

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DOS MODOS DE FALHA DE
VIGAS MISTAS**

IZABELA DE FREITAS MOREIRA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DOS MODOS
DE FALHA DE VIGAS MISTAS**

IZABELA DE FREITAS MOREIRA

ORIENTADOR: FRANCISCO EVANGELISTA JUNIOR

CO-ORIENTADOR: JOÃO DA COSTA PANTOJA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO
CIVIL**

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO - 2017

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DOS MODOS DE FALHA
DE VIGAS MISTAS**

IZABELA DE FREITAS MOREIRA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

**Prof. Francisco Evangelista Junior, PhD (UnB)
(Orientador)**

**Prof. João da Costa Pantoja, Dr. (UnB)
(Co-orientador)**

**Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Adriano Todorovic Fabro, PhD (UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, NOVEMBRO DE 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

MOREIRA, IZABELA DE FREITAS

Análise de confiabilidade estrutural dos modos de falha de vigas mistas [Distrito Federal] 2017.

xv, 185p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2017). Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Viga mista aço-concreto | 4. Coeficiente parcial de segurança |
| 2. Análise de confiabilidade | 5. FORM |
| 3. Análise de sensibilidade | 6. Custo |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (Mestre) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOREIRA, I. de F. (2017). Análise De Confiabilidade Estrutural Dos Modos De Falha De Vigas Mistas. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação 27A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Izabela de Freitas Moreira.

TÍTULO: Análise De Confiabilidade Estrutural Dos Modos De Falha De Vigas Mistas.

GRAU: Mestre

NOVEMBRO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Izabela de Freitas Moreira

Brasília - Distrito Federal - Brasil.

izabeladefreitasmoreira@gmail.com

RESUMO

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DOS MODOS DE FALHA DE VIGAS MISTAS

Autor: Izabela de Freitas Moreira

Orientador: Francisco Evangelista Junior, PhD

Co-orientador: João da Costa Pantoja, Dr

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Novembro de 2017

Esse trabalho apresenta um estudo do comportamento dos modos de falha de vigas mistas aço concreto, considerando o dimensionamento apresentado pela ABNT NBR 8800:2008. O método utilizado é probabilístico, pois considera os aspectos randômicos das principais variáveis aleatórias envolvidas em problemas dessa natureza. Na obtenção dos índices de confiabilidade de cada modo de falha, é utilizado o método FORM, presente na confiabilidade estrutural. O principal objetivo da pesquisa é quantificar o nível de segurança de cada modo de falha das vigas mistas, verificando quais desses modos governam o comportamento mecânico da estrutura. Um estudo dos principais parâmetros envolvidos é feito via análise de sensibilidade, tanto para a formulação pura, sem utilização dos coeficientes parciais de segurança, quanto para a formulação modificada por esses coeficientes. Além disso, é avaliada a influência da variação de determinados parâmetros de projeto no índice de confiabilidade. Aborda-se também a questão da calibração dos coeficientes parciais de segurança que atuam na minoração das cargas. Com isso, realiza-se a comparação do índice de confiabilidade de diferentes normas em função dos valores desses coeficientes adotados por cada uma. Por fim, realizou-se a análise do custo de vigas mistas com diferentes graus de conexão e a variação do índice de confiabilidade em função desses graus de conexão. Alguns exemplos práticos são mostrados de modo a exemplificar a metodologia utilizada. Os principais resultados mostram que os fatores de segurança alteram os modos de falha que governam o comportamento da estrutura, alterando os níveis de segurança e os tipos de ruptura das vigas mistas, sendo que o modo de falha mais afetado é o deslocamento no meio do vão seguido do fluxo cisalhante. Em relação a calibração, o que se percebe é que há diferentes combinações entre os fatores de segurança de cada tipo de carga que levam ao mesmo índice de confiabilidade. Nota-se também que os fatores de segurança adotados pelas normas brasileira, norte americana e européia levam a índices de confiabilidade próximos. Além disso, pode-se concluir que o pequeno ganho econômico que se tem reduzindo o grau de conexão não se equilibra com a grande perda no nível de segurança da estrutura, ressaltando a importância da adaptação das técnicas construtivas em relação aos materiais disponíveis no mercado de cada região.

Palavras chave: Viga mista aço-concreto; Análise de confiabilidade; Análise de sensibilidade; Coeficiente parcial de segurança; FORM; Custo.

ABSTRACT

STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS OF COMPOSITE BEAM FAILURE MODES

Author: Izabela de Freitas Moreira

Supervisor: Francisco Evangelista Junior, PhD

Co-supervisor: João da Costa Pantoja, Dr

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, November 2017

This work presents a study the behavior of steel-concrete composite beam failure modes. The beams are designed according to Brazilian codes ABNT NBR 8800:2008. The method used is probabilistic. It considers the random aspects of the main random variables involved in problems like this. The method FORM, from the structural reliability, is used to obtain the reliability indexes of each failure mode. The main objective of the research is to quantify the safety level of each composite beam failure mode to verify which of these modes rule the structural mechanical behavior. In addition, a study of the main parameters is done by sensitivity analysis for the pure formulation, without using the partial safety factors, and for the formulation modified by these partial safety factors. Moreover, the influence of the variation of some design parameters on the reliability index is evaluated. It also addresses the issue of the calibration of the partial safety coefficients that act in the reduction of loads. Thus, the reliability indexes from different standards is compared according to the values of these coefficients adopted by each one. Finally, the analysis of the cost of composite beams with different degrees of connection and the variation of the reliability index in function of these connection degrees was carried out. Some practical examples are shown in order to exemplify the methodology proposed. The main results show that the safety coefficients change the failure modes that rule the behavior of the structure, affecting the safety levels and the types of composite beams rupture. The most affected failure mode is the displacement in the middle of the span followed by the shear flow. Regarding the calibration, it can be noticed that there are different combinations between the safety coefficients of each type of load that lead to the same reliability index. It is also noted that the safety coefficients adopted by Brazilian, North American and European standards lead to close reliability indexes. In addition, it can be concluded that the small economic gain from the reduction of the degree of connection does not balance with the great loss in the level of safety of the structure, emphasizing the importance of the adaptation of the constructive techniques in relation to the materials available in the market of each region.

Keywords: Composite steel-concrete beam; Reliability analysis; Sensitivity analysis; Safety factor; FORM; Cost.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURA.....	11
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJETIVOS.....	3
1.1.1 - Objetivo geral	3
1.1.2 - Objetivos específicos.....	4
1.2 - ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
2 - VIGA MISTA.....	6
2.1 - CONCEITOS BÁSICOS	6
2.1.1 - Grau de interação.....	7
2.1.2 - Conectores de cisalhamento	9
2.1.3 - Grau de conexão	10
2.1.4 - Largura efetiva.....	12
2.1.5 - Escoramento	13
2.2 - DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL	14
2.3 - RESISTÊNCIA DA VIGA MISTA AO MOMENTO FLETOR.....	16
2.3.1 - Momento resistente positivo de vigas com seção de aço compacta e com ligação total	16
2.3.2 - Momento resistente positivo de vigas com seção de aço compacta e com ligação parcial	19
2.3.3 - Momento resistente positivo de vigas com seção de aço compacta não escorada	20
2.4 - RESISTÊNCIA DA VIGA MISTA AO ESFORÇO CORTANTE.....	20
2.5 - ARMADURAS TRANSVERSAIS NA LAJE	20
2.6 - RESISTÊNCIA DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO	22
2.7 - VERIFICAÇÕES NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO.....	24
2.7.1 - Deslocamentos excessivos.....	24
2.7.2 - Controle de fissuras do concreto em vigas mistas.....	25

3 - VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL VIA CONFIABILIDADE

27

3.1 -	SEGURANÇA ESTRUTURAL	29
3.2 -	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE.....	29
3.3 -	VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	32
3.4 -	PROBABILIDADE DE FALHA E ÍNDICE DE CONFIABILIDADE.....	34
3.5 -	MÉTODOS DE ANÁLISE	38
3.5.1 -	Método - FORM	38
3.5.2 -	Método de Simulação de Monte Carlo.....	43
3.6 -	PROBABILIDADE DE FALHA DE SISTEMAS	45
3.7 -	CALIBRAÇÃO DE CÓDIGOS NORMATIVOS	47
3.7.1 -	Calibração dos coeficientes parciais de segurança	48
3.7.2 -	Geração da superfície de resposta	48
3.7.3 -	Polinômios interpoladores de Lagrange	49
3.8 -	PESQUISAS RECENTES	50

4 - METODOLOGIA..... 54

4.1 -	ESTUDO DE CASO 1: VIGA ESCORADA	56
4.2 -	ESTUDO DE CASO 2: VIGA NÃO ESCORADA.....	58
4.3 -	ESTUDO DE CASO 3: VIGA COM DIFERENTES CONECTORES.....	60
4.4 -	FUNÇÕES DE FALHA	63
4.4.1 -	Momento fletor	66
4.4.2 -	Momento fletor na etapa construtiva.....	67
4.4.3 -	Esforço cortante.....	67
4.4.4 -	Resistência dos Conectores	68
4.4.5 -	Fluxo cisalhante.....	69
4.4.6 -	Deslocamento	70
4.4.7 -	Sistema	71

5 - RESULTADOS 73

5.1 -	VERIFICAÇÃO DO MÉTODO FORM.....	73
5.2 -	FATORES DE IMPORTÂNCIA PROBABILÍSTICOS	74
5.3 -	INFLUÊNCIA DOS FATORES DE SEGURANÇA	78

5.4 -	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	83
5.4.1 -	Altura da laje, h_c	83
5.4.2 -	Resistência do concreto, f_c	84
5.4.3 -	Largura efetiva, b	85
5.4.4 -	Percentual de carga permanente, X	86
5.4.5 -	Correlação, ρ_{q,f_y}	88
5.5 -	CALIBRAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA	88
5.6 -	CUSTO-BENEFÍCIO DO GRAU DE CONEXÃO	96
6 -	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
6.1 -	CONCLUSÕES.....	101
6.2 -	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS DA LITERATURA	103
	APÊNDICE I - VIGA ESCORADA.....	110
	APÊNDICE II - VIGA NÃO ESCORADA	148
	APÊNDICE III - VIGA COM DIFERENTES CONECTORES.....	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros das variáveis aleatórias.	34
Tabela 3.2 - Relação entre β , P_f e classes de consequência.	37
Tabela 4.1 - Fatores de segurança.	56
Tabela 4.2 - Cargas atuantes na viga do estudo de caso 1.	57
Tabela 4.3 - Variáveis aleatórias do estudo de caso 1.	58
Tabela 4.4 - Variáveis determinísticas do estudo de caso 1.	58
Tabela 4.5 - Cargas atuantes na viga do estudo de caso 2.	59
Tabela 4.6 - Variáveis aleatórias do estudo de caso 2.	60
Tabela 4.7 - Variáveis determinísticas do estudo de caso 2.	60
Tabela 4.8 - Cargas atuantes no estudo de caso 3.	61
Tabela 4.9 - Variáveis aleatórias do estudo de caso 3.	61
Tabela 4.10 - Variáveis determinísticas do estudo de caso 3.	62
Tabela 4.11 - Composição de custo com conector do tipo <i>stud</i>	62
Tabela 4.12 - Composição de custo com conector do tipo perfil U.	63
Tabela 5.1 - Conector pino com cabeça: β dos modos de falha da viga com diferentes η	97
Tabela 5.2 - Conector perfil U: β dos modos de falha da viga com diferentes η	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos mais usuais de viga mista aço-concreto (adaptado de Malite, 1990)...	6
Figura 2.2 - Distribuição das deformações segundo o grau de interação (adaptado de Cavalcante, 2010).	8
Figura 2.3 - Vigas mistas fletidas (adaptado de David, 2007).....	8
Figura 2.4 - Tipos usuais de conectores (adaptado de Malite, 1990).	9
Figura 2.5 - Curva força x Escorregamento para conectores de cisalhamento (adaptado de Alva e Malite, 2005).	10
Figura 2.6 - Forças resultantes numa ação mista (Cavalcante, 2010).....	11
Figura 2.7 - Gráficos de tensão e deformação de uma viga mista, considerando o grau de conexão (adaptado de Oehlers e Bradford, 1995).....	11
Figura 2.8 - Distribuições das tensões longitudinais na laje considerando o efeito <i>shear lag</i> (adaptado de Alva, 2000).....	12
Figura 2.9 - Construção escorada (adaptado de Costa, 2005).....	13
Figura 2.10 - Construção não escorada (adaptado de Costa, 2005).....	14
Figura 3.1 - Domínios de falha.	31
Figura 3.2 - Índice de confiabilidade no espaço normalizado (Pantoja, 2012).....	36
Figura 3.3 - Relação β e P_f	36
Figura 3.4 - Representação gráfica do método FORM (adaptado de Pantoja, 2012).	39
Figura 3.5 - Representação de sistemas (Nowac e Collins, 2000).....	46
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.	54
Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.	55
Figura 4.3 - Viga mista do estudo de caso 1: (a) Vista tridimensional; (b) Vista superior.	57
Figura 4.4 - Viga mista do estudo de caso 2: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral; e (c) Vista superior.	59
Figura 4.5 - Viga mista do estudo de caso 3: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral; e (c) Vista superior.	61
Figura 4.6 - Viga mista biapoiada com carga distribuída Q e vão L.	65
Figura 4.7 - Flexão.	66
Figura 4.8 - Flexão na etapa construtiva.	67
Figura 4.9 - Representação ilustrativa da falha devido o esforço cortante.	68

Figura 4.10 - Cisalhamento no conector tipo perfil U laminado.	69
Figura 4.11 - Falha nos conectores devido	69
Figura 4.12 - Fluxo cisalhante na laje de concreto.	70
Figura 4.13 - Deslocamento no meio do vão.	70
Figura 4.14 - Função de falha do sistema.	72
Figura 5.1 - Comparação FORM e Monte Carlo: (a) Momento fletor viga escorada com conector <i>stud</i> ; (b) Resistência dos conectores viga não escorada; (c) Deslocamento viga não escorada.....	73
Figura 5.2 - Fatores de importância probabilísticos para a função de falha momento fletor: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.	74
Figura 5.3 - Fatores de importância probabilísticos para a função de falha esforço cortante: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.	75
Figura 5.4 - Fatores de importância probabilísticos para a função de falha resistência dos conectores: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.	75
Figura 5.5 - Fatores de importância probabilísticos para a função de falha fluxo cisalhante: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.	76
Figura 5.6 - Fatores de importância probabilísticos para a função de falha deslocamento: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.	77
Figura 5.7 - Fatores de importância probabilísticos das variáveis aleatórias considerando os fatores de segurança: (a) Momento fletor; (b) Esforço cortante; (c) Resistência dos conectores; (d) Fluxo cisalhante.	78
Figura 5.8 - Influência do fator de segurança no índice de confiabilidade: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.	79
Figura 5.9 - Influência dos fatores de segurança nos modos de falha da viga escorada: (a) Sem considerar os coeficientes segurança; (b) Considerando os fatores de segurança...	80
Figura 5.10 - Influência dos fatores de segurança nos modos de falha da viga não escorada: (a) Sem considerar os coeficientes segurança; (b) Considerando os fatores de segurança.	81
Figura 5.11 - Influência dos fatores de segurança no sistema da viga escorada: (a) Sem considerar os coeficientes segurança; (b) Considerando os fatores de segurança.	82
Figura 5.12 - Influência dos fatores de segurança no sistema da viga não escorada: (a) Sem considerar os coeficientes segurança; (b) Considerando os fatores de segurança...	82
Figura 5.13 - Relação $\beta \times h_c$ para η : (a) 100%; (b) 80%; (c) 60%; (d) 40%.....	83

Figura 5.14 - Relação β x f_c para η : (a) 100%; (b) 80%; (c) 60%; (d) 40%.....	85
Figura 5.15 - Relação β x b para η : (a) 100%; (b) 80%; (c) 60%; (d) 40%.....	86
Figura 5.16 - Relação β x X para $\eta=100\%$: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada...	87
Figura 5.17 - Relação β x X para η : (a) 80%; (b) 40%.....	87
Figura 5.18 - Relação β x $\rho_{q,fc}$ para a viga escorada.....	88
Figura 5.19 - Gráfico do β da função G_M : (a) Superfície de resposta; e (b) Curva de nível.....	90
Figura 5.20 - Gráfico do β da função G_V : (a) Superfície de resposta; e (b) Curva de nível.....	91
Figura 5.21 - Gráfico do β da função G_A : (a) Superfície de resposta; e (b) Curva de nível.....	93
Figura 5.22 - Gráfico do β da função G_{SS} : (a) Superfície de resposta; e (b) Curva de nível.....	94
Figura 5.23 - Gráfico do β da função G_{SS} : (a) Superfície de resposta; e (b) Curva de nível.....	95
Figura 5.24 - Relação η x CR x β viga com conector tipo pino com cabeça: (a) G_M ; (b) G_V ; (c) G_C ; (d) G_A	98
Figura 5.25 - Relação η x CR x β viga com conector tipo perfil U: (a) G_M ; (b) G_V ; (c) G_C ; (d) G_A	99
Figura 5.26 - Relação η x CR x β para a viga com conector perfil U: (a) G_{SH1} ; (b) G_{SP}	100

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
CEN	Comité Europeu de Normalização
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EUROCODE	Norma Européia
FERUM	<i>Finite Element Reliability Using Matlab</i>
FORM	<i>First-Order Reliability Methods</i> (Método de Confiabilidade de Primeira Ordem)
HLRF	Hasofer e Lind e Rackwitz e Fiessler
IFMA	<i>Institut Français de Mécanique Avancée</i>
JCSS	<i>Joint Committee on Structural Safety</i>
LN	Linha neutra plástica
LRFD	<i>Load and Resistance Factor Design</i>
MPP	<i>Most Probable Point</i>
NBR	Norma Brasileira
UCB	Universidade da Califórnia em Berkeley
f_u	Tensão última
R	Resistência à compressão do concreto
T	Resistência à tração do perfil metálico
Fsh	Resistência de conexão desempenhada pelos conectores
R_n	Resistência estrutural
R_d	Resistência de projeto
Q_n	Cargas
S_d	Cargas de projeto
ϕ	Fatores de segurança de minoração da resistência
γ	Fatores de segurança de majoração das cargas
b	Largura efetiva da laje
P_f	Probabilidade de falha

C	Confiabilidade
X	Variável aleatória
G(X)	Função de falha
$f_x(x)$	Função conjunta de densidade de probabilidades
D_f	Domínio de falha
β	Índice de confiabilidade
S	Carregamento
R	Resistência
M	Margem de segurança
μ	Média
σ	Desvio padrão
Y	Distribuição normalizada
Φ	Distribuição de probabilidade normal padrão acumulada
CC1	Classe de consequência 1
CC2	Classe de consequência 2
CC3	Classe de consequência 3
RC1	Classe de confiabilidade 1
RC2	Classe de confiabilidade 2
RC3	Classe de confiabilidade 3
U	Variáveis no espaço normalizado padrão
U^*	Ponto de projeto
J	Jacobiano da transformação
L	Matriz triangular inferior obtida pela decomposição de Cholesky
ρ_{ij}	Coefficiente de correlação entre as variáveis X_i e X_j .
$\nabla G(U^k)$	Gradiente da função de falha no espaço reduzido
α_i	Cosseno diretor com relação a variável X_i do vetor normal à superfície de falha no ponto de projeto e no espaço das variáveis reduzidas
ζ_i	Fator de importância
$F_X(x)$	Função de distribuição
x	Valores amostrais

T	Vetor de transformação
Z	Valores simulados das variáveis no espaço normal e sem correlação
N	Número total de simulações
n	Número de ocorrência de falhas
g	Valor do efeito de ação permanente
q	Valor do efeito de ação variável
γ_g	Coefficiente parcial de segurança referente a carga permanente
γ_q	Coefficiente parcial de segurança referente a carga variável
L	Tamanho do vão
Q	Carregamento da viga
d_s	Distância entre o centro de gravidade e o topo do perfil de aço
C_a	Resultante de compressão no aço
A_s	Área de armadura
f_{sk}	Resistência característica do aço da armadura
γ_s	Coefficiente parcial de segurança do aço da armadura
f_{yk}	Resistência característica do aço
f_y	Resistência média do aço
γ_{a1}	Coefficiente parcial de segurança do aço
h	Altura do perfil de aço
h_c	Altura da laje de concreto
γ_c	Coefficiente parcial de segurança do concreto
f_{ck}	Resistência característica do concreto
f_c	Resistência média do concreto
Z	Módulo de resistência plástico
t_0	Espessura da alma do perfil
η	Grau de conexão
n	Número de conectores
Q_n	Resistência nominal do conector
Q_{Rd}	Resistência dos conectores
Q_{Sd}	Solicitação dos conectores

A	Área de aço
y_c	Distância do centro geométrico da parte comprimida da seção da viga de aço até a face superior dessa viga
y_t	Distância do centro geométrico da parte tracionada da seção da viga de aço até a face inferior dessa viga
A_w	Área da alma do perfil
A_f	Área da mesa do perfil
t_f	Espessura da mesa do perfil
t_w	Espessura da alma do perfil
t_{fcs}	Espessura da mesa do perfil U
t_{wcs}	Espessura da alma do perfil U
L_{cs}	Comprimento do conector
E_s	Módulo de elasticidade do aço
γ_{cs}	Coefficiente parcial de segurança do aço do conector
A_{cs}	Área da seção transversal do conector
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
R_g	Coefficiente para a consideração do efeito de atuação de grupos de conectores
R_p	Coefficiente para consideração da posição do conector
f_u	Resistência à ruptura do aço do conector
γ_s	Coefficiente parcial de segurança do aço da armadura da laje
A_{blc}	Área da seção transversal da região comprimida da laje de concreto entre o plano de cisalhamento considerado e a linha de centro da viga
A_{cv}	área de cisalhamento do concreto no plano considerado
$A_{smín}$	área de armadura transversal mínima
I	Momento de inércia
I_a	Momento de inércia da seção do perfil de aço isolado
I_{ef}	Momento de inércia efetivo
Ψ_2	Fator de redução de ações
$f(x)$	Função contínua
$\emptyset(x)$	Função aproximadora
$Y_i(x)$	Polinômios de Lagrange

b	Largura efetiva da laje
x	Posição da linha neutra
X	Parcela de carga permanente em relação a carga total
M_{Rd}	Momento resistente de projeto
M_{Sd}	Momento solicitante de projeto
MC_{Rd}	Momento resistente de projeto na etapa construtiva
MC_{Sd}	Momento solicitante de projeto na etapa construtiva
V_{Rd}	Cortante resistente de projeto
V_{Sd}	Cortante solicitante de projeto
A_{Rd}	Fluxo cisalhante resistente de projeto
A_{Sd}	Fluxo cisalhante solicitante de projeto
G_M	Modo de falha momento fletor
G_{MC}	Modo de falha momento fletor na etapa construtiva
G_V	Modo de falha esforço cortante
G_C	Modo de falha conectores
G_A	Modo de falha fluxo cisalhante
G_δ	Modo de falha deslocamento no meio do vão
G_{SS}	Modo de falha do sistema em série
G_{SP}	Modo de falha do sistema em paralelo
G_{SH1}	Modo de falha do sistema híbrido 1
G_{SH2}	Modo de falha do sistema híbrido 2
Qtd	Quantidade

1 - INTRODUÇÃO

A engenharia civil busca conciliar a segurança, as boas condições de uso, e a viabilidade econômica das edificações. Para isso, a estrutura de uma edificação deve ser capaz de sustentá-la, suportando os carregamentos impostos e impedindo seu colapso durante sua vida útil. Além disso, para que se tenha boas condições de utilização, a estrutura deve ser capaz de suportar tais carregamentos sem gerar desconforto aos seus usuários, por exemplo, vibrações ou deformações excessivas.

As normas de projeto procuram atender tais requisitos, realizando a uniformização dos critérios de dimensionamento de determinado tipo de estrutura a fim de simplificar o processo de dimensionamento estrutural.

Segundo Galambos (1992), a conformidade de um projeto estrutural com a sua respectiva norma garante a segurança estrutural de determinada construção, que significa que a chance de ocorrer uma falha é pequena e, portanto, aceitável.

As normas brasileiras voltadas para projeto estrutural se baseiam no método dos estados limites. Neste método, as incertezas inerentes aos carregamentos e à resistência dos materiais são indiretamente consideradas através do uso de coeficientes parciais de segurança, os quais devem garantir o nível de segurança aceitável para a estrutura.

O estudo da confiabilidade estrutural visa analisar a probabilidade do sistema estrutural atender aos seus estados limites, os quais se dividem em estado limite último e estado limite de serviço. O estado limite último compreende o colapso estrutural ou a falha de parte do sistema estrutural. Enquanto, o estado limite de serviço compreende o mal funcionamento do uso da estrutura. O projetista deve definir os estados limites relevantes ao sistema estrutural, para que se possa avaliar o nível de segurança desse sistema. Para isso, deve-se identificar as incertezas presentes no projeto.

Segundo Melchers (1981), a identificação de todas as incertezas envolvidas em um projeto estrutural é inviável, pois elas envolvem aspectos de avaliação, relativos à definição de desempenho estrutural e caracterização dos estados limites; do modelo, relativa às considerações de hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos estruturais e métodos simplificados de análise; devidos a fatores humanos, associados a erros

humanos; físicos, associados à aleatoriedade inerentes ao projeto como o valor das propriedades físicas, da geometria, do carregamento; e estatísticos, advindos de pouca informação para estimar as características das variáveis.

Um dos fatores que influenciam na abrangência dessas incertezas é a quantidade de informações disponíveis sobre as variáveis aleatórias envolvidas no problema. Esse fator divide os métodos de confiabilidade estrutural em quatro níveis. Os métodos do nível 0 usam o formato de tensões admissíveis, no qual se utiliza apenas um fator de segurança para as tensões elásticas. Os métodos do nível I empregam um valor característico para cada variável incerta, com os formatos do tipo do Método dos Estados Limites. Os métodos do nível II utilizam dois parâmetros estatísticos para cada variável incerta e uma medida da correlação entre parâmetros. E os métodos do nível III utilizam a função densidade de probabilidade das variáveis incertas para determinar a probabilidade de falha da estrutura.

Atualmente, vem sendo reconhecido internacionalmente que a maneira mais racional de avaliar a segurança de uma estrutura é avaliá-la probabilisticamente. Um exemplo dessa avaliação probabilística pode ser vista na calibração dos coeficientes parciais de segurança utilizados nos métodos de nível I, a qual tem sido realizada utilizando os métodos de confiabilidade de níveis II e III. Essa aplicação é vista, na Europa, com os EUROCODES, nos Estados Unidos, com o *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) estabelecido pelo *American Institute of Steel Construction* (AISC) e, no Brasil, em suas normas que utilizam o Método dos Estados Limites.

Contudo, não há muitos estudos nesse campo da avaliação probabilística de alguns sistemas estruturais. Por exemplo, há pouca informação sobre o grau de segurança das vigas mistas projetadas segundo as normas brasileiras. Alguns estudos mostram a confiabilidade de modos de falha específicos de elementos estruturais em diferentes materiais, por exemplo, Castanheira (2004) apresenta a avaliação da confiabilidade de vigas metálicas, para o estado limite de flexão, projetadas segundo a ABNT NBR 8800, indicando a variabilidade encontrada no índice de confiabilidade. Souza (2011) apresentou a confiabilidade de vigas de concreto armado reforçadas à torção com compósito de fibra de carbono. O trabalho de Santos et al. (2014) apresentam uma investigação da segurança de elementos estruturais submetidos à flexão simples, em

concreto armado, em aço e em material misto, e dimensionados segundo as normas brasileiras, buscando comparar a confiabilidade dos elementos estruturais em diferentes materiais.

No cenário internacional tem se o estudo de Shao et al. (2015) a respeito da determinação estatística da resistência de vigas mistas. Holicky e Markova (2006) estudaram o nível de segurança de estruturas de concreto dimensionadas segundo os EUROCODES. Xing et al. (2016) analisou o desempenho de vigas mistas utilizando concreto com adição de borracha. Zhao et al. (2012) analisou a resposta não-linear das vigas mistas.

Outros estudos abordam a resistência de vigas mistas a situações de incêndio, Kirchof (2004) e Rocha (2012). Há ainda estudos sobre novas possibilidades de tipo de conectores, Cavalcante (2010), Rodrigues et. al. (2017), Le et al. (2016) e Chater (2015). Outra vertente busca validar os parâmetros analisados numericamente a partir de resultados experimentais, Chung et al. (2016), Kumar e Reddy (2016), Leaf e Laman (2013), Zhao e Yuan (2010).

Esses estudos não mostram análises de todos os modos de falha do elemento estrutural e nem o impacto dos coeficientes parciais de segurança na confiabilidade desses elementos, como é proposto neste estudo. Portanto, utilizando o método FORM, este trabalho apresenta a confiabilidade dos diferentes modos de falha de uma viga mista e o impacto dos coeficientes parciais de segurança na confiabilidade dos modos de falha das vigas mistas dimensionadas segundo a ABNT NBR 8800:2008. Este estudo apresenta ainda o nível de segurança de vigas mistas para diferentes combinações do coeficientes parciais de segurança dos carregamentos presentes nesse sistema estrutural. E, por fim, apresenta-se o índice de confiabilidade de diferentes graus de interação e o seu respectivo custo, a fim de evidenciar a relação entre segurança e viabilidade econômica dos possíveis graus de conexão do sistema estrutural em estudo.

1.1 - OBJETIVOS

1.1.1 - Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é a análise da confiabilidade estrutural de vigas

mistas, considerando diferentes equações de desempenho determinadas segundo a ABNT NBR 8800:2008, a fim de contribuir para o aperfeiçoamento dos critérios de dimensionamento adotados.

1.1.2 - Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento estrutural, bem como a confiabilidade estrutural de vigas mistas, afim de verificar a influência do grau de interação entre o aço e o concreto nos modos de falha da estrutura.
- Analisar a probabilidade de falha de vigas mistas via formulação segundo a norma ABNT NBR 8800:2008 considerando distribuições específicas para cada variável aleatória envolvida no cálculo.
- Analisar os modos de falha da estrutura, tanto para o Estado Limite Último quanto para o Estado Limite de Serviço, avaliando o índice de confiabilidade da estrutura para cada um deles.
- Analisar a sensibilidade do sistema estrutural e dos seus modos de falha via probabilidade de falha a fim de verificar o nível de segurança do dimensionamento.
- Analisar a confiabilidade do sistema considerando diferentes associações entre as funções desempenho.
- Avaliar o ganho de confiabilidade gerado pelo uso dos fatores de segurança.
- Analisar os coeficientes propostos pela norma, propondo a calibração dos mesmos para otimização do processo de dimensionamento da estrutura.
- Otimizar o custo da estrutura para diferentes graus de interação com o índice de confiabilidade esperado.

1.2 - ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa está dividida em 6 capítulos. Capítulo 1 dedicado à introdução e aos objetivos da pesquisa. O capítulo 2 apresenta os conceitos sobre vigas mistas. O terceiro

aborda a confiabilidade estrutural e detalhes de sua aplicação na pesquisa. O quarto apresenta a metodologia da calibração dos coeficientes. O quinto apresenta a metodologia geral do trabalho. O sexto traz os resultados obtidos no estudo. Por fim, o capítulo 6 traz as principais considerações deste trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros. E, no apêndice, são apresentados os dados utilizados na obtenção dos gráficos apresentados.

2 - VIGA MISTA

Este capítulo apresenta conceitos relevantes sobre viga mista aço concreto que é o objeto de estudo dessa pesquisa. É mostrado também, um breve histórico da evolução do dimensionamento estrutural.

2.1 - CONCEITOS BÁSICOS

Viga mista aço-concreto é uma viga formada pela associação de um perfil metálico com uma laje de concreto, sendo que os dois elementos são ligados por conectores mecânicos. A Figura 2.1 mostra alguns tipos de vigas mistas.

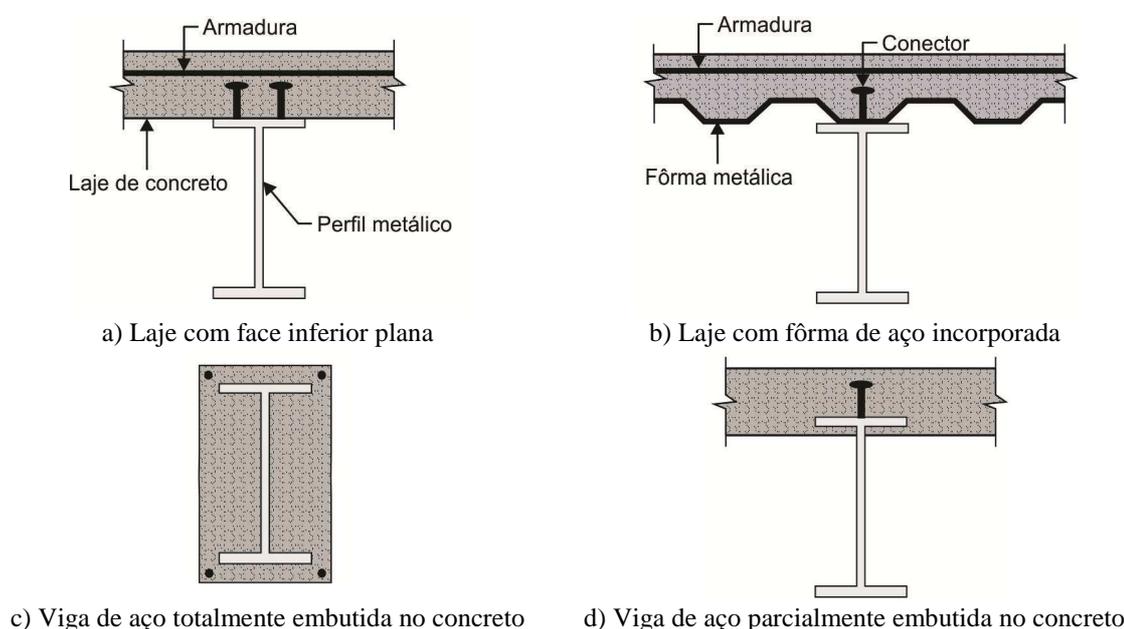


Figura 2.1 - Tipos mais usuais de viga mista aço-concreto (adaptado de Malite, 1990).

As vigas mistas passaram a ter grande utilização após a II Guerra Mundial. Anteriormente, empregavam-se vigas metálicas com lajes de concreto, sem considerar no cálculo a participação da laje no trabalho da viga. A carência de aço após a guerra levou os engenheiros europeus a utilizar a laje de concreto como parte componente do vigamento, iniciando-se pesquisas sistemáticas que esclareceram o comportamento da viga mista para esforços estáticos e cíclicos. No Brasil, as vigas mistas foram normatizadas pela primeira vez em 1986 pela ABNT NBR 8800:1986 “Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios”, a qual aborda o dimensionamento e execução desses elementos. Na norma ABNT NBR 8800:2008 é abordada no anexo O.

A principal vantagem desse sistema nas regiões de momento positivo em relação as vigas de aço isoladas é que a flambagem local da mesa e a flambagem local da alma, bem como a flambagem lateral com torção, são impedidas ou mitigadas. Além disso, tem-se o acréscimo de resistência e de rigidez propiciados pela associação dos elementos de aço e de concreto, possibilitando a redução da altura dos elementos estruturais, que resulta em economia de material. Destacam-se ainda por serem ótimas soluções para proteção contra fogo e corrosão, visto que o concreto protege o aço e por possibilitarem o não escoramento da laje, aumentando a velocidade de construção.

As vigas mistas podem ser simplesmente apoiadas, o que é mais usual, ou podem ser contínuas. As simplesmente apoiadas contribuem para a maior eficiência do sistema misto, pois a viga de aço trabalha predominantemente à tração e a laje à compressão. As vigas contínuas, devido à presença de momentos fletores negativos, apresentam um comportamento estrutural diferente das simplesmente apoiadas. Embora a presença exclusiva de momentos fletores positivos contribua para a maior eficiência do sistema misto, deve-se notar que a continuidade das vigas traz vantagens sob o ponto de vista de estabilidade global da estrutura, devido ao efeito de pórtico.

2.1.1 - Grau de interação

A eficiência do sistema misto se dá pela otimização do uso de cada material que o compõe. Visto que as vigas mistas têm esforços de compressão atuando predominantemente em suas fibras superiores, laje de concreto, e esforços de tração atuando predominantemente nas fibras inferiores, perfil metálico. Com isso, e sabendo-se que o aço e o concreto possuem propriedades mecânicas diferentes, observa-se o comportamento diferenciado de tais materiais em sua interface e a tendência ao deslizamento da laje sobre o perfil, provocando uma tensão de cisalhamento na região da interface e a possibilidade de deslocamento da laje. Tal deslocamento é dado em função do grau de interação entre o aço e o concreto, que pode variar de nulo, seções híbridas, a total, seções mistas, conforme ilustrado na Figura 2.2. Caso seja nulo, os materiais não se solidarizam, tendo cada um sua linha neutra plástica (LN), as quais não se influenciam; caso haja interação parcial, ainda haverá as duas linhas neutras, porém uma influenciará a posição da outra; e no caso de interação total, haverá somente uma linha neutra associada ao conjunto aço/concreto.

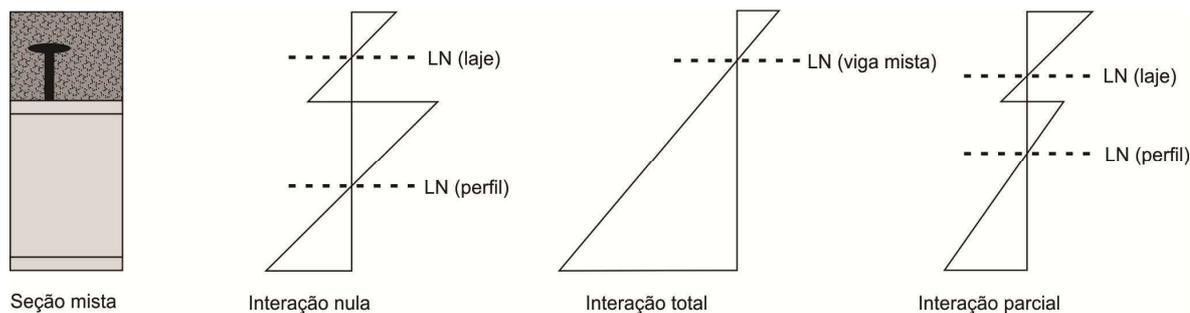


Figura 2.2 - Distribuição das deformações segundo o grau de interação (adaptado de Cavalcante, 2010).

O efeito do escorregamento afeta a distribuição de tensões na seção, a distribuição do fluxo de cisalhamento longitudinal na conexão e, conseqüentemente, a deformabilidade das vigas, a qual é relevante em verificações no regime de utilização da estrutura.

Para garantir a interação da laje e do perfil, mitigando a possibilidade do deslocamento e absorvendo a tensão de cisalhamento, utilizam-se os conectores de cisalhamento que garantem a ação mista, conforme ilustrado na Figura 2.3. Eles aumentam a resistência ao momento fletor e a rigidez da viga, possibilitando a redução da seção.

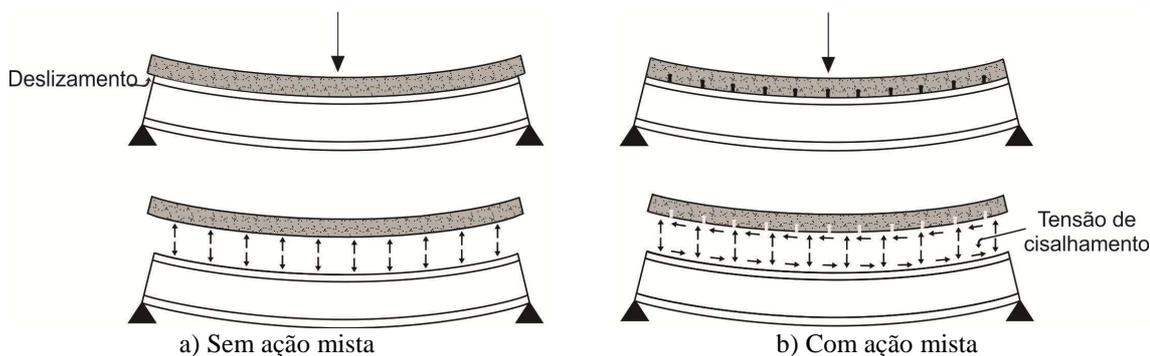


Figura 2.3 - Vigas mistas fletidas (adaptado de David, 2007).

Segundo Pfeil e Pfeil (2008), para a seção mista com interação completa, no início do carregamento, o fluxo cisalhante transferido pelos conectores tem distribuição linear. Os conectores das extremidades são os mais solicitados, mas o esforço é pequeno e os conectores apresentam pouca deformação. Assim, pode-se dizer que não há deslizamento na interface aço-concreto. Já, para a seção mista com interação parcial, tem-se que, com o acréscimo do carregamento e conseqüentemente do fluxo cisalhante horizontal, os conectores das extremidades passam a apresentar deformações mais significativas chegando a plastificação, enquanto os conectores intermediários e centrais ainda se encontram pouco deformados. A deformação plástica dos conectores se traduz

no deslizamento da interface aço-concreto e como consequência reduz-se a eficiência da seção mista à flexão.

2.1.2 - Conectores de cisalhamento

Os conectores de cisalhamento são dispositivos mecânicos que visam garantir a ação conjunta do aço e do concreto. O conector absorve os esforços cisalhantes horizontais que se desenvolvem na direção longitudinal na interface da laje com a mesa superior da seção de aço e ainda impede a separação física desses componentes ("*uplift*"). Os tipos mais usuais são apresentados na Figura 2.4, sendo que o pino com cabeça é o mais largamente utilizado e a ABNT NBR 8800 apresenta critérios de projeto para conectores deste tipo e do tipo perfil U laminado ou formado a frio.

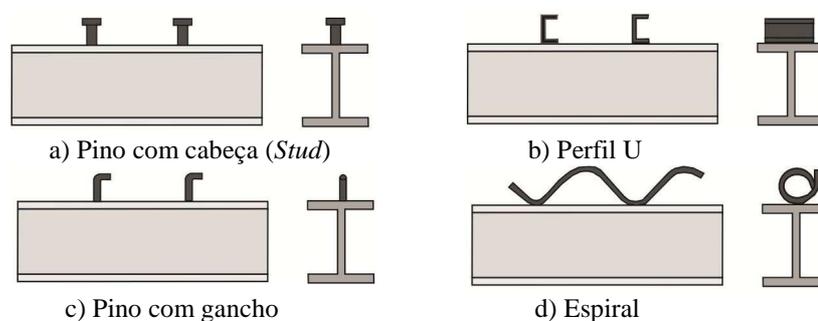


Figura 2.4 - Tipos usuais de conectores (adaptado de Malite, 1990).

Os conectores podem ser classificados como dúcteis ou frágeis. A ductilidade dos conectores está associada ao seu comportamento quando submetido à ação do fluxo de cisalhamento longitudinal gerado entre o perfil de aço e a laje de concreto, quando funcionam como viga mista.

A Figura 2.5 ilustra o comportamento de um conector dúctil e outro frágil. Esta característica dos conectores quase não afeta o comportamento da viga em regime elástico, mas altera a resposta da conexão em regime último ou "pós-elástico". Isso ocorre devido à redistribuição do fluxo de cisalhamento longitudinal entre os conectores. Assim, sob carregamento crescente, um conector dúctil, próximo a atingir a sua resistência máxima, pode continuar a deformar-se, sem ruptura, permitindo que conectores vizinhos absorvam, por sua vez, maior força de cisalhamento e atinjam também a sua capacidade total, num processo de uniformização da resistência da conexão. Isto justifica a hipótese de comportamento plástico ideal da conexão ao

cisalhamento na estrutura, o que permite espaçar igualmente os conectores, sem diminuir a resistência máxima da conexão.

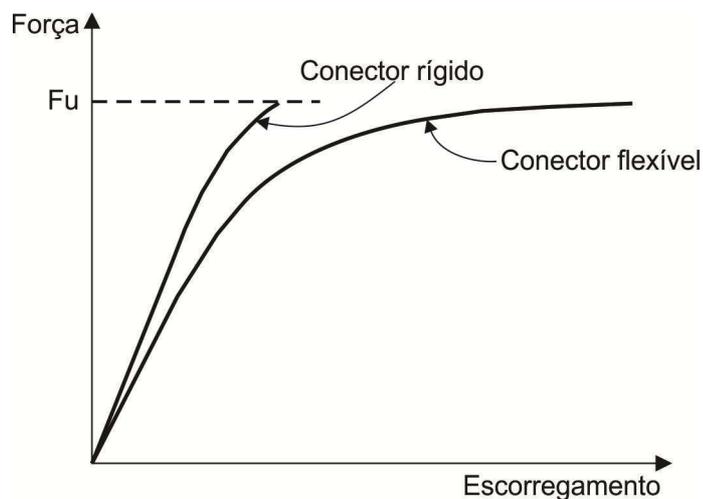


Figura 2.5 - Curva força x Escorregamento para conectores de cisalhamento (adaptado de Alva e Malite, 2005).

Sendo que quanto mais rígido, maior a sua capacidade de impedir o deslizamento. Contudo, o colapso com o conector mais rígido é caracterizado por ruptura frágil com esmagamento do concreto ou cisalhamento do conector o que é indesejável por questões de segurança estrutural. Com isso, tem-se que o conector ideal é aquele que apresenta pouco ou nenhum deslizamento para cargas de serviço e ductilidade no estado limite último.

2.1.3 - Grau de conexão

Os conectores devem ser capazes de gerar um alto grau de conexão e de interação entre o aço e o concreto para que a seção se caracterize como mista, onde os materiais respondem juntos aos esforços.

O grau de conexão refere-se à resistência dos elementos estruturais laje e perfil que compõem a viga mista e a respectiva ligação entre estes elementos. Com isso, tem-se que a distribuição das tensões normais no sistema misto depende do grau de conexão, que se subdivide em total e parcial.

O equilíbrio dos esforços depende da resultante de compressão no concreto (C), da resultante de tração no perfil metálico (T) e da resistência de conexão desempenhada

pelos conectores (F_{sh}), que é dada pela soma das resistências individuais dos conectores, conforme ilustra a Figura 2.6.

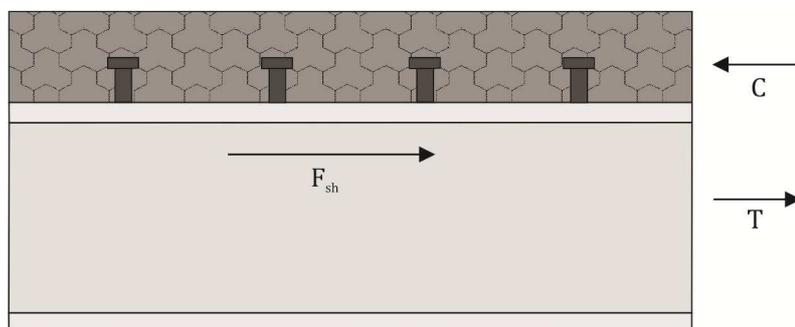


Figura 2.6 - Forças resultantes numa ação mista (Cavalcante, 2010).

De acordo com a variação dessas forças, podem haver três casos, ilustrados na Figura 2.7: a LN localizada na laje, no qual a limitação é devido à resistência à tração do perfil metálico (T); a limitação devido à resistência à compressão do concreto (C); e a limitação devido à resistência de conexão desempenhada pelos conectores.

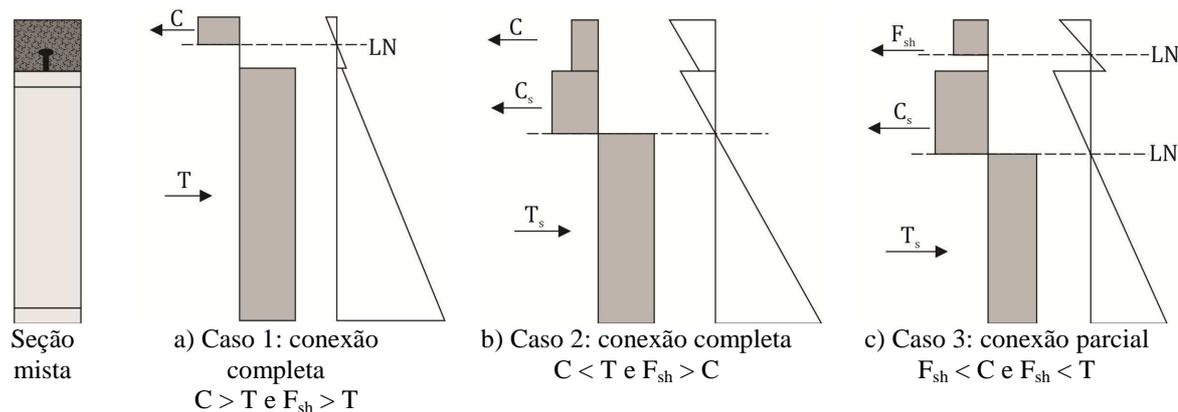


Figura 2.7 - Gráficos de tensão e deformação de uma viga mista, considerando o grau de conexão (adaptado de Oehlers e Bradford, 1995).

O grau de conexão (η) de uma viga mista, segundo a ABNT NBR 8800:2008, pode variar entre 1 para conexão completa, e 0,4 para conexão parcial. Quando não existe conexão entre o perfil e a laje, isto é a laje está apenas apoiada sobre o perfil, sendo uma estrutura classificada como híbrida e não como mista.

O Eurocódigo 4 define a viga mista com ligação total a cisalhamento como aquela cujo momento fletor resistente não é determinado pelo corte dos conectores, isto é, o aumento no número de conectores não produz acréscimo de resistência à flexão. Em caso

contrário tem-se uma viga mista com ligação parcial a cisalhamento, que possui menos conectores que sua correspondente com ligação total.

Em geral, a opção por um projeto com ligação parcial decorre do fator econômico. Nos dois casos, a determinação da resistência à flexão é feita no regime plástico para seções de aço compactas.

2.1.4 - Largura efetiva

Outro fator importante a ser determinado para o dimensionamento da viga mista é a largura efetiva. A largura efetiva da laje (b) é a faixa de laje que trabalha juntamente com a viga de aço. É uma largura fictícia utilizada nos cálculos para contornar o efeito *shear lag*, o qual se caracteriza pela variação das tensões normais ao longo da mesa devido às deformações de cisalhamento no plano da laje de concreto que faz com que as seções não mais permaneçam planas, Figura 2.8.

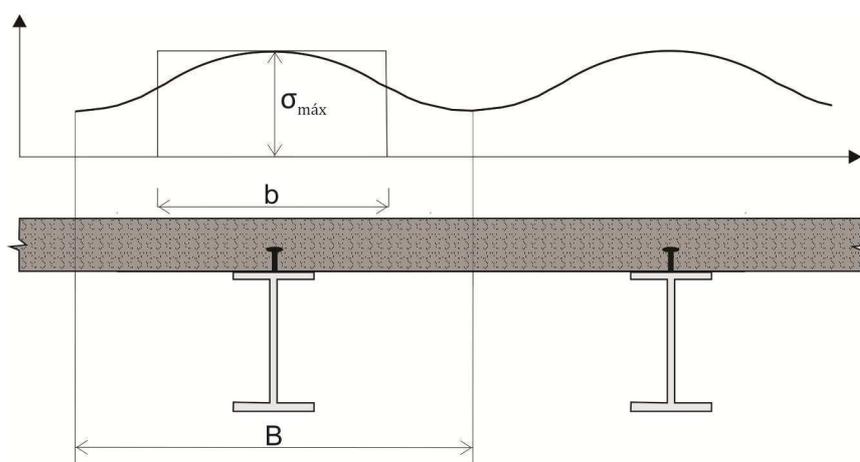


Figura 2.8 - Distribuições das tensões longitudinais na laje considerando o efeito *shear lag* (adaptado de Alva, 2000).

A determinação teórica desta faixa de laje é muito complexa e, para fins práticos, as normas de estruturas de aço apresentam algumas relações empíricas para determinação das mesmas. A norma ABNT NBR 8800:2008 recomenda que, para vigas mistas biapoiadas, a largura efetiva da mesa de concreto, de cada lado da linha de centro da viga, deve ser igual ao menor dos seguintes valores:

- 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios;
- Metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- Distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

2.1.5 - Escoramento

Quanto ao escoramento, a viga mista pode tê-lo ou não. Aquelas que não utilizam, fazem com que a seção de aço seja solicitada durante o endurecimento do concreto, suportando o peso do concreto fresco e o próprio peso do aço. A não utilização do escoramento pode aumentar a possibilidade de ocorrer problemas de deslocamentos excessivos durante a construção, mas, por outro lado, evita os custos advindos do escoramento e as restrições de espaço disponível na obra.

Caso a construção seja escorada, Figura 2.9, o escoramento deve suportar todas as solicitações até que ocorra a cura do concreto. Os componentes do sistema só irão atuar conjuntamente em seguida.

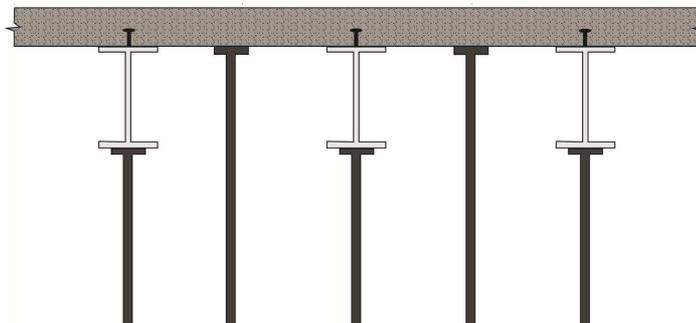


Figura 2.9 - Construção escorada (adaptado de Costa, 2005).

Já, no caso de construção não escorada, o sistema misto só se dá após a cura do concreto, até lá o componente do sistema, viga de aço atua sozinha suportando as solicitações. Portanto, as vigas de aço devem ser verificadas quanto aos estados limites últimos flambagem lateral com torção, flambagem local da mesa comprimida e flambagem local da alma. As vigas metálicas podem ainda ser utilizadas como apoio para as formas das lajes de concreto, Figura 2.10.

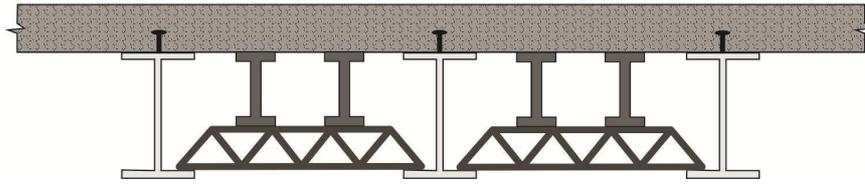


Figura 2.10 - Construção não escorada (adaptado de Costa, 2005).

Os deslocamentos verticais devido à carga permanente na viga escorada são bem menores do que na viga não escorada, uma vez que todo o carregamento, permanente e variável, atua no sistema mais rígido da seção mista. Entretanto, no estado limite último, as tensões de plastificação que se desenvolvem em uma certa viga mista são as mesmas nos dois casos de construção e, portanto, a viga atinge o mesmo momento fletor resistente, seja ela escorada ou não.

2.2 - DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

O Método dos Estados Limites é um método semi-probabilístico, no qual os fatores de segurança, que ponderam as ações e a resistência dos materiais, são determinados com base em análise estatística e o comportamento estrutural é admitido como determinístico. Na literatura norte americana, é conhecido como LFRD (*Load and Resistance Factor Design*).

Um estado limite é uma condição na qual a estrutura ou o elemento estrutural não é capaz de desempenhar a função proposta. Isto significa, que os esforços e deformações devem ser inferiores a certos valores limites, que dependem do material usado e do tipo de estrutura adotada.

Os estados limites podem ser divididos em estados limites últimos e estados limites de serviço. Os estados limites últimos correspondem ao colapso total ou parcial da estrutura devido à perda de equilíbrio, à ruptura por qualquer tipo de solicitação ou à instabilidade. Já os estados limites de serviço estão relacionados com o comportamento da estrutura, afetando sua utilização para o fim ao qual se destina. Por exemplo, sua ocorrência pode prejudicar a aparência, a durabilidade, a funcionalidade e o conforto de seus usuários. Portanto, eles incluem a verificação das deformações e vibrações excessivas.

A utilização deste método para projetar as estruturas consiste no cálculo do limite de capacidade da estrutura ou dos seus elementos constituintes. Para o qual, a resistência real do elemento estrutural (R_n) é minorada pelos fatores de segurança (γ), estabelecendo a resistência de projeto (R_d), e as cargas (Q_n) são majoradas por fatores de segurança (ϕ) a fim de abranger as incertezas das cargas que atuarão na estrutura durante sua vida útil, estabelecendo as solicitações de projeto (S_d). Esses valores são comparados, determinando a condição de projeto, Eq. (2.1).

$$R_d = \gamma R_n \geq \phi Q_n = S_d \quad (2.1)$$

Os fatores de segurança adotados variam em função das incertezas que envolvem a variável, da probabilidade de falha esperada, entre outros fatores que podem ser analisados por métodos probabilísticos, como a análise de confiabilidade. Portanto, essas análises auxiliam na calibração desses coeficientes que serão estabelecidos nas normas e utilizados para projetar estruturas otimizadas, ou seja, seguras e econômicas.

Segundo Ellingwood et al. (1982), os fatores de segurança das ações foram desenvolvidos por calibração, usando métodos analíticos para o cálculo da confiabilidade, para casos padrões de estruturas determinadas estaticamente, calculadas pelas especificações correntes para aço, concreto armado e protendido, madeira, alumínio e estruturas de alvenaria, buscando um resultado final com aproximadamente a mesma confiabilidade. Sendo que os coeficientes de majoração das cargas foram desenvolvidos para um tempo de vida útil da estrutura de 50 anos.

Um dos objetivos iniciais do cálculo semi-probabilístico era a obtenção de uma mesma confiabilidade para todas as estruturas e elementos. Este objetivo contudo não é completamente alcançado. Ellingwood et al. (1982) observam que o índice de confiabilidade de elementos fletidos pode variar de 2,5 a 3,5, que é a ordem de magnitude de variação na probabilidade de exceder um estado limite. Uma das razões para esta variação é a utilização de um único valor do coeficiente de resistência que é usado para todos os elementos sob flexão, independentes do tipo de estado limite.

Contudo, o método dos estados limites considera as incertezas de forma mais racional do que o método das tensões admissíveis.

2.3 - RESISTÊNCIA DA VIGA MISTA AO MOMENTO FLETOR

As vigas mistas podem ter sua resistência à flexão determinada pela plastificação da seção, pela flambagem local da seção de aço ou pela flambagem lateral. Nas regiões de momento positivo não haverá flambagem lateral, já que a mesa comprimida da seção de aço está ligada com conectores à laje de concreto e, portanto, tem contenção lateral contínua. Com relação à flambagem local da seção de aço de vigas mistas, têm-se seções compactas, nas quais o momento de plastificação total é atingido, e seções semicompactas, nas quais a situação de início de plastificação é considerada como o limite da resistência à flexão.

Portanto, as normas ABNT NBR 8800, AISC e Eurocódigo 4 indicam o cálculo do momento resistente de seções compactas com diagramas de tensões em regime plástico, enquanto, para seções semicompactas, o cálculo é feito em regime elástico. No caso de seções compactas, distinguem-se as vigas com ligação total e as com ligação parcial, dependendo de o momento resistente ser determinado pela plastificação total do concreto ou do aço da seção mista ou pela plastificação dos conectores. Para seções semicompactas, essa distinção não se aplica, já que seu dimensionamento é feito com tensões elásticas.

As vigas mistas estudadas nesse trabalho tem seção compacta e laje maciça de concreto sem forma de aço incorporada, e são biapoiadas, não tendo regiões de momento negativo. A seguir é apresentado o dimensionamento do momento resistente de projeto, M_{Rd} , descrito pela ABNT NBR 8800:2008 para o tipo de vigas estudadas.

O coeficiente 0,85, a ser multiplicado pela resistência característica do concreto, f_{ck} , corresponde preponderantemente aos efeitos de longa duração (efeito *Rüsch*). E o coeficiente β_{vm} utilizado na equação do M_{Rd} , é igual a 1,00 para as vigas biapoiadas ou contínuas.

2.3.1 - Momento resistente positivo de vigas com seção de aço compacta e com ligação total

Nas vigas com ligação total, a resistência é determinada pela plastificação do concreto ou da seção de aço, e não pela resistência dos conectores. Para a determinação do M_{Rd}

em regime plástico admite-se que não há deslizamento entre o concreto e o aço; que a área efetiva de concreto de resistência à compressão f_{ck} desenvolve tensões uniformes iguais a $0,85f_{ck}/\gamma_c$; que as tensões de tração do concreto são desprezíveis; e que a seção de aço atinge a tensão f_{yk}/γ_{a1} em tração ou compressão.

A determinação do M_{Rd} depende ainda da posição da LN, a qual pode estar na laje de concreto ou na seção de aço.

Para os casos em que a LN está na laje de concreto, a ABNT NBR 8800:2008 estipula as seguintes condições:

$$\sum Q_{Rd} \geq Af_{yk} \quad (2.2)$$

Onde Q_{Rd} é a resistência do conector e A é a área de aço.

$$0,85 f_{ck} b h_c \geq Af_{yk} \quad (2.3)$$

Onde h_c é a espessura da laje de concreto.

Cumpridas essas condições, tem-se

$$M_{Rd} = \beta_{vm} Af_{yk} \left(h + h_c - \frac{x}{2} \right) \quad (2.4)$$

Onde h é a altura do perfil de aço e x é a posição da LN, que deve ser menor ou igual a h_c e pode ser calculada por

$$x = \frac{Af_{yk}}{0,85f_{ck}b} \quad (2.5)$$

Para os casos em que a LN está na seção de aço, a ABNT NBR 8800:2008 estipula as seguintes condições:

$$\sum Q_{Rd} \geq 0,85 f_{ck} b h_c \quad (2.6)$$

$$0,85 f_{ck} b h_c \leq A f_{yk} \quad (2.7)$$

Cumpridas essas condições, tem-se

$$C = 0,85 f_{ck} b h_c \quad (2.8)$$

E a resultante de compressão no aço, C_a , é

$$C_a = 0,5 A f_{yk} - C \quad (2.9)$$

E a sua resultante de tração, T , passa a ser

$$T = C C_a \quad (2.10)$$

Então, a posição da LN pode ser determinada da seguinte forma

Para C_a menor ou igual a $A \cdot f_{yk}$ (LN na mesa superior)

$$x = \frac{C_a}{A_f f_{yk}} t_f \quad (2.11)$$

Onde A_f e t_f são a área e a espessura da mesa, respectivamente.

Para C_a maior que $A \cdot f_{yk}$ (LN na alma)

$$x = t_f + h \left(\frac{C_a - A_f f_{yk}}{A_w f_{yk}} \right) \quad (2.12)$$

Onde A_w é a área da alma.

Assim o M_{Rd} é dado por

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_a (h + y_t + y_c) + C \left(\frac{h_c}{2} + h - y_t \right) \right] \quad (2.13)$$

Onde y_c é a distância do centro geométrico da parte comprimida da seção da viga de aço até a face superior dessa viga; e y_t é a distância do centro geométrico da parte tracionada da seção da viga de aço até a face inferior dessa viga.

2.3.2 - Momento resistente positivo de vigas com seção de aço compacta e com ligação parcial

Para os casos com ligação parcial, tem-se as seguintes condições

$$\sum Q_{Rd} < A f_{yk} \quad (2.14)$$

$$\sum Q_{Rd} < 0,85 f_{ck} b h_c \quad (2.15)$$

Sendo que η é definido por

$$\eta = \frac{\sum Q_{Rd}}{F_{sh}} \quad (2.16)$$

E, para perfis metálicos com mesas de áreas iguais, é limitado por

$$\eta = 1 - \frac{E}{578 f_{yk}} (0,75 - 0,03L) \geq 0,4 \quad (2.17)$$

Para tamanhos de vão L menor ou igual a 25 metros, e para vãos maiores que 25 metros não se admite ligação parcial.

Obedecidas tais condições, tem-se que o M_{Rd} pode ser calculado por

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_a (h - y_t - y_c) + \sum Q_{Rd} \left(h_c - \frac{x}{2} + h - y_t \right) \right] \quad (2.18)$$

Sendo que

$$x = \frac{C}{0,85f_{ck}b} \quad (2.19)$$

O cálculo do M_{Rd} descrito até então se trata do M_{Rd} final, o qual considera todas as cargas da edificação. Para os casos de construção não escorada, é necessário dimensionar o sistema para que este suporte as cargas atuantes até que o concreto atinja 75% da sua resistência, conforme será descrito a seguir.

2.3.3 - Momento resistente positivo de vigas com seção de aço compacta não escorada

Para os casos de construção não escorada, o perfil metálico deve ser capaz de resistir as solicitações até que o concreto atinja a resistência necessária para que o sistema passe a agir em conjunto suportando as solicitações posteriores. Portanto, o momento fletor para a etapa construtiva, MC_{Rd} , é dado por

$$MC_{Rd} = \frac{Zf_{yk}}{\gamma_{a1}} \quad (2.20)$$

Onde Z é o módulo de resistência plástico do perfil.

Sendo que, para este tipo de construção, o M_{Rd} após esta etapa construtiva é calculado da mesma forma, conforme descrito anteriormente.

2.4 - RESISTÊNCIA DA VIGA MISTA AO ESFORÇO CORTANTE

Segundo a norma ABNT NBR 8800:2008, a força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , de vigas mistas de alma cheia deve ser determinada considerando-se apenas a resistência do perfil de aço, conforme descrito a seguir.

$$V_{Rd} = \frac{ht_w(0,6f_{yk})}{\gamma_{a1}} \quad (2.21)$$

Onde t_w é a espessura da alma.

2.5 - ARMADURAS TRANSVERSAIS NA LAJE

Algumas recomendações quanto à armadura da laje devem ser respeitadas, de acordo

com a ABNT NBR 8800:1986, dadas a seguir.

As lajes devem ser adequadamente armadas para resistir a todas as solicitações de cálculo e para controlar a fissuração em qualquer direção;

As armaduras das lajes devem ser adequadamente dispostas de forma a atender às especificações da ABNT NBR 6118;

A armadura, paralela à viga, situada nas regiões de momentos negativos da viga mista, deve ser ancorada por aderência no concreto sujeito à compressão;

A possibilidade de fissuração da laje (causada por cisalhamento), na região adjacente à viga de aço, paralelamente a esta, deve ser controlada pela colocação de armaduras adicionais, transversais à viga, ou por outros meios eficazes, a não ser que se demonstre que essa fissuração não possa ocorrer. A referida armadura adicional deve ser colocada na face inferior da laje. A área da seção dessa armadura não pode ser inferior a 0,5% da área da seção de concreto, segundo um corte paralelo à viga e deve ser usado espaçamento uniforme ao longo do vão.

O projeto de revisão da ABNT NBR8800 traz uma mudança na área da seção da armadura, onde este valor não pode ser inferior a 0,2% da área da seção de cisalhamento do concreto por plano de cisalhamento, no caso de lajes maciças ou de lajes mistas com nervuras longitudinais ao perfil de aço, ou a 0,1% no caso de lajes mistas com nervuras transversais, devendo ainda atender à condição dada pelas Eqs. (2.22) (2.23) e (2.24).

$$A_{Sd} \leq A_{Rd} \quad (2.22)$$

Sendo que

$$A_{Sd} = \frac{\sum Q_{Rd} 0,5 - 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} A_{bcl}}{L} \quad (2.23)$$

Onde A_{bcl} é a área da seção transversal da região comprimida da laje de concreto entre o plano de cisalhamento considerado e a linha de centro da viga.

A Eq. (2.23) refere-se a uma região de momento positivo. Para o cálculo do fluxo

cisalhante em região de momento negativo o termo de resistência à compressão do concreto é substituído pela resistência à tração da armadura longitudinal localizada entre o eixo da viga e a seção cisalhante.

$$A_{Rd} = 0,6A_{cv} \frac{0,21f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s} < 0,2A_{cv} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.24)$$

Onde A_{cv} é a área da seção cisalhada; A_s é a área da armadura transversal disponível na seção da laje considerada por unidade de comprimento; f_{sk} é a resistência característica do aço da armadura e γ_s corresponde ao fator de segurança dessa resistência.

O projeto de revisão da ABNT NBR8800 recomenda ainda:

No caso de viga de borda, a ancoragem da armadura transversal requer detalhamento apropriado;

A armadura paralela à viga, situada nas regiões de momentos negativos da viga mista, deve ser ancorada por aderência no concreto sujeito à compressão, de acordo com os critérios da ABNT NBR 6118:2003.

2.6 - RESISTÊNCIA DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO

A ABNT NBR 8800:2008 aborda a resistência dos conectores do tipo pino com cabeça e do tipo perfil U. A resistência ao corte é dada por

$$Q_{Rd} = \frac{Q_n}{\gamma_{cs}} \quad (2.25)$$

Onde Q_n é a resistência nominal do conector e γ_{cs} é o coeficiente de ponderação da resistência do conector, igual a 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção e igual a 1,10 para combinações excepcionais.

Para os conectores do tipo pino com cabeça totalmente embutido no concreto com cobrimento mínimo de 10 mm, a resistência nominal é o menor entre os seguintes valores

$$Q_n = 0,5A_{cs}\sqrt{f_{ck}E_c} \quad (2.26)$$

Onde A_{cs} é a área da seção transversal do conector e E_c é o módulo de elasticidade do concreto.

$$Q_n = R_g R_p A_{cs} f_u \quad (2.27)$$

Onde f_u é o limite de resistência à tração do conector; e R_g e R_p são fatores que consideram a redução de resistência do conector quando usado em lajes com fôrma de aço incorporada, para lajes maciças são iguais a 1,0.

A altura mínima do pino com cabeça, após a instalação, deve ser no mínimo quatro vezes maior que o diâmetro do fuste. Caso os conectores não estejam dispostos diretamente sobre a alma da seção de aço, seu diâmetro limita-se a 2,5 vezes a espessura da mesa à qual estão soldados a fim de evitar a ocorrência da deformação excessiva na chapa da mesa antes que o conector atinja sua resistência.

Para os conectores do tipo perfil U, a resistência nominal é dada por

$$Q_n = 0,3(t_{fcs} + 0,5t_{wcs})L_{cs}\sqrt{f_{ck}E_c} \quad (2.28)$$

Onde t_{fcs} , t_{wcs} e L_{cs} são a espessura da mesa do conector, espessura da alma do conector e o comprimento do perfil U, respectivamente.

Os perfis U devem ser instalados com uma das mesas assentando sobre o perfil de aço e com o plano da alma perpendicular ao eixo longitudinal desse perfil.

Nas vigas com seção de aço compacta com ligação total, os conectores são dimensionados de maneira que a viga mista possa atingir seu momento plástico de ruptura, sem a separação entre a laje e a seção de aço. Assim, os conectores são calculados em função da resistência da viga e não das cargas atuantes. A soma das resistências Q_{Rd} dos conectores entre o ponto de momento máximo e um de momento nulo é dada pelo menor dos seguintes valores

$$nQ_{Rd} \geq 0,85f_{ck}bh_c = Q_{Sd} \quad (2.29)$$

Onde n é o número de conectores e Q_{Sd} é o esforço solicitante dos conectores.

$$nQ_{Rd} \geq Af_{yk} = Q_{Sd} \quad (2.30)$$

Pfeil e Pfeil (2009) diz que, nas vigas dimensionadas para ter ligação parcial, nQ_{Rd} é menor do que as resistências do concreto em compressão e da seção de aço em tração, Q_{Sd} .

Nas regiões de momento positivo de vigas sob carga uniforme, os n conectores necessários podem ser uniformemente distribuídos entre a seção de momento máximo e a de momento nulo adjacente.

2.7 - VERIFICAÇÕES NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

No ELS devem ser verificados os deslocamentos excessivos, fissuração do concreto e vibrações excessivas.

2.7.1 - Deslocamentos excessivos

No cálculo dos deslocamentos em vigas mistas, é necessário levar em conta a sequência construtiva, o efeito da fluência e retração do concreto e a condição de resistência no caso de vigas com seção de aço compacta, que determina o tipo de comportamento sob cargas em serviço.

Para levar em conta o efeito de fluência do concreto, os deslocamentos são calculados para alguns anos de utilização com a carga permanente e valores quase permanentes de carga variável atuando com efeito de fluência e valores frequente e raro de carga variável atuando sem efeito da fluência.

As vigas dimensionadas no ELU para ligação total têm comportamento para cargas em serviço caracterizado por interação completa. Os deslocamentos são então calculados com as propriedades da seção mista homogeneizada, na qual transforma-se a seção de concreto em uma seção equivalente de aço, dividindo sua área pela relação

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c} \quad (2.31)$$

Onde E_s é o módulo de elasticidade do aço.

Na seção homogeneizada deve ser desprezada a área de concreto tracionada.

No caso de vigas com ligação parcial, utiliza-se um valor reduzido de momento de inércia da seção (I_{ef}), que expressa a influência do deslizamento para cargas em serviço:

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\eta}(I - I_a) \quad (2.32)$$

Onde I_a é o momento de inércia de seção de aço e I é o momento de inércia da seção homogeneizada.

As flechas provocadas pelas cargas permanentes são limitadas nas normas, com o fim de evitar deformações pouco estéticas, empoçamento de água, etc. As flechas produzidas por cargas móveis são limitadas, com a finalidade de evitar vibrações desconfortáveis. Em ambos os casos, evitam-se também danos a componentes não estruturais, como alvenarias.

2.7.2 - Controle de fissuras do concreto em vigas mistas

As principais exigências da ABNT NBR 8800:2008 serão descritas nesta seção.

Quando houver prejuízo à durabilidade ou à aparência da estrutura, os estados limites de serviço relacionados à fissuração do concreto devem ser verificados. Nas vigas mistas, isso ocorre nas regiões de momento negativo ou com tendência de continuidade como, por exemplo, junto aos apoios de vigas biapoiadas. Para esse estado limite de serviço, devem-se usar combinações frequentes de ações.

Quando for obrigatório ou se desejar controlar a abertura das fissuras na laje de concreto, nas regiões citadas anteriormente, a armadura mínima longitudinal de tração a ser colocada deve ser obtida de acordo com o procedimento explicitado na norma ABNT NBR 8800:2008.

Nas vigas mistas contínuas ou semicontínuas, quando a área de armadura necessária para

resistir ao momento negativo for superior ao determinado segundo a norma ABNT NBR 8800:2008, é necessário ainda verificar se a abertura de fissuras atende aos limites estabelecidos ou determinar o diâmetro e o espaçamento máximo das barras da armadura.

Para informações complementares e definição do cobrimento, deve ser consultada a norma ABNT NBR 6118:2014 para concreto de densidade normal e, na ausência de norma brasileira aplicável, o Eurocode 2 Part 1-1 para concreto de baixa densidade.

3 - VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL VIA CONFIABILIDADE

Neste capítulo, aborda-se a classificação dos critérios de segurança adotados no projeto estrutural e descreve-se a formulação referente à análise de confiabilidade.

O principal objetivo dos métodos de análise de confiabilidade é obter a probabilidade de falha de sistemas estruturais, levando em consideração as incertezas inerentes às variáveis envolvidas, que podem ser

- Incertezas sobre a intensidade e a distribuição das cargas permanentes e acidentais;
- Incertezas sobre as propriedades mecânicas dos materiais;
- Incertezas sobre os parâmetros geométricos da estrutura;
- Incertezas sobre os modelos de cálculo e de análise estrutural.

Segundo Beck (2010), confiabilidade é o grau de confiança de que um sistema não falhe dentro de um período de tempo especificado e respeitadas as condições de operação do mesmo.

Pode-se entender como falha o não atendimento da estrutura aos objetivos para os quais ela foi concebida. Uma vez que sempre há o risco de falha, um controle para mantê-lo dentro de um nível aceitável, de acordo com critérios de segurança e economia, é imprescindível.

Vaz (2011) classifica os métodos de projeto de estruturas em níveis de segurança e economia, de acordo com a metodologia adotada e a quantidade de informação disponível:

- Nível 0 – Método das Tensões Admissíveis: este método consiste em usar apenas os valores médios das resistências como dado estatístico, conforme descrito no capítulo anterior.
- Nível 1 – Método Semi- Probabilístico: neste método são utilizados fatores

parciais de segurança para majorar as solicitações e minorar as resistências. Estes fatores são aplicados aos valores característicos das variáveis transformando-os em valores de cálculo. O método semi-probabilístico também é conhecido como método dos estados limites e é adotado como critério de segurança pelas normas brasileiras de projeto estruturais.

- Nível 2 – Método Baseado em Confiabilidade: neste método utilizam-se dados estatísticos completos das variáveis aleatórias e, ao contrário dos métodos citados anteriormente, controla a probabilidade de falha.
- Nível 3 – Projeto Ótimo Semi-Probabilístico: neste método o nível de segurança é o mesmo do método de Nível 1, mas a economia no projeto é maior.
- Nível 4 – Projeto Ótimo Baseado em Confiabilidade: combina o controle da probabilidade de falha do Nível 2 com a economia do método de Nível 3.
- Nível 5 – Projeto Ótimo Baseado em Risco: fornece o projeto de risco total mínimo. O risco total é definido como o custo da construção somado ao custo de operação e ao custo associado a cada modo de falha.

Neste trabalho, utiliza-se um método nível 2, no qual toda variável aleatória envolvida no problema deverá ser representada por uma distribuição de probabilidade correspondente, seu valor médio e coeficiente de variação. No intuito de descrever corretamente os parâmetros envolvidos, serão utilizadas as orientações e recomendações disponibilizadas pelo JCSS (*Joint Committee on Structural Safety*) para execução de códigos cuja natureza seja probabilística (JCSS, 2001).

Os principais métodos disponíveis para a análise de confiabilidade são o método FORM (*First Order Reliability Method*) e o método de simulação de Monte Carlo, os quais serão descritos neste capítulo.

Além disso, será descrita a metodologia de calibração dos coeficientes parciais de segurança de um sistema estrutural específico com base numa técnica de superfície de resposta via polinômios Lagrangeanos.

3.1 - SEGURANÇA ESTRUTURAL

O projeto de uma estrutura envolve um conjunto de etapas essenciais, as quais se iniciam com a concepção estrutural e vão até o detalhamento e arranjo final dos elementos, passando pelas considerações de durabilidade. O objetivo final desse processo é que a estrutura desempenhe satisfatoriamente todas as funções para quais foi concebida, com o máximo de economia, eficiência e durabilidade possível.

Pantoja (2012) diz que o conceito de segurança estrutural está vinculado à capacidade de uma determinada estrutura suportar as diversas ações a ela imposta, durante sua vida útil, satisfazendo também às condições funcionais destinadas à sua construção. É possível observar uma estreita relação entre a confiabilidade e a segurança de uma estrutura.

Essa relação, possibilita definir a segurança de uma estrutura a partir da probabilidade de ocorrência de um dos seus estados de falha durante sua vida útil, associando uma probabilidade de falha aos possíveis estados comprometedores do desempenho da estrutura, como medida de segurança. Com isso, tem-se um problema probabilístico, pois a probabilidade de falha torna-se o indicador de segurança.

Nos métodos não probabilísticos, são estabelecidas regras que limitam os valores das ações, deslocamentos e deformações a partir das quais é determinado o nível de segurança da estrutura. Tais limites são definidos com base no conhecimento existente na engenharia e, por isso, estão em constante aperfeiçoamento. Contudo, muitas vezes, essas hipóteses determinísticas não são capazes de prever possíveis imprevistos que ocorrem devido o grau de incerteza presente nas variáveis.

Estas incertezas impossibilitam que uma estrutura apresente segurança absoluta, pois uma determinada combinação de valores das variáveis pode resultar numa condição de falha. Nesse contexto que o estudo da confiabilidade é inserido, na tentativa de prever incertezas e flutuações nas variáveis da estrutura.

3.2 - ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A confiabilidade estrutural tem como principal objetivo determinar a probabilidade de ocorrência de um cenário de falha qualquer na estrutura, visto que sempre haverá uma probabilidade não-nula da estrutura desempenhar um comportamento não apropriado

durante sua vida útil. A confiabilidade, C , mede a probabilidade da estrutura não violar um determinado estado limite e em termos estatísticos é definida pelo complemento da probabilidade de falha, P_f , conforme descrito na Eq. (3.1).

$$C = 1 - P_f \quad (3.1)$$

Pantoja, Silva e Narvaez (2015) dizem que, no caso de obras civis, adota-se probabilidade de falha na ordem de 10^{-7} a 10^{-3} como um valor aceitável.

Os principais fatores que influenciam o desempenho da estrutura são as resistências dos materiais aplicados, as ações existentes e as propriedades geométricas. Esses fatores são variáveis de natureza randômica, geralmente, consideradas como variáveis de projeto. São atribuídas distribuições estatísticas convenientes para cada uma dessas variáveis de projeto. Essa atribuição é uma associação estatística feita de várias maneiras, como, por exemplo, ensaios de laboratório, estudos estatísticos e observações físicas são algumas delas.

Considerando um espaço generalizado das variáveis aleatórias de um problema, haverá duas regiões: uma região que concentra pontos para os quais todas as exigências de projeto são atendidas, e outra cujas exigências de projeto não serão atendidas total ou parcialmente. Isso ocorrerá em face das incertezas inerentes às variáveis de projeto. Com isso, associa-se a probabilidade de falha com a região complementar do espaço generalizado cujas exigências não são atendidas.

Para uma realização qualquer pertencente ao espaço generalizado X , haverá uma função $G(X)$ que medirá a resposta estrutural do sistema, de modo a determinar se essa pertence ou não ao conjunto de pontos que satisfazem aos requisitos de segurança do projeto. Essa função de comportamento, falha ou desempenho, como é conhecida, divide o espaço generalizado em três regiões:

Região denominada de domínio de falha onde $G(X) < 0$, na qual todos os pontos X não atendem total ou parcialmente os requisitos de segurança, levando a estrutura a um estado limite.

Região denominada domínio seguro onde $G(X) > 0$, na qual todos os pontos satisfazem

os requisitos de segurança.

Região denominada função de estado limite onde $G(X) = 0$, fronteira entre as duas regiões, contém os pontos que satisfazem à relação.

A Figura 3.1 mostra graficamente, para um caso bidimensional, os domínios citados.

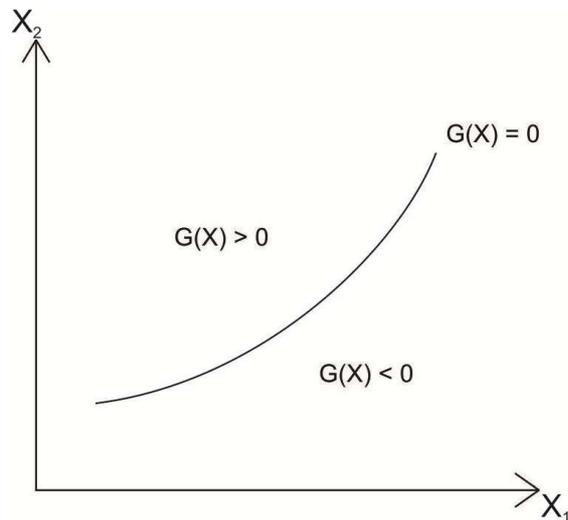


Figura 3.1 - Domínios de falha.

Estabelece-se um processo de integração aplicado sobre o domínio de falha, Eq. (3.2).

$$P_f = \int_{D_f} f_x(x) dx \quad (3.2)$$

Onde $f_x(x)$ é a função conjunta de densidade de probabilidades e D_f o domínio de falha caracterizado por $G(X) < 0$.

Esse processo é uma das maiores dificuldades da abordagem estatística de segurança, pois, para que o sistema fosse bem representado, o ideal seria utilizar uma função conjunta de densidade de probabilidade que pudesse representar todas as variáveis de projeto ao mesmo tempo e espaço. Porém, em problemas mais complexos, dificilmente é possível a obtenção dessa função, porque geralmente há nenhuma ou muito pouca informação sobre a mesma.

Além disso, o valor resultante de P_f geralmente é pequeno, fazendo com que os métodos de simulação sejam pouco eficientes. Uma alternativa são os métodos aproximados onde

se obtêm um índice de confiabilidade, β . Este índice está relacionado diretamente com a probabilidade de falha avaliando o nível de segurança da estrutura. E, devido ao seu caráter adimensional, permite comparar níveis de segurança de sistemas totalmente diferentes.

3.3 - VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

As incertezas permeiam os fenômenos e processos que são explorados na engenharia. Portanto, há certa imprevisibilidade nos resultados esperados. Sendo inevitável a variabilidade presente nos dados disponíveis, os quais podem ser obtidos experimentalmente ou em campo. Ainda que alguns valores ocorram com mais frequência que outros nos experimentos realizados de forma aparentemente idêntica, a variabilidade inerente nesse tipo de dado ou informação é aleatória por natureza. Esse tipo de formulação é considerado através de variáveis básicas que são mais relevantes ao problema. Essas variáveis serão empregadas nas equações de estados limites específicas para representar cada modo de falha da estrutura.

Essas variáveis correspondem às quantidades físicas que caracterizem as ações e as influências do meio ambiente, às quantidades de materiais e sua geometria. 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, etc.

Segundo Pantoja (2012), a qualidade dos resultados da análise de confiabilidade depende em grande parte da escolha do tipo de distribuição de probabilidade adotado para representar cada variável aleatória contida no problema estrutural a ser estudado.

Existem várias funções capazes de modelar a distribuição probabilística de uma variável aleatória. Dentre as principais estão: distribuição normal, distribuição lognormal, distribuição binomial, distribuição exponencial, distribuição Gamma, distribuição uniforme, distribuição de Weibull, distribuição Beta e distribuição de valores extremos.

O JCSS (2001) recomenda o tipo de distribuição e seus respectivos parâmetros que se adequam às variáveis aleatórias mais usuais nos projetos estruturais, conforme descrito a seguir.

Propriedades dos materiais

- Normalmente não possuem valores negativos;
- Geralmente a distribuição lognormal poderá ser utilizada;
- O tipo de distribuição e seus parâmetros devem, geralmente, ser obtidos a partir de uma amostra grande e homogênea e a partir de possíveis informações existentes de variáveis similares (ex: para um novo aço de alta resistência, as informações sobre as propriedades de outros tipos de aço existentes devem ser consultadas).

Parâmetros geométricos

- Variáveis associadas à fabricação e construção podem ter grandes coeficientes de variação (ex: imperfeições geométricas, desaprumos, etc.);
- Estas variações geométricas podem ser adequadamente representadas por uma distribuição normal ou lognormal.

Carregamentos atuantes

- As cargas devem ser divididas de acordo com sua variação temporal (ex: cargas permanentes, acidentais, excepcionais, entre outras);
- Em muitos casos, as cargas permanentes podem ser representadas por uma distribuição normal;
- Para cargas variáveis, geralmente a variável aleatória mais importante é o valor extremo que ocorre durante determinado período de tempo. A distribuição de probabilidade do valor de extremo de uma variável pode ser aproximada por uma distribuição assintótica de valores extremos (Gumbel, Weibull, entre outros).

A Tabela 3.1 mostra as distribuições adotadas para as variáveis aleatórias consideradas neste trabalho.

Tabela 3.1 - Parâmetros das variáveis aleatórias.

Variável	Distribuição	Coefficiente de variação
Carga permanente	Normal	0,05
Carga acidental	Gumbel	0,25
Resistência do concreto	Lognormal	0,17
Resistência do aço do perfil metálico	Lognormal	0,07
Resistência do aço da armadura	Lognormal	0,05
Largura efetiva	Normal	0,075
Espessura da laje	Normal	0,04

3.4 - PROBABILIDADE DE FALHA E ÍNDICE DE CONFIABILIDADE

Segundo Beck (2010), confiabilidade é o grau de confiança de que um sistema não falhe dentro de um período de tempo especificado e respeitadas as condições de operação do mesmo.

O problema básico da confiabilidade consiste em comparar o efeito de um carregamento S com uma resistência R de um elemento estrutural genérico (Melchers, 2002). A P_f é dada pelo conjunto de realizações em que o efeito S exceda a resistência R , Eq. (3.3). Sendo R e S variáveis aleatórias descritas pelas suas respectivas distribuições de probabilidade e outros parâmetros estatísticos como média e desvio padrão.

$$P_f = P(R \leq S) = P(R - S \leq 0) = P[G(R, S) \leq 0] \quad (3.3)$$

Esse conjunto de realizações é denominado domínio de falha, permitindo que a P_f possa ser definida como o somatório da probabilidade de todos os pontos pertencentes a este domínio, que no espaço físico, resulta na Eq. (3.4).

$$P_f = P(R - S \leq 0) = \int_{D_f} f_{RS}(R, S) dR dS \quad (3.4)$$

Porém, em casos práticos, dificilmente é possível realizar essa integração. Com isso, recorre-se a utilização de métodos de simulação ou de métodos aproximados onde a P_f é obtida através de índices de confiabilidade.

Pantoja (2012) diz que uma influência direta da forma das distribuições de probabilidade e do grau de dispersão das variáveis aleatórias pode ser observada sobre os valores da P_f . Quanto maior for o coeficiente de variação das variáveis, maior será a P_f , uma vez que coeficientes elevados indicam maiores incertezas sobre as variáveis consideradas no problema.

Segundo Beck (2010), o problema básico da confiabilidade apresentado anteriormente também pode ser resolvido através da variável margem de segurança (M), Eq. (3.5).

$$M = R - S \quad (3.5)$$

Nessa equação, os valores negativos representam a falha da estrutura, enquanto que valores positivos indicam segurança e o valor nulo à condição de estado limite.

O problema pode ser resolvido analiticamente se R e S são variáveis aleatórias normais. E, caso haja independência entre as variáveis, pode-se dizer que:

$$\mu_M = \mu_R - \mu_S \quad (3.6)$$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (3.7)$$

Passando M para espaço normal padrão, tem-se:

$$Y = \frac{M - \mu_M}{\sigma_M} \quad (3.8)$$

Assim, é possível avaliar a variável M através da função de distribuição acumulativa normal padrão. A probabilidade de falha é descrita na Eq. (3.9).

$$P_f = P([M < 0]) = P\left(\left[Y \leq -\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right]\right) = \Phi\left[-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right] \quad (3.9)$$

No espaço normalizado, essa medida da P_f corresponde à distância entre a origem da distribuição Y normalizada e a região de falha, denominada β , conforme apresentado na Figura 3.2.

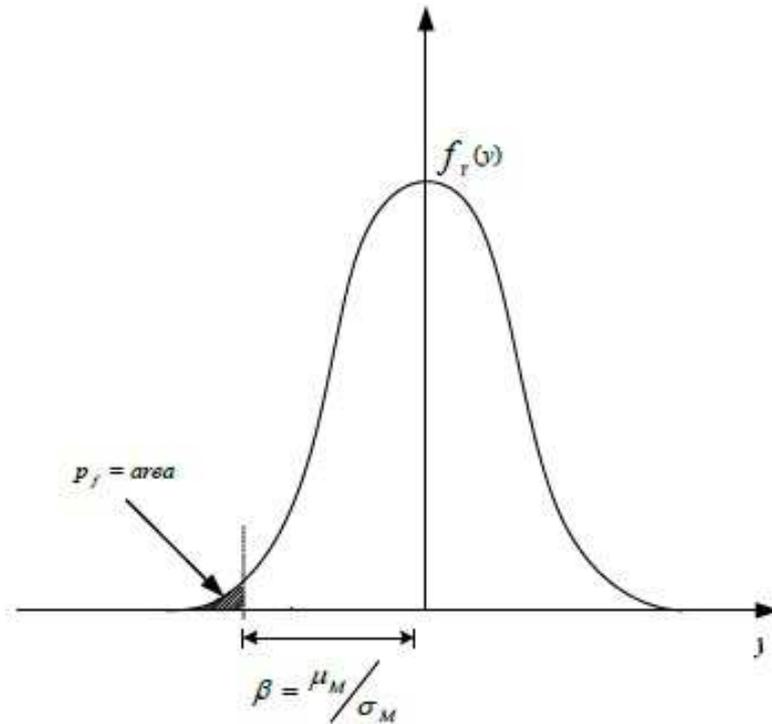


Figura 3.2 - Índice de confiabilidade no espaço normalizado (Pantoja, 2012).

Com isso, a P_f pode ser calculada conforme a Eq. (3.10).

$$P_f = \Phi\left[-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right] = \Phi[-\beta] \quad (3.10)$$

Alguns desses valores são apresentados por Pachás (2009), conforme descrito na Figura 3.3.

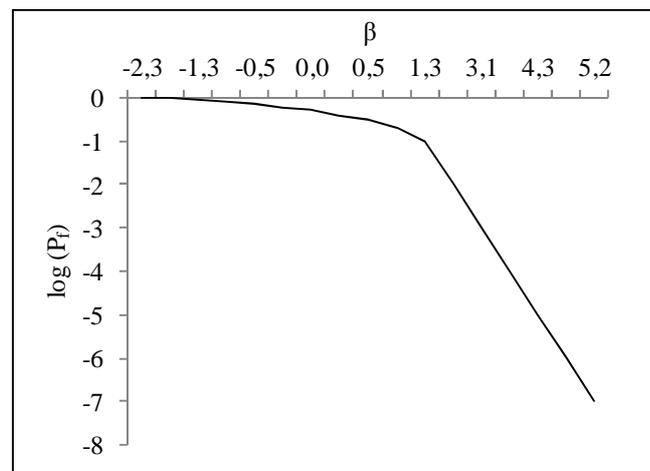


Figura 3.3 - Relação β e P_f .

No espaço das variáveis aleatórias normais reduzidas não correlacionadas, o β é definido geometricamente como a distância do ponto sobre a superfície de falha mais perto da origem até a origem (Sagrilo, 2003). Apesar da Eq. (3.10) ser válida apenas para variáveis aleatórias normais, sua relação com a probabilidade de falha é utilizada de modo generalizado na confiabilidade estrutural para solução de problemas envolvendo um número qualquer de variáveis aleatórias (Beck, 2010).

Na confiabilidade, o critério de aceitação de risco estrutural corresponde à exigência de um nível mínimo de confiabilidade, o β alvo. Assim o nível de segurança de uma estrutura é expresso em termos de um β mínimo ou de uma P_f aceitável. Lembrando que o β é um parâmetro utilizado para simplificar a forma de expressar a P_f , portanto, sua análise só faz sentido se essa relação for devidamente compreendida. Valores alvo do β para estados limites foram propostos pelo CEN (2001) de acordo com as classes de consequência, para a análise de confiabilidade. A Tabela 3.2 estabelece valores mínimos do β relacionados com as classes de consequências e confiabilidade para os estados limites últimos (ELU) e os estados limites serviço (ELS) para os períodos de referência de um e 50 anos.

Tabela 3.2 - Relação entre β , P_f e classes de consequência.

Classe de consequências	Classe de confiabilidades	β			
		ELU		ELS	
		1 ano	50 anos	1 ano	50 anos
CC1	RC1	4,2	3,3	-	-
CC2	RC2	4,7	3,8	2,9	1,5
CC3	RC3	5,2	4,3	-	-

As três classes de consequências (CC1, CC2 e CC3) se distinguem pela proporção de impacto que a falha da estrutura pode ocasionar:

- Classe CC1: pequeno número de perdas de vidas humanas e consequências: ambientais, sociais ou econômicas pequenas.
- Classe CC2: moderado número de perdas de vidas humanas e consequências: ambientais, sociais ou econômicas consideráveis.
- Classe CC3: elevado número de perdas de vidas humanas e consequências: ambientais, sociais ou econômicas elevadas.

Considera-se que as consequências de falha são: baixas para construções agrícolas, onde as pessoas normalmente não transitam; médias para prédios residenciais e comerciais, hotéis, escolas, pontes de residências (fazendas); altas para teatros, prédios e pontes com significativa utilização.

Pode se considerar que o problema em estudo se enquadra na classe CC2 com período de referência de 50 anos. Esta classe abrange grande parte das análises de estruturas civis, pois considera moderado número de perdas de vidas humanas e consequências ambientais, sociais ou econômicas consideráveis, englobando edificações comerciais e residenciais. Portanto, o β alvo deste estudo será 3,8 para ELU, o qual corresponde a probabilidade de falha igual a $7,2 \times 10^{-5}$ em 50 anos.

3.5 - MÉTODOS DE ANÁLISE

A seguir serão descritos os principais métodos utilizados como alternativa para a complexidade da avaliação numérica da Eq. (3.2).

3.5.1 - Método - FORM

No método FORM (*First Order Reliability Method*), transformam-se as variáveis aleatórias do problema, que estão no espaço original X , com um tipo de distribuição qualquer, em variáveis normais padrão, estatisticamente independentes, num espaço normalizado padrão U . A função de desempenho associada, $G(X)$, é descrita em função das variáveis U como $G(U)$. Procura-se então o ponto de projeto (U^*), cuja distância até a origem é a menor possível (*Most Probable Point - MPP*). O índice de confiabilidade (β) é dado pela distância entre U^* e a origem, conforme ilustrado na Figura 3.4. A probabilidade de falha poderá ser obtida pela função densidade de probabilidade normal padrão acumulada, Φ , Eq. (3.11).

$$P_f = \Phi[-\beta] \quad (3.11)$$

Contudo, essa expressão é aplicável de acordo com a linearidade da função de estado. Se a função for linear, é inteiramente válida. Caso contrário, seu resultado é uma aproximação. A obtenção do índice de confiabilidade, β , é feita pela Eq. (3.12).

$$\beta = |U^*| \quad (3.12)$$

Sendo:

$$U^* = -\alpha^* \beta \quad (3.13)$$

$$G(U^*) = \beta + \sum_{i=1}^n \alpha_i u_i^* \quad (3.14)$$

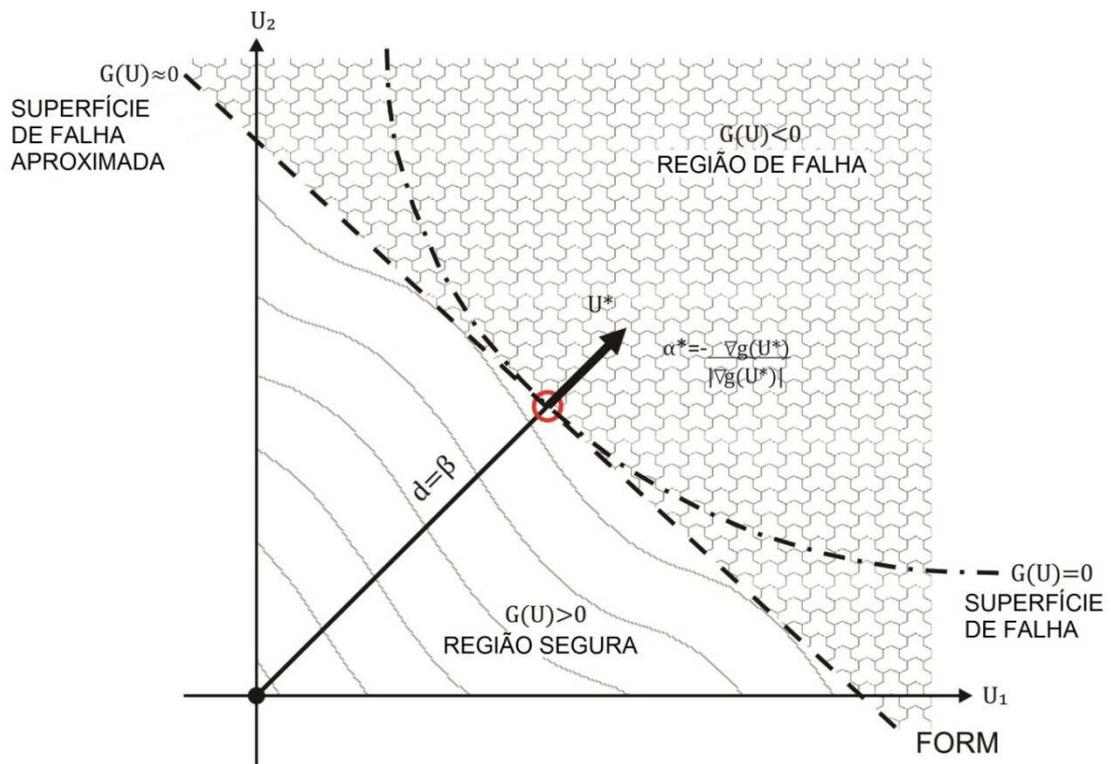


Figura 3.4 - Representação gráfica do método FORM (adaptado de Pantoja, 2012).

Além do processo de transformação das variáveis aleatórias para o espaço normal padrão, é necessário determinar o ponto de projeto. Normalmente, essa transformação é feita via distribuições normais equivalentes e o ponto de projeto obtido na forma de um problema de otimização. A transformação de Nataf (Der Kiureghian e Liu, 1986) amplamente empregada nos problemas de confiabilidade estrutural, é então utilizada para transformar as variáveis aleatórias, X , em variáveis independentes, U de acordo com a Eq. (3.15).

$$U = J(X - \mu) \quad (3.15)$$

Sendo J o Jacobiano da transformação, que pode ser calculado conforme a Eq. (3.16).

$$J = \Gamma \sigma^{-1} \quad (3.16)$$

Onde μ é o vetor das médias e σ é a matriz que contém os desvios padrão as variáveis X . A matriz Γ é dada por:

$$\Gamma = L^{-1} \quad (3.17)$$

A matriz L é uma matriz triangular inferior obtida pela decomposição de Cholesky da matriz dos coeficientes de correlação de X , Eq. (3.18).

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

onde n é o número de variáveis aleatórias consideradas no problema. E os L_{ij} serão calculados da seguinte maneira:

$$L_{11} = 1.0 \quad (3.19)$$

$$L_{i1} = \rho_{ij} \quad (3.20)$$

$$L_{ik} = \frac{1}{L_{kk}} \left(\rho_{ij} - \sum_{j=1}^{k-1} L_{ij}^2 L_{kj} \right) \quad 1 < k < i \quad (3.21)$$

$$L_{ii} = \sqrt{1 - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij}^2} \quad i > 1 \quad (3.22)$$

Sendo que ρ_{ij} é o coeficiente de correlação entre as variáveis X_i e X_j . O uso de variáveis não normais presentes na maioria dos problemas de confiabilidade estrutural exige a transformação das variáveis em normais equivalentes, conforme mostrado a seguir:

$$\sigma_{X_i}^N = \frac{\phi(\Phi^{-1}[F_{X_i}(X_i^*)])}{f_{X_i}(X_i^*)} \quad (3.23)$$

$$\mu_{X_i}^N = X_i^* - \sigma_{X_i}^* \Phi^{-1}[F_{X_i}(X_i^*)] \quad (3.24)$$

No caso em que as variáveis possuem correlação, utiliza-se a transformação apresentada, desde que os coeficientes de correlação entre as variáveis originais sejam corrigidos para os coeficientes de correlação entre normais equivalentes. Essa correção é feita na forma:

$$\rho_{ij}^E = F \rho_{ij} \quad (3.25)$$

A obtenção do ponto de projeto, U^* , pode ser estabelecida como um problema de otimização, Eq. (3.26, com restrição, Eq. (3.27).

$$\text{Minimizar} : \|U\| \quad (3.26)$$

Sujeito a:

$$G(U) = 0 \quad (3.27)$$

Geralmente, na análise de confiabilidade, utiliza-se o algoritmo HLRF desenvolvido por Hasofer e Lind (1974) e posteriormente aprimorado por Rackwitz e Fiessler (1978) mostrado na Eq. (3.28).

$$U^{k+1} = \frac{1}{\|\nabla G(U^k)\|^2} [\nabla G(U^k)^T U^k - G(U^k)] \nabla G(U^k) \quad (3.28)$$

Sendo $\nabla G(U^k)$ o gradiente da função de falha no espaço reduzido e $G(U^k)$ o valor da função de falha no ponto U^k .

A seguir é apresentado o algoritmo iterativo do método FORM.

1. Escolha do ponto de partida X^k e $k=0$ no espaço original, geralmente adota-se a média, e cálculo da matriz dos coeficientes de correlação normais equivalentes, Eq. (3.25).
2. Cálculo das médias e desvios padrões normais equivalentes no ponto de partida, Eqs. (3.23) e (3.24), para montar a matriz σ e o vetor μ , com os respectivos desvios padrões e médias normais equivalentes.
3. Avaliação da função de falha $G(X)$, Eq. (3.29), o Jacobiano, Eq. (3.16), e o gradiente de $G(U)$ no espaço reduzido, Eq. (3.30).

$$G(U) = G(X) \quad (3.29)$$

$$\nabla G(U) = (J^{-1})^T \nabla G(X) \quad (3.30)$$

4. Transformação do ponto de partida para espaço reduzido usando a transformação de Nataf, Eq. (3.31).

$$U^k = J(X^k - \mu) \quad (3.31)$$

5. Avaliação do novo ponto U^{k+1} através do algoritmo HRLF conforme definido anteriormente.
6. Avaliação do índice de confiabilidade, Eq. (3.32).

$$\beta = \|U^{k+1}\| \quad (3.32)$$

7. Avaliação do novo ponto U^{k+1} no espaço original, Eq. (3.33).

$$X^{k+1} = (J^{-1})^T (U^{k+1}) + \mu \quad (3.33)$$

8. Utilização de X^{k+1} como novo ponto de partida e repetir os passos de 2 até 8 até que a convergência seja obtida, Eq. (3.34).

$$\frac{\|U^{k+1}\| - \|U^k\|}{\|U^{k+1}\|} \leq TOLERÂNCIA \quad (3.34)$$

9. Avaliação da probabilidade de falha final, Eq. (3.35).

$$P_f^{FORM} = \Phi(-\beta) \quad (3.35)$$

Além da probabilidade de falha, é possível obter o fator de importância probabilístico das variáveis com o método FORM, Eq. (3.36). Esse fator indica a contribuição de cada variável na probabilidade de falha do sistema considerado. (Pantoja, 2012)

$$\zeta_i = \alpha_i^2 \quad (3.36)$$

Onde α_i é o cosseno diretor com relação a variável X_i do vetor normal à superfície de falha no ponto de projeto e no espaço das variáveis reduzidas, Eq. (3.37).

$$\alpha_i = \frac{\nabla G(U^*)}{|\nabla G(U^*)|} \quad (3.37)$$

onde $\nabla G(U^*)$ é a componente do gradiente da função de falha no espaço reduzido definido no ponto de projeto U^* e $|\nabla G(U^*)|$ corresponde ao seu módulo.

A seguinte propriedade é válida para o fator de importância das variáveis:

$$\sum_{i=1}^n \zeta_i^2 = 1 \quad (3.38)$$

Somente as variáveis com fatores de importância probabilísticos altos contribuem efetivamente para a probabilidade de falha. As variáveis com fator de importância baixo ($\ll 1$) poderão ser consideradas como determinísticas.

3.5.2 - Método de Simulação de Monte Carlo

O método de Monte Carlo surgiu oficialmente em 1949, com o artigo *The Monte Carlo*

Method de autoria dos matemáticos John Von Neumann e Stanislaw Ulam. É um método de cálculo de probabilidade, que se baseia em simulações aleatórias, um dos gêneros mais antigos, sendo de fácil compreensão física e amplamente utilizados pelos engenheiros. Este método apresenta uma boa precisão, possui fácil implementação computacional, não exigindo muitos conhecimentos matemáticos (Almeida, 2008).

Na análise estrutural, a simulação pode ser entendida como uma forma de simular numericamente um experimento que na prática não é realizável. Esse experimento consiste em testar a estrutura para todas as combinações possíveis de resistências e de ações, sendo essas variáveis aleatórias e /ou processos estocásticos. Tal experimento não é realizável na prática devido ao custo da construção de protótipos de estruturas para testes ser muito elevado; as possibilidades de uso de modelos em escala serem limitadas; e/ou a probabilidade de falha de sistemas estruturais é muito pequena, o que torna a observação de falhas muito difícil (Beck, 2010).

A simulação de Monte Carlo envolve a repetição do processo de simulação. Utiliza-se em cada simulação um conjunto particular de valores das variáveis aleatórias geradas de acordo com a correspondente distribuição de probabilidade. Então, repete-se o processo, obtendo uma amostra de soluções sendo que cada uma corresponde a um conjunto diferente de valores das variáveis aleatórias.

Dois itens são necessários para a realização da simulação de Monte Carlo: (i) uma relação determinística para descrever a resposta da estrutura; (ii) as distribuições de probabilidade de todas as variáveis envolvidas no cálculo da resposta (Campos, 2009).

Choi (2007) diz que para gerar valores amostrais x_i para uma variável aleatória X com função de distribuição $F_X(x)$ deve-se

- Gerar um valor amostral x_i de uma variável aleatória uniforme distribuída entre 0 e 1;
- Calcular o valor amostral x_i pela expressão $x_i = F_X^{-1}(u_i)$, em que F_X^{-1} é a função inversa de F_X .

A estimativa de probabilidade de falha de um elemento estrutural que está sendo simulada pelo método de Monte Carlo é dada por (Kruger, 2008).

$$P_f = \frac{n}{N} \quad (3.39)$$

Sendo N o número total de simulações, que pode ser muito grande devido a computação veloz e barata e n é o número de ocorrência de falhas das N simulações.

Segundo Nogueira (2005), o número de simulações não deve ser inferior a $10^{(n+2)}$ e $10^{(n+3)}$. Logo, para as estruturas civis com probabilidade de falha de 10^{-3} a 10^{-9} , devem ser realizadas de 10^5 a 10^9 simulações.

Cada simulação produz uma resposta mecânica encontrando um domínio de segurança ou de falha, que são somados e relacionados com todos os eventos possíveis para a obtenção da probabilidade de falha (Nogueira, 2005).

3.6 - PROBABILIDADE DE FALHA DE SISTEMAS

Ao considerar a confiabilidade do sistema, é importante reconhecer que a falha de um único componente pode ou não significar falha na estrutura.

Existem dois tipos extremos de elementos estruturais que são comumente considerados nas análises de reabilitação do sistema: elementos frágeis e dúcteis. Os elementos frágeis se tornam completamente ineficazes depois de falhar, por exemplo, elemento de concreto não armado ou viga de madeira. Já os elementos flexíveis são capazes de manter sua capacidade de carga depois que "falhar", por exemplo, elementos de aço com baixo teor de carbono.

Os sistemas podem ser classificados em série ou em paralelo. Os sistemas em série são caracterizados pelo fato de que a falha de um elemento leva à falha imediata de todo o sistema, Figura 3.5(a). Enquanto, no sistema em paralelo, tem-se que todos os elementos devem falhar antes que o sistema falhe, Figura 3.5(b).

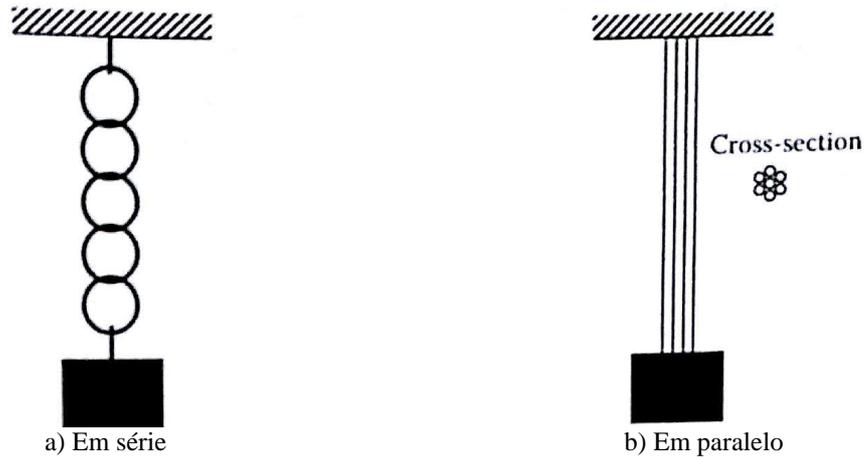


Figura 3.5 - Representação de sistemas (Nowac e Collins, 2000).

Um sistema em série pode ser considerado um sistema fraco, já que a falha do sistema corresponde à falha do elemento mais fraco do sistema. Supondo que as variáveis são estatisticamente independentes, a P_f pode ser calculada por

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_{f_i}] \quad (3.40)$$

Sendo que P_{f_i} é a a probabilidade do elemento i .

Já no sistema em paralelo, se um dos elementos falhar, perderá a capacidade de suportar a carga. Contudo, a carga será redistribuída entre os elementos remanescentes. E se, após a redistribuição da carga, o sistema não falhar, pode-se retomar a aplicação da carga até o próximo elemento falhar. Este processo de redistribuição de falhas e carga continua até falha geral do sistema do qual a P_f é dada por

$$P_f = \prod_{i=1}^n [P_{f_i}] \quad (3.41)$$

Contudo, a maioria das estruturas não são classificadas como série ou paralela, pois podem não falhar quando um único membro falhar, mas eles podem falhar antes de todos os membros falharem. Portanto, é necessário identificar os elementos que levam ou não a falha do sistema.

3.7 - CALIBRAÇÃO DE CÓDIGOS NORMATIVOS

A calibração de códigos normativos visa estabelecer valores para os coeficientes parciais de segurança que garantam o nível de segurança desejado da estrutura. A definição desses valores pode ser feita de diferentes maneiras por julgamento, experiência, otimização ou uma combinação entre elas.

O processo de calibração realizado através de julgamento tem base empírica e é caracterizado pela falta de racionalismo na modificação dos coeficientes envolvidos. Ele consiste em aceitar os parâmetros normativos caso o código normativo esteja em vigor há um bom tempo e esteja gerando resultados satisfatórios. Contudo, razões econômicas podem levar a alterações desses valores, a fim de reduzir o custo, acarretando a redução das margens de segurança. Por outro lado, caso haja muitos fatos em que o desempenho não foi satisfatório, pode-se haver a alteração dos valores a fim de proporcionar maior segurança estrutural. Quando não se tem nenhum dos motivos citados anteriormente para justificar a solicitação de mudanças desses valores, eles são mantidos e adotados como os valores ideais para aquele tipo de sistema estrutural.

Já o processo de calibração é baseado na experiência, geralmente, é utilizado quando há uma modificação no formato do código normativo utilizada por anos, do modo a transferir a experiência prática acumulada do código anterior para o novo. Pode ser feito ajustando os parâmetros normativos do novo código para que ele gere resultados semelhantes aos gerados pelo código antigo.

Por fim, tem-se a calibração realizada por um processo formal e explícito de otimização (Beck, 2010). Inicialmente, deve-se definir o escopo, o qual indicará a classe de estruturas que poderão ser dimensionadas segundo o código em estudo. Então, identifica-se os modos de falha relevantes para as estruturas inseridas nesse escopo. O código deverá então ser caracterizado por uma estrutura matemática. Os parâmetros normativos serão considerados como variáveis. Uma vez que essas variáveis tomam diferentes valores, um conjunto com diferentes formatos é gerado. Esse conjunto é denominado formato do código; o código original é umas das inúmeras realizações do formato. Cada realização é caracterizada por um particular conjunto de parâmetros, correspondente a um ponto específico no espaço dos parâmetros do formato.

3.7.1 - CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA

Para que determinado nível de segurança seja alcançado, pode-se realizar a calibração dos coeficientes parciais de segurança de um estado limite da estrutura específica. Inicialmente é necessário caracterizar estatisticamente as variáveis aleatórias envolvidas no problema e estabelecer um nível alvo de segurança baseado na classe da estrutura e nos materiais envolvidos. Por fim, uma tentativa inicial deverá ser proposta e sua avaliação de segurança feita por algum dos métodos vistos anteriormente (Sagrilo, 2003). Neste trabalho utilizou-se o método FORM.

Para gerar a superfície de resposta em termos da confiabilidade do sistema, deve-se realizar a variação nos coeficientes parciais de segurança relativos às ações do modelo (permanente e acidental) e efetuar o seu dimensionamento. Então, calcula-se o nível de segurança do sistema, representado pelo índice de confiabilidade, para cada par de valores. Em seguida, realiza-se um processo de interpolação através dos polinômios de Lagrange, obtendo a superfície de resposta dos índices de confiabilidade do sistema. Essa superfície de resposta pode ser representada no formato de curvas de nível onde é possível identificar as possíveis combinações de valores que levam ao índice de confiabilidade alvo.

3.7.2 - GERAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

A obtenção da função de falha em problemas reais de engenharia pode ser muito difícil, podendo ser até inviável em função dos recursos disponíveis. Isso pode acontecer com todos os métodos utilizados para obter a probabilidade de falha em confiabilidade, por exemplo, métodos de simulação ou FORM. Nesses casos, pode-se utilizar uma técnica chamada superfície de resposta, que consiste na adoção de uma função de falha aproximadora, cuja avaliação seja mais simples e que possa representar a função de falha original. Com isso, a busca do ponto de projeto se torna simples, rápida e eficiente, já que a superfície real é substituída por um polinômio aproximador. Esse polinômio poderá gerar superfícies lineares, quadráticas ou mesmo cúbicas.

Para a construção dessas superfícies de resposta, obtém-se um conjunto de soluções da estrutura, que corresponde a resposta da estrutura em cada ponto pertencente a esse conjunto. Após a obtenção desse conjunto de pontos, é possível traçar a superfície

aproximadora com a utilização dos polinômios via técnica de regressão linear ou não. Para escolher a expressão polinomial que mais se aplica a cada caso, deve-se observar dois aspectos importantes: o número de pontos para formação da superfície de resposta deverá ser maior ou igual ao número de constantes relativas ao polinômio aproximador e os pontos de ajuste devem ser escolhidos de forma a gerar um conjunto de equações linearmente independentes (Beck, 2010).

Uma vez obtida a função de falha aproximada, qualquer um dos métodos de obtenção da probabilidade de falha poderá ser utilizado. No caso dos métodos analíticos uma das principais vantagens é que a função gradiente é facilmente obtida. A maior dificuldade na utilização da técnica deve-se às aproximações implícitas do método, o que pode conduzir a respostas não precisas e dificuldades de convergência (Pantoja, 2012).

3.7.3 - Polinômios interpoladores de Lagrange

Os polinômios interpoladores de Lagrange têm sido bastante utilizados na obtenção da função de falha aproximadora. Esta foi a técnica adotada neste trabalho e será descrita a seguir.

No intervalo $a \leq x \leq b$, uma função $f(x)$ contínua é representada por uma função aproximadora $\phi(x)$. Considerando inicialmente $(n + 1)$ pontos no intervalo, é possível criar $(n + 1)$ polinômios de Lagrange $Y_i(x)$ de grau n , Eq. (3.42).

$$Y_i(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1})(x - x_n)}{(x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1})(x_i - x_n)} \quad (3.42)$$

Sendo que:

$$Y_i(x) = \delta_{ij} