido na forma:

$$(7) \quad \beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}$$

$$(8) \quad \beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_S^2}}$$

A Figura 2 ilustra graficamente o problema básico de confiabilidade no espaço das variáveis normais reduzidas não-correlacionadas. O ponto sobre a função de falha, $G(\mathbf{r},\mathbf{s}) = 0$, mais próximo à origem no espaço reduzido é definido como ponto de projeto y^* . A distância de y^* a essa mesma origem é o valor do índice de confiabilidade β do modo de falha considerado.

Figura 2:
 Problema básico de confiabilidade no espaço reduzido r, s .
 Fonte: Autor (2011)



A segurança estrutural a partir da definição do índice de confiabilidade β , que é associado à probabilidade de falha é dada a partir da expressão:

$$(9) \quad P_f = P(Z = R - S \leq 0) = \Phi(-\beta)$$

A maioria dos casos em análise de confiabilidade apresenta diversas variáveis dependentes, não normais e funções de falha não lineares, tornando a obtenção do índice de confiabilidade complexa. Este trabalho utiliza o método analítico FORM (*FirstOrderReliabilityMethod*), cuja ideia original baseia-se no significado geométrico, no espaço reduzido, do índice de confiabilidade β do problema básico com variáveis normais independentes (Figura 2).

O problema geral de análise de confiabilidade parte da definição de uma função de falha $G(\mathbf{X})$, onde \mathbf{X} representa o vetor das variáveis aleatórias que podem ter diferentes tipos de distribuição e serem correlacionadas. A falha se dá quando a função de falha $G(\mathbf{X}) \leq 0$. A probabilidade de falha P_f associada à $G(\mathbf{X}) \leq 0$ pode ser obtida por:

$$(10) \quad p_f = P(G(\mathbf{X}) \leq 0) = \int_{G(\mathbf{X}) \leq 0} f(\mathbf{X}) d\mathbf{X}$$

Onde $f(\mathbf{X})$ é a função densidade de probabilidade multivariável. O cálculo do índice de confiabilidade do problema geral pode ser obtido com a solução do seguinte problema de programação matemática que fornece o ponto X^* e o valor de β :

$$(11) \quad \begin{aligned} \text{Min } \beta &= \|\mathbf{X}\| \\ \text{s.t: } G(\mathbf{X}) &= 0 \end{aligned}$$

O algoritmo mais utilizado para resolver o problema definido na Eq.(11) é o HLRF desenvolvido por HASOFER e LIND (1974) e RACKWITS e FIESSLER (1978). O algoritmo possibilita o cálculo do índice de confiabilidade a partir da transformação das variáveis aleatórias X (espaço original), podendo essas ter distribuições quaisquer e serem dependentes entre si ou não, em variáveis normais equivalentes reduzidas não-correlacionadas y (espaço reduzido), e vice-versa, em cada iteração. Uma vez feito, X^* e seu valor correspondente no espaço reduzido, y^* , a probabilidade de falha P_f é calculada com o uso da Eq.(9) o que representa uma aproximação, uma vez que esse valor corresponde à probabilidade de falha de uma função de falha linear que passa por y^* e é tangente à função de falha original nesse ponto. Um estudo mais apurado sobre o método encontra-se em HALDAR e MAHADEVAN (2000).

3 DESCRIÇÃO DA ANÁLISE

3.1 Modelo Considerado

A Figura 3 mostra as características geométricas e a configuração de reforço em aço e CFC da viga analisada.

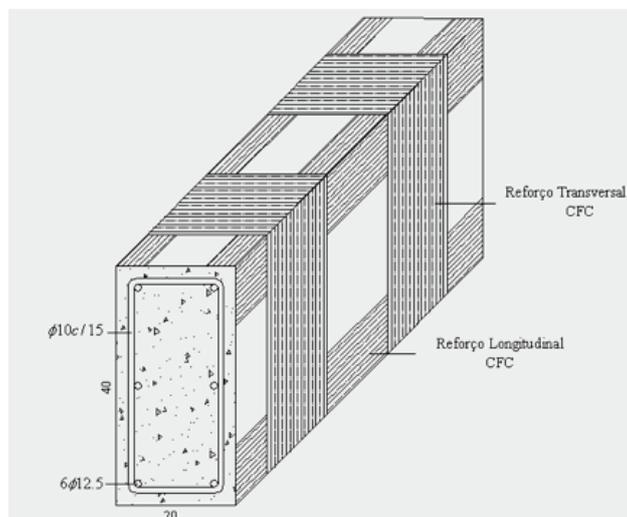


Figura 3:
Características geométricas e configuração de reforço da viga analisada.
Fonte: Autor (2011)

