

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

Modelo de otimização topológica e critério de confiabilidade para a concepção e análise de regiões-D complexas em estruturas de concreto armado

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 Fernando Martha

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

lfm@tecgraf.puc-rio.br

lattes: <http://lattes.cnpq.br/2540733672905515>

Luiz Eloy Vaz

Universidade Federal Fluminense

Rio de Janeiro-RJ, Brasil

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4321281058166070>

Modelo de otimização topológica e critério de confiabilidade para a concepção e análise de regiões-d complexas em estruturas de concreto armado

João da Costa Pantoja | Luiz Fernando Martha | Luiz Eloy Vaz

Resumo

Este documento mostra uma metodologia para a análise da confiabilidade das estruturas de concreto armado aplicando os modelos de bielas e tirantes com base em resultados experimentais. As formulações FORM e Monte Carlo são utilizadas para calcular o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha dos modos, considerando tanto a segurança como o comportamento dúctil do modelo de bielas e tirantes. Um grande número de resultados experimentais obtidos por outras investigações são utilizados para a calibração dos fatores de incerteza dos modelos aplicados durante a análise de confiabilidade. É apresentado um exemplo de concepção de uma viga parede utilizando a análise de fiabilidade para validação dos aspectos de segurança e ductilidade.

Palavras-chave

Confiabilidade, bielas e tirantes, concreto armado

Topology optimization model and reliability criterion for design and analysis of complex d- regions in reinforced concrete structures

Abstract

This paper shows a methodology for reliability analysis of reinforced concrete structures applying the strut-and-tie models based on experimental results. FORM and Crude Monte Carlo formulations are used to calculate the reliability index and probability of failure of modes, considering both safety and ductile behavior of the strut-and-tie model. A large number of experimental results obtained by others researches are used for calibration of model uncertainties factors applied during reliability analysis. An example of design of a wall beam using reliability analysis for validation of safety and ductility aspects is presented.

Keywords

Reliability, Strut-and Tie Model, Concrete Structures.

1 INTRODUÇÃO

O projeto de viga paredes via o modelo de bielas e tirantes, está presente nas orientações do ACI 318-05. A utilização desses conceitos permite ao projetista estrutural prever a capacidade de carga para vários tipos de vigas paredes. Contudo, resultados experimentais demonstraram que a carga resistente das estruturas de concreto armado e sua correspondente estimativa através do ACI 318-05 são diferentes. Collins e Kuchma (1999) mostraram experimentalmente que o código ACI 318-05 subestima a capacidade ao cisalhamento de vigas paredes de concreto armado. Uma vez que isso aconteça, ocorrerão na estrutura, seções demasiadamente grandes e, conjuntamente, taxas de armadura pequenas. Sendo assim, é necessária uma melhor investigação no sentido de ultrapassar essas dificuldades.

O principal objetivo desse trabalho é apresentar uma metodologia baseada em confiabilidade para análise e projeto de vigas paredes de concreto armado via modelo de bielas e tirantes. A metodologia proposta permite que as principais incertezas presentes no projeto estrutural de vigas paredes sejam incorporadas ao processo de dimensionamento da estrutura. Além disso, a análise de confiabilidade proposta estima as probabilidades de falha associadas com cada mecanismo de falha da viga parede, o que permite ao projetista estrutural verificar uma maior ou menor probabilidade de ocorrência de um determinado modo de falha propondo então modificações de projeto de direcionem um modo de falha desejado. Para demonstrar a aplicabilidade da metodologia, uma viga parede testada experimentalmente é analisada. A modelagem das variáveis aleatórias responsáveis pelos erros de modelagem da estrutura (epistêmicas) forma obtidas como base em resultados experimentais de 214 vigas paredes de concreto armado, ensaiadas até a ruptura e descritas na literatura por diversos pesquisadores e mostradas por Park e Kuchma (2007).

2 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A análise de estruturas de concreto armado envolve uma série de incertezas referentes às propriedades do concreto a aço, dimensões geométricas e posição das armaduras, carregamentos atuantes e condições de apoio. Além do mais, incertezas associadas aos erros de modelo são pouco conhecidas e consideradas. Para análise realística do problema é necessária atenção para os valores esperados das médias e variâncias da resposta estrutural com relação aos parâmetros de entrada. Uma série de métodos para análise probabilística de estruturas tem sido estudada nos últimos anos. Geralmente,

os métodos mais utilizados são o método de simulação de Monte Carlo e o método analítico FORM (First Order Reliability Method). O método de Monte Carlo é o mais simples e intuitivo para consideração da análise probabilística e, por essa razão é bastante utilizado. Nesse método, propriedades dos materiais, carregamentos, e outras variáveis randômicas são introduzidas via simulação digital, sem nenhuma modificação significativa no algoritmo da análise determinística do problema. Além disso, o método de Monte Carlo é estatisticamente consistente e pode ser empregado para testar outras técnicas e métodos. Contudo, o método de Monte Carlo pode ser computacionalmente muito caro em problemas onde o número de graus de liberdade é muito grande levando a um número de simulações proibitivo. Em caso como esse, o método FORM tem sido amplamente empregado.

Os critérios de projeto de estruturas de concreto armado baseados no método dos Estados Limites Últimos (ELU), o nível de segurança é garantido pelo uso dos coeficientes parciais de segurança. Esses coeficientes são introduzidos com diferentes valores de forma a aumentar ou diminuir a magnitude das variáveis randômicas envolvidas na análise. Usualmente, carregamentos, resistência dos materiais e dimensões estruturais são as variáveis randômicas básicas consideradas no projeto. Os coeficientes parciais de segurança são introduzidos de forma a aumentar os valores dos carregamentos e diminuir as resistências do concreto e aço. Para o concreto e o aço, os coeficientes de segurança cobrem as diferenças existentes entre os valores projetados e reais das dimensões nominais da peça e da resistência do concreto obtida nos ensaios dos corpos de prova.

O uso dos coeficientes de segurança, apesar de conveniente, não é suficiente para determinar o nível de segurança obtido pelo projeto. De fato, segurança depende da resposta estrutural devido à ação dos carregamentos e envolve interdependência entre todas as variáveis randômicas. Uma avaliação consistente do nível de segurança requer a determinação da probabilidade de falha da estrutura. Essa probabilidade pode ser estimada se as distribuições de certas variáveis randômicas que sejam responsáveis pela margem de segurança da estrutura são conhecidas. Infelizmente, isso nem sempre é possível ou mesmo prático de se obter. Uma alternativa para obtenção do nível de segurança consiste na avaliação do índice de confiabilidade da estrutura. Esse índice leva em conta todas as variáveis randômicas do problema como também a resposta da estrutura devido às ações. O índice de confiabilidade é associado à probabilidade de falha, apesar de seu relacionamento não ser explícito. Uma série de trabalhos tem sido desenvolvida para estimativa da confiabilidade de estruturas de concreto armado. Contudo, aplicações de análise de confiabilidade em modelos de bielas e tirantes é um novo campo de pesquisa em desenvolvimento.

3 ÍNDICE DE CONFIABILIDADE

O índice de confiabilidade. Das estruturas de concreto armado é uma medida do nível de segurança que leva em conta as incertezas inerentes as variáveis de entrada. Um índice de confiabilidade bastante utilizado é o índice de Hasofer e Lind (1974), definido como a menor distância do ponto de valor médio relativo, às variáveis randômicas, na superfície de estado limite do espaço padrão normalizado denominado β_{HL} . Sua representação na formulação matricial é (Ditlevsen 1981):

$$(1) \quad \beta_{HL} = \min_{x \in F} \sqrt{(x - \mu)^t C^{-1} (x - \mu)}$$

Onde o vetor x representa as n variáveis randômicas, μ é o vetor dos valores médios, C é a matriz das covariâncias e F é a região de falha.

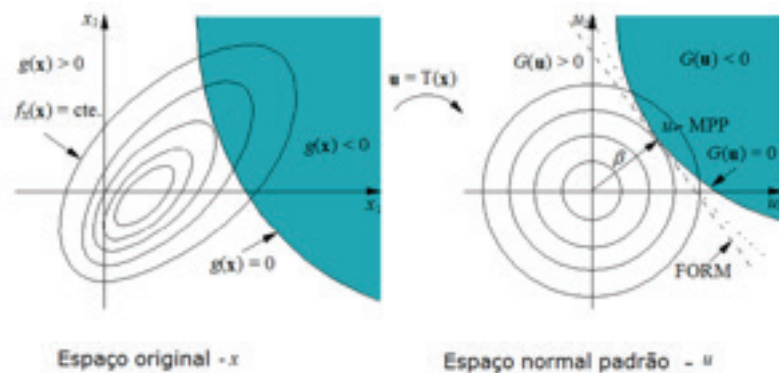


Figura 1
Procedimento de transformação do método FORM.
Fonte: autor (2011).

A minimização da Equação (1) é feita sujeita à restrição $g(x) \leq 0$, onde a superfície de estado limite $g(x) = 0$, separa o domínio n dimensional das variáveis randômicas em duas regiões. Uma região de falha representada $g(x) \leq 0$ e uma região segura dada por $g(x) > 0$. Uma formulação clássica para calcular β_{HL} através da equação (1) é baseada na transformação da superfície de estado limite original numa superfície de estado limite no espaço padrão das variáveis normais reduzidas não correlacionadas, $G(u)$. A menor distância da superfície transformada a origem das variáveis reduzidas é o índice de confiabilidade $\beta = \beta_{HL}$ (Fig. 1).

4 FORM (First Order Reliability Method)

Através do método FORM e do índice de confiabilidade de Hasofer e Lind (1974), é possível aproximar a probabilidade de falha na forma:

$$(2) \quad \rho_f = \Phi(-\beta_{HL})$$

onde $\Phi(\cdot)$ é a função de distribuição acumulativa de uma variável normal padrão. Nesse método, a função limite é aproximada pelo hiperplano tangente a superfície de estado limite no ponto de projeto.

5 MÉTODO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo é o mais robusto método de simulação em que amostras são geradas com respeito a função densidade de probabilidade de cada variável. Para cada amostra, a resposta do sistema é calculada. Um estimador da probabilidade de falha então é calculado por:

$$(3) \quad \tilde{p}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(X_i)$$

onde N é o número de amostras e o estimador $I(x)$ é calculado por:

$$(4) \quad I(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } g(x) \leq 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

o coeficiente de variação do estimador é dado por:

$$(5) \quad COV(\tilde{p}_f) = \sqrt{\frac{(1-p_f)}{p_f N}}$$

6 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

6.1 Estrutura analisada

De forma a ilustrar a metodologia proposta para estimativa dos níveis de segurança e ductilidade dos modelos de bielas e tirantes, um exemplo de uma viga parede de concreto armado é apresentado e analisado, considerando as orientações do código normativo ACI 318-05. A resistência à compressão do concreto tem seus valores incrementados para mostrar sua influência no comportamento do modelo. A geometria externa da viga parede usada nesse exemplo é mostrada na Figura 2.

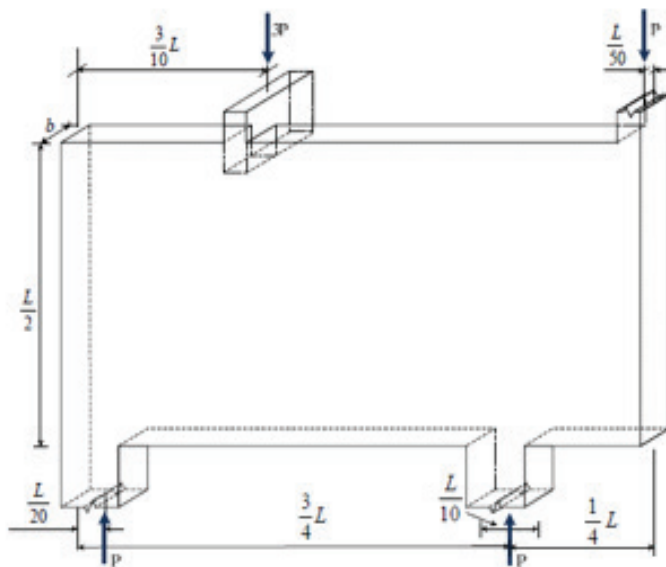


Figura 2
Dimensões e cargas utilizadas no exemplo de viga parede.
Fonte: autor (2011)

O projeto da viga parede utilizando um modelo treliça plana é apresentado na Figura 3. O modelo de bielas e tirantes é inicialmente aproximado pelo alinhamento das bielas e tirantes com o centroide da zona de compressão e das armaduras de tração dos tirantes.

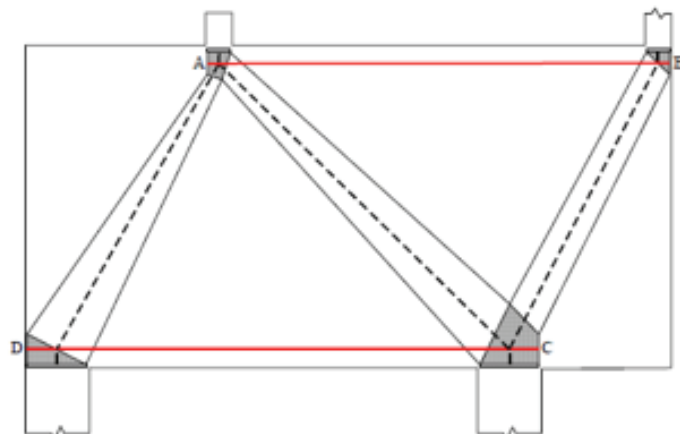


Figura 3
Modelo de bielas e tirantes baseado em otimização topológica.
Fonte: autor (2011)

A geometria nodal é baseada na dimensão dos cobrimentos, apoios e ângulos das bielas (Fig. 4). De acordo com o teorema do limite inferior da plasticidade (Livesley 1976), a capacidade do modelo de bielas e tirantes é sempre menor do que a capacidade real da estrutura uma vez que os seguintes requerimentos são obedecidos: o modelo está em equilíbrio, existente deformação plástica suficiente para distribuição de forças de acordo com o modelo assumido e as tensões aplicadas nos elementos não deverá exceder ao limite de escoamento ou a capacidade de fluxo plástico. Para obter as funções de estado, os modos de falha deverão ser identificados. Contudo, geralmente há vários modos de falha potenciais, no entanto, na maioria dos casos apenas uma pequena fração contribuirá significativamente para probabilidade de falha. Esses podem ser referidos como um sistema em falha do tipo em série e sua probabilidade de falha é estimada ter seu valor perto da resposta real.

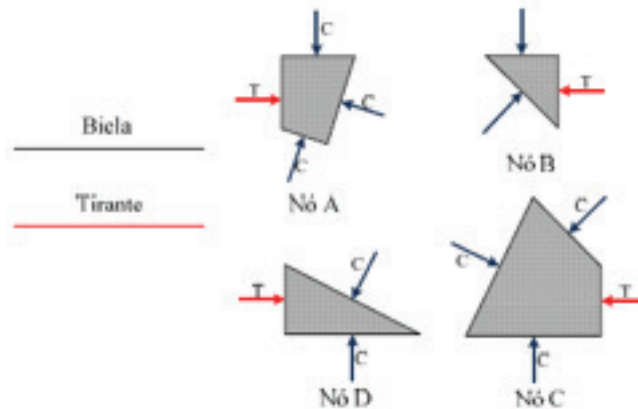


Figura 4
Representação do modelo de bielas e tirantes.
Fonte: autor (2011)

7 INCERTEZAS ALEATÓRIAS OU RANDÔMICAS

Muitos fenômenos e processos relativos ao interesse da engenharia contêm incertezas. Isso significa que resultados esperados são imprevisíveis (em algum grau). Problemas desse tipo são caracterizados por dados experimentais ou de campo que contêm uma significativa variabilidade representativa da incerteza natural intrínseca a esses fenômenos, isto é, as medidas observadas são diferentes em cada experimento mesmo se o experimento for conduzido ou medido em condições aparentemente idênticas. Mesmo dentro de um conjunto de valores observados ou medidos, certos valores poderão ocorrer mais frequentemente que outros. A variabilidade inerente nesse tipo de dado ou informação é estatística por natureza, e as realizações de um valor específico ou mesmo de um conjunto de valores envolve probabilidade.

Em geral, esse tipo de formulação é considerado através de variáveis básicas que são mais relevantes ao problema. Então, equações de estado limites específicas são desenvolvidas para representar cada modo de falha da estrutura. O cálculo do modelo para cada estado limite considerado deve conter um específico conjunto de variáveis básicas, ou seja, quantidades físicas que caracterizem ações e influências do meio ambiente, além de quantidades de materiais e geométricas. Considera-se que as variáveis básicas carreguem toda a informação necessária ao cálculo do modelo. Cada variável básica é definida pelo número de parâmetros do tipo, média, desvio padrão, tipo distribuição de probabilidade, parâmetros de correlação entre as variáveis, etc. Considerando o problema da viga parede apresentado, quatro variáveis básicas são consideradas: duas representando as incertezas devidas aos materiais (concreto e aço) e duas outras representando as incertezas devido aos carregamentos (permanente e acidental).

Na Tabela 1 os parâmetros estatísticos associados as variáveis básicas são mostrados. As orientações utilizadas nesse trabalho foram tiradas do JCSS 2001.

Tabela 1: Propriedades estatísticas do modelo.

Fonte: autor (2011)

Random variable	Distribuição	Média(KN)	δ
Carga Permanente	Normal	136	0,03
Carga Acidental	Gumbel	204	0,30
Resistência à Compressão - Concreto	Lognormal	$f_{cm}^{(*)}$	0,17
Tensão de Escoamento	Lognormal	41.2	0,05

(*) Variável

8 INCERTEZAS EPISTÊMICAS

Na engenharia, são muito utilizados, modelos idealizados do mundo real em nossas análises e estimativas, com propósito de tomar decisões ou planejamentos e desenvolvimento de critérios para projeto em sistemas estruturais. Esses modelos idealizados, que podem ser modelos matemáticos, de simulações ou mesmo de laboratório, são representações imperfeitas do mundo real.

Consequentemente, os resultados da análise, estimativa ou predição obtidos com base nesses modelos são imprecisos,

com algum grau de erro, logo contém incertezas. Esses tipos de incertezas são baseados no conhecimento e são denominadas de incertezas do tipo epistêmicas. Frequentemente, a incerteza epistêmica pode ser mais significativa do que a incerteza aleatória ou randômica. Uma vez feita a predição ou estimativa com um modelo idealizado, o objetivo é invariavelmente obter uma quantidade específica de interesse, que pode ser um valor médio ou valor mediano de uma variável. Sendo assim, na consideração da incerteza epistêmica é razoável na prática limitar nossas considerações de acurácia aos valores centrais estimados ou calculados, como valores médios ou medianos.

$$T = G(X_1, X_2, \dots, X_i)$$

onde T é o resultado do modelo, G é a função representativa do modelo e X_i as variáveis básicas do problema. De fato, a função representativa do modelo G normalmente será inexata. Então, a diferença entre a estimativa do modelo e a realidade do experimento pode ser escrita como se segue:

$$T = G'(X_1, \dots, X_i, \theta_1, \dots, \theta_j)$$

Os parâmetros denominados θ_j são referidos aos parâmetros que contêm as incertezas de modelo e das variáveis randômicas. Suas propriedades estatísticas são derivadas de experimentos ou observações. A média desses parâmetros deverá ser determinada desse modo, na média, com cálculo do modelo calibrado pelas estimativas obtidas via resultados experimentais. Na Tabela 2, os parâmetros referentes às incertezas epistêmicas consideradas no problema apresentado são mostrados. A metodologia proposta usa os valores de média e coeficiente de variação, obtidos por diversos pesquisadores, e mostrada por Park e Kuchma (2007) no cálculo da capacidade portante de viga paredes de 214 vigas paredes de concreto armado utilizando as orientações do código normativo americano ACI 318-05.

Tabela2: Incertezas epistêmicas do modelo. Fonte: autor (2011)

Variável Randômica	Distribuição	Média(KN)	δ
Incerteza da resistência	Normal	1,32 *	0,18 *
Incerteza do carregamento	Normal	1	0,05

* Obtido do modelo versus resultados experimentais sem coeficientes

9 METODOLOGIA DE ANÁLISE

A metodologia de análise desse trabalho foi planejada em dois passos. No primeiro, as condições de laboratório são simuladas de forma a comparar os resultados com os resultados obtidos pelos pesquisadores anteriormente. Os resultados referentes aos modos de falha são então checados e o modelo numérico estocástico calibrado. Isso significa que apenas as cargas permanentes foram consideradas sem nenhuma correção relativa ao seu valor médio, uma vez que o próprio valor representa sua média. Isso é possível uma vez que as condições de carregamento são controladas dentro do laboratório. Da mesma forma, as propriedades do concreto e do aço são utilizadas como valores médios uma vez que representam valores médios obtidos em testes de laboratório. Num segundo passo, as condições reais de projeto são aplicadas. Isso é feito via consideração de que a metade do carregamento é representada pelo carregamento acidental (distribuição normal) e a outra metade pelo carregamento acidental (distribuição Gumbel). Nesse caso, os valores característicos adotados pelas resistências e pelos carregamentos têm que ser corrigidos e seus correspondentes valores médios obtidos para cada tipo de distribuição. Nesse passo as orientações presentes no código probabilístico JCSS 2001 foram adotadas. Para isso, foram consideradas as incertezas de modelo apresentadas na Tabela 2. O método FORM foi utilizado inicialmente como uma primeira aproximação na determinação da probabilidade de falha. Em problema dessa natureza, quando um sistema em série ocorre e um número reduzido de graus de liberdade está envolvido, o método de simulação de Monte Carlo é a melhor escolha (precisão).

10 APLICAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÃO

Inicialmente um valor médio de 20 MPa para resistência à compressão média do concreto é adotado conjuntamente com uma taxa de armadura no valor de 0.06% de f_{hb} para os tirantes. O valor da altura da viga parede é $L/2$. Um modo de falha frágil foi obtido pelo modelo numérico. Além do mais, o modelo não obteve um nível de confiabilidade mínimo (Fig. 5). Essa observação é caracterizada pelos valores numéricos menores que 3.5 e 3.8 no gráfico (JCSS 2001). A taxa de armadura adotada foi obtida de forma iterativa. Esse procedimento foi necessário uma vez que não se tinha conhecimento do ponto de transição entre o modo de falha dúctil e frágil anteriormente. Essa região de transição é apresentada na Figura 6.

Depois disso, vários incrementos nos valores da espessura da

viga parede e do valor médio da resistência à compressão foram então feitos, no sentido de elevar o nível de segurança do modelo. A Figura 5 mostra que valores entre 55 e 60 cm acompanhados de uma resistência à compressão média acima de 28 MPa são os valores recomendados para projeto. Valores diferentes do intervalo entre 3.5 e 3.8 podem levar a modelos inseguros, ou mesmo a um aumento de custo devido a uma má utilização do material. A Figura 6 mostra como as relações de falha modificam com o acréscimo na resistência média do concreto. Os valores relativos aos modos de falha frágeis diminuem enquanto que os relativos os modos de falha dúcteis crescem. Uma constatação interessante é que os modos de falha são função apenas da taxa de armadura aditada para cada tirante. Uma vez que esses valores são definidos, as modificações de espessura irão influenciar apenas o índice de segurança do modelo e não mais seus aspectos de ductilidade.

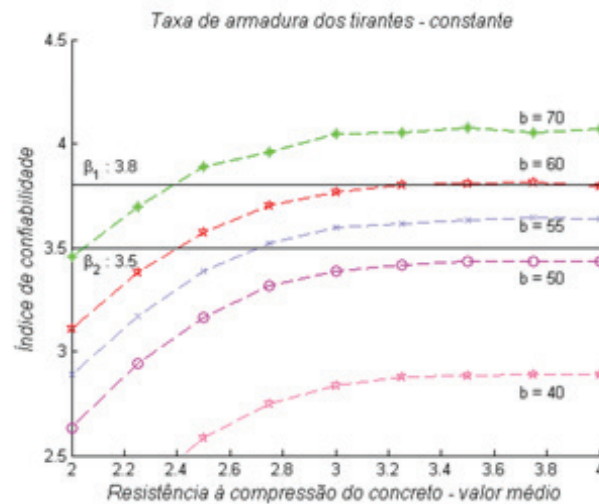


Figura 5
Nível de segurança do modelo. Fonte: autor (2011)

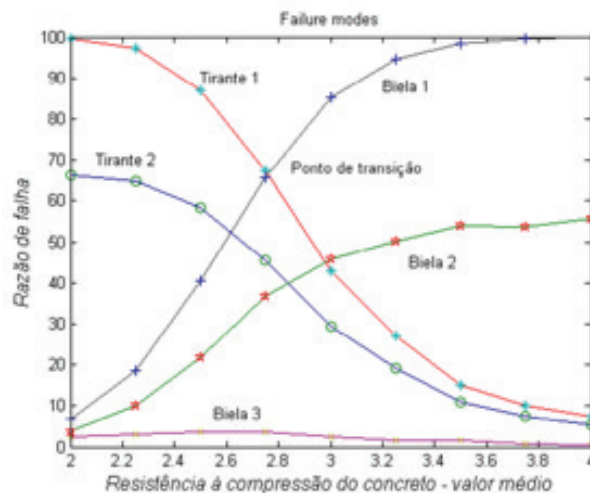


Figura 6
Modos de falha do modelo. Fonte: autor (2011)

Após o ponto de transição, referente ao modo de falha mais importante, o modelo passa a ter um modo de falha predominantemente dúctil. Isso significa que, o escoamento do aço ocorrerá antes do esmagamento do concreto nas bielas. De acordo com essa metodologia é possível assegurar aspectos de segurança e ductilidade a uma viga parede de concreto armado com base em três variáveis principais. Primeiro, é necessário encontrar uma taxa de armadura para os tirantes de modo que o ponto de transição seja determinado. Depois disso, um aumento gradual deverá ser feito na espessura e no valor da resistência à compressão até que o nível de segurança mínimo seja obtido.

11 REFERÊNCIAS

- ACI COMMITTEE 318 2007.** *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005, 430 pp. 666 ACI Structural Journal/November-December.
- ANG A. H-S., TANG W. H.** *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*. John Wiley & Sons. INC.2007, 2nd edition.
- BREITUNG K.** *Asymptotic approximations for multinormal integrals*. J Eng Mech ASCE 1984;110(3):357–66.
- CEB-FIP.** *CEB-FIP Model Code for Concrete Structures*, Comite Euro-International du Beton, Federation International de la Precontrainte, 1993.
- COLLINS M., KUCHMA D. A.,** *How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs and footings?.* ACI JOURNAL, Proceedings V. 96, No. 4, Oct. 1999, pp. 482-490.
- DER KIUREGHIAN A, DEStEFANO M.** *Efficient algorithm for second-order reliability analysis*. J Eng Mech ASCE 1991;117(12):2904–23.
- DER KIUREGHIAN A., HAUKAAS T., FUJIMURA, K.** *Structural reliability software at the University of California, Berkeley*, Structural Safety, 2006; 28:44–67.
- HASOFER AM, LIND NC.** *Exact and invariant second-moment code format*. J Eng Mech Div ASCE 1974;100(1):111–21.
- HWANG, S.-J.; LU, W.-Y.; AND LEE, H.-J.,** *Shear Strength Prediction for Deep Beams*, ACI Structural Journal, V. 97, No. 3, May-June 2000, pp. 367-376.

JCSS - PROBABILISTIC MODEL CODE. *The Joint Committee on Structural Safety.* The Probabilistic Model Code. 2001

PARK J.W., KUCHMA D. A., *Strut-and-Tie Model Analysis for Strength Prediction of Deep Beams,* ACI Structural Journal, V. 104, No. 6, November-December 2007, pp. 657-666.

ROGOWSKY, D. M.; MACGREGOR, J. G.; AND ONG, S. Y., *Tests of Reinforced Concrete Deep Beams,* ACI JOURNAL, Proceedings V. 83, No. 4, July-Aug. 1986, pp. 614-623.

SCHLAICH J, SCHÄFER K, JENNEWEIF M. *Toward a consistent design of strutural concrete.* PCI Journal 1987;32(3):74–147 [special report].

TVEDT L. *Distribution of quadratic forms in normal space: application to structural reliability.* Eng Mech ASCE 1990;116(6):1183–97.

QUINTERO-FEBRES, C. G.; PARRA-MONTESINOS, G.; AND WIGHT, J. K., *Strength of Struts in Deep Concrete Members Designed Using Strut-and- Tie Method,* ACI Structural Journal, V. 103, No. 4, July-Aug. 2006,pp. 577-586.

TAN, K. H.; KONG, F. K.; TENG, S.; AND GUAN, L., *High-Strength Concrete Deep Beams with Effective Span and Shear Span Variations,* ACI Structural Journal, V. 92, No. 4, July- Aug. 1995, pp. 395-405.

AGUILAR, G.; MATAMOROS, A. B.; PARRA-MONTESINOS, G.; RAMIREZ, J. A.; AND WIGHT, J. K., *Experimental Evaluation of Design Procedures for Shear Strength of Deep Reinforced Concrete Beams,* ACI Structural Journal, V. 99. No. 4, July-Aug. 2002, pp. 539-548.



ISBN: 978-65-84854-12-3

QRL



9 786584 854123