3.2 Variáveis Aleatórias do Problema

O valor médio de resistência à torção T , obtido segundo a NBR 6118 (2007), considerando-se as ações permanentes e variáveis normais, é constante, sendo esse, no entanto, constituído por parcelas de momentos permanente e variável, que caracterizam as razões de carga variável adotada $r_q = 0,4$, $r_q = 0,5$ e $r_q = 0,6$.

A análise considera a aleatoriedade das variáveis inseridas na metodologia de reforço utilizada: resistência à compressão do concreto f_c , tensão de escoamento do aço f_s , do módulo de elasticidade do compósito E_f e das solicitações permanente T_g e variável T_q , ressaltando aspectos intrínsecos à variável fator de modelagem de resistência ϕ_R que tem como objetivo levar em conta as imprecisões nos modelos de cálculo advindas de simplificações nos mesmos.

A Tabela 1 mostra os valores dos modelos probabilísticos das variáveis envolvidas no dimensionamento cujas aleatoriedades foram consideradas na análise.

Tabela 1: Modelos probabilísticos das variáveis aleatórias.
 Fonte: Autor (2011)

Variáveis Básicas	Média (μ)	Coef. Var. (δ)	FDP	
Tensão Concreto (MPa) – f_c	36,6	0,11	Lognormal	
Tensão Escoamento Aço (MPa) – f_s	560	0,05	Lognormal	
Módulo de Elasticidade Compósito (GPa) – E_f	256,72	0,04	Weibull	
Solic. Perm. (kNm) – T_g	11,25	0,10	Normal	
Solic. Varia. (kNm) – T_q				$r_q = 0,4$
Solic. Perm. (kNm) – T_g	9,38	0,10	Normal	
Solic. Varia. (kNm) – T_q				$r_q = 0,5$
Solic. Perm. (kNm) – T_g	7,50	0,10	Normal	
Solic. Varia. (kNm) – T_q				$r_q = 0,6$
Fator de Modelagem de Resistência – ϕ_R	Variável	Variável	Normal	

A análise é conduzida com o objetivo de avaliar a variação do nível de segurança da viga em consequência dos vários valores adotados para as médias μ_{ϕ_R} e coeficientes de variação δ_{ϕ_R} da variável fator de modelagem de resistência ϕ_R .

A Tabela 2 mostra os valores adotados para as médias μ_{ϕ_R} e coeficientes de variação δ_{ϕ_R} da variável considerada ϕ_R .

Tabela 2: Médias μ_{ϕ_R} e coeficientes de variação δ_{ϕ_R} .
Fonte: Autor (2011)

Fator de Modelagem de Resistência – ϕ_R	
Média μ_{ϕ_R}	0,80,9 1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5
Coefficiente de Variação δ_{ϕ_R}	0,100,15 0,20 0,25 0,30

3.3 Funções de Estado

O modelo teórico para dimensionamento do reforço adota o modelo da Treliça Espacial Generalizada e a metodologia do Eurocode2, sendo a tensão efetiva de aderência CFC – concreto e o ângulo de inclinação das bielas flexo-comprimidas considerados, respectivamente, a partir de CHEN e TENG (2003), e APRILE et al. (2004). A partir do modelo teórico adotado foram definidas as funções de falha ou funções de estado, que determinam o limite de violação de um estado limite a partir de uma resistência R igual a uma solicitação S .

A equação de falha relativa à ruína da biela flexo-comprimida de concreto da viga com reforço é:

$$(12) \quad G_1 = 2 \left[0,7 \left(0,7 - \frac{f_c}{20} \right) \right] f_c \left[\frac{tA_k}{\frac{1}{\text{tg}\theta} + \text{tg}\theta} \right] - (T_g + T_q)$$

Para a equação de falha relativa ao escoamento da armadura longitudinal de aço e reforço longitudinal da viga com reforço tem-se:

$$(13) \quad G_2 = 2A_k \text{tg}\theta \frac{A_{sl} f_s}{u_k} + \frac{A_{fl}}{u} 2bh \left[\frac{0,192 \sqrt{\frac{E_f}{t_f} \sqrt{10f_c}}}{10} \right] \text{tg}\theta - (T_g + T_q)$$

Para a equação de falha relativa ao escoamento da armadura transversal de aço e reforço transversal da viga com reforço segue-se.

$$(14) \quad G_3 = 2A_k \frac{1}{\text{tg}\theta} \frac{A_{st} f_s}{s} + \frac{A_{ft}}{s_f} 2bh \left[\frac{0,192 \sqrt{\frac{E_f}{t_f} \sqrt{10f_c}}}{10} \right] - (T_g + T_q)$$

O ângulo de inclinação das bielas para aplicação das equações de falha definidas na Eq.(12)e na Eq. (14) é obtido por:

$$(15) \quad \operatorname{tg} \theta = \sqrt[4]{\frac{1 + \frac{1}{\frac{E_s A_{st}}{9500(10f_c + 8)^{\frac{1}{3}} t u_k} + \frac{E_f A_{fl}}{9500(10f_c + 8)^{\frac{1}{3}} t u}}}{1 + \frac{1}{\frac{E_s A_{st}}{9500(10f_c + 8)^{\frac{1}{3}} t s} + \frac{E_f A_{fl}}{9500(10f_c + 8)^{\frac{1}{3}} t s_f}}}}$$

onde:

- A_{fl} – área reforço longitudinal de CFC;
- A_{ft} – área reforço transversal de CFC;
- A_k – área limitada pela linha média da parede efetiva;
- A_{st} – área da armadura transversal;
- A_{sl} – área da armadura longitudinal;
- b – largura da viga;
- E_f – módulo de elasticidade CFC na direção das fibras;
- E_s – módulo de elasticidade do aço;
- f_c – resistência média a compressão do concreto;
- f_s – resistência média de escoamento do aço;
- h – altura da viga;
- s – espaçamento da armadura transversal;
- s_f – espaçamento eixo a eixo dos estribos de CFC;
- t – espessura da parede efetiva;
- t_f – espessura do reforço de CFC;
- u – perímetro da seção transversal;
- u_k – perímetro da área A_k .

3.4 Método de Resolução

A análise foi conduzida por etapas, adiante descritas, utilizando-se o método FORM:

- a) cálculo dos índices de confiabilidade dos três modos de falha considerados e suas respectivas probabilidades de falha;
- b) probabilidade de falha do sistema em série, por meio do cálculo da união das regiões de falha dos modos considerados;
- c) obtenção do índice de confiabilidade do sistema em série.

A Figura 4 ilustra o desenvolvimento da análise.

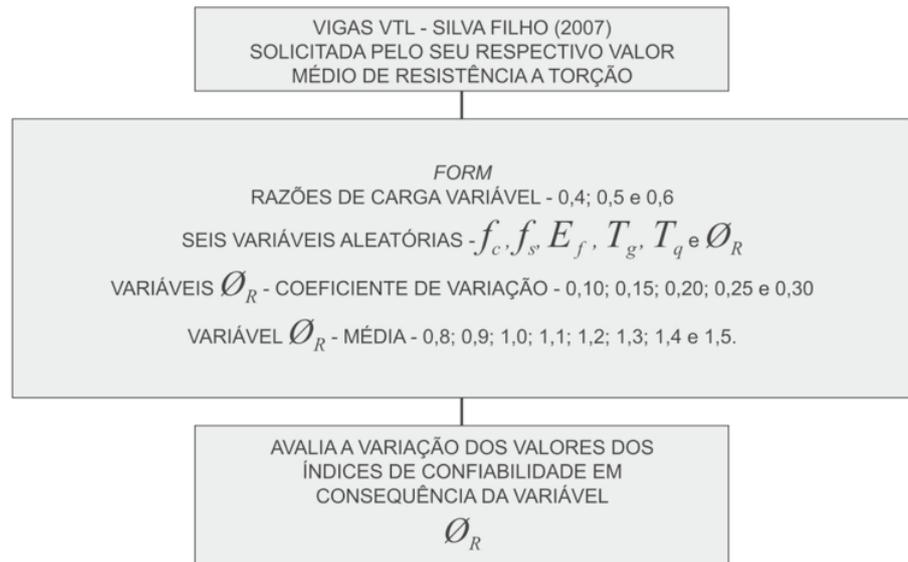


Figura 4:
Organograma da análise.
Fonte: Autor (2011)

4 RESULTADOS OBTIDOS

Os exemplos utilizados nesse trabalho têm como objetivo avaliar a influência das incertezas epistêmicas sobre a análise de confiabilidade de uma viga utilizada por Silva Filho (2007) solicitada à torção pura, executada em concreto armado e reforçada com CFC. A configuração de reforço foi a mesma utilizada pelo referido autor no seu trabalho de tese, reforçada com armadura transversal de CFC. Três razões de carga variável foram utilizadas e seus resultados comparados. A Figura 5 mostra como um acréscimo nos valores referentes à variável aleatória das incertezas de modelagens ou epistêmicas pode levar a valores bastante discrepantes no índice de confiabilidade do sistema. Um valor de coeficiente de variação de 0.15 (constante) foi adotado inicialmente. Apenas uma variação na média da variável aleatória relativa às epistêmicas foi executada. Para o caso da viga considerada, os valores superiores a 1.2 e inferiores a 1.4 foram os que apresentaram valores para os índices de confiabilidade dentro do nível de segurança recomendado pelo JCSS 2001. Coerentemente, à medida que o valor da carga variável aumenta o índice de confiabilidade do sistema diminui, pois uma maior variabilidade é associada ao problema.

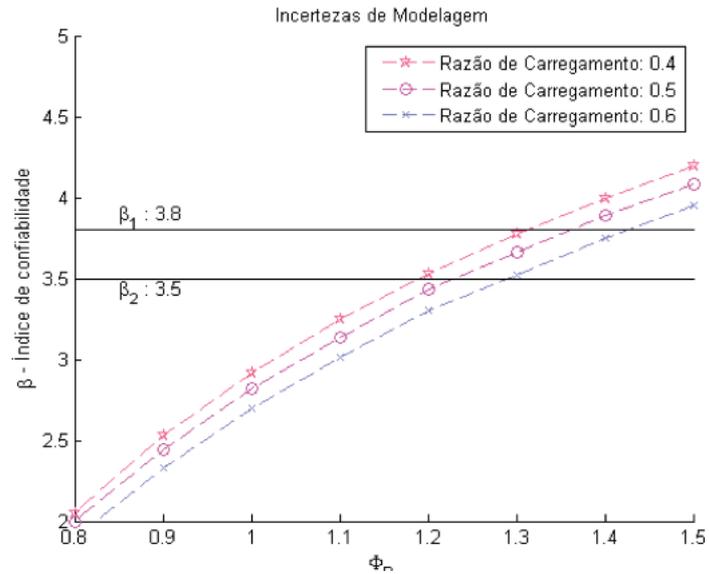


Figura 5:
Influência das incertezas de modelagem na confiabilidade do sistema.
Fonte: Autor (2011)

Um processo bastante interessante seria a calibração dos valores dessa variável aleatória com valores obtidos em ensaios de laboratório de modo a permitir que os resultados realmente representem o comportamento estrutural da viga submetida ao reforço. Um cuidado muito especial deve ser tomado na consideração das médias das variáveis aleatórias relacionadas com os erros de modelagem uma vez que pequenas modificações podem ocasionar mudanças consideráveis de resultados inviabilizando análise.

Também um incremento no coeficiente de variação da variável aleatória de erro de modelagem foi executado. A Figura 6 mostra que a adoção de coeficientes de variação superiores a 0.20 nos erros de modelagem podem conduzir a uma convergência na diferença entre os valores mínimos e máximos para relações de cargas diferentes. Isso ocorre devido a uma maior dispersão dos resultados que são retratados a partir dos maiores valores de coeficientes de variação.

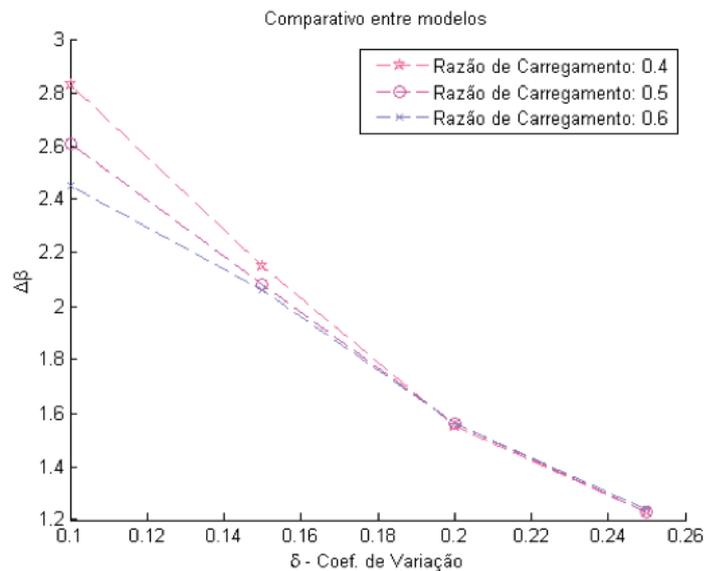


Figura 6:
Influência do coeficiente de variação na confiabilidade do sistema.
Fonte: Autor (2011)

Observa-se que os valores altos de coeficiente de variação conduziram a uma mesma taxa de variação independentemente do valor da razão de carga utilizada.

5 CONCLUSÕES

Em vista dos resultados obtidos na análise de confiabilidade da viga de concreto armado solicitada à torção pura e reforçada com compósito de fibras de carbono segundo a metodologia desenvolvida por SILVA FILHO (2007), conclui-se ser necessário à definição de um processo de calibração dos valores das variáveis aleatórias de erro de modelagem ou epistêmica baseado em ensaios que possibilite validar a análise de confiabilidade do modelo, considerando-se que a adoção indiscriminada dos valores de média e coeficientes de variação pode levar a uma análise de confiabilidade não realística com relação ao comportamento real dos modelos.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de Estrutura de Concreto – Procedimentos: NBR 6118.* Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

HALDAR, A; MAHADEVAN, S. *Reliability Assessment Using Stochastic Finite Element Analysis.* John Wiley & Sons. 2000.

_____. *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design.* John Wiley & Sons. 2000.

HASOFER, A. M., AND LIND, N. C., *Exact and Invariant Second Moment Code Format,* Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, vol. 100, No EM1, pp 111-121, 1974.

HART, G. C. *UNCERTAINTY ANALYSIS, Loads, and Safety in Structural Engineering.* Prentice – Hall, New Jersey, 1982.

JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY. *JCSS: Probabilistic Model Code.*2001.

LOPES, M. T. A. *Análise de Confiabilidade de Estruturas Aplicada ao Projeto de Reforço à Força Cortante de Vigas em Concreto Armado com Compósito de Fibras de Carbono.*Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2007.

MELCHERS, R. E. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. New York, John Wiley & Sons. 2002.

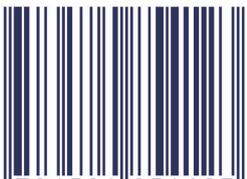
RACKWITZ, R., E FIESSLER, B., *Structural Reliability under Random Load Sequences, Computers and Structures*, vol. 9, No 5, pp 484-494, 1978.

SILVA FILHO, J. J. H. *Reforço à Torção de Vigas de Concreto Armado com Compósito de Fibras de Carbono*. Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2007.



ISBN: 978-65-84854-12-3

QRL



9 786584 854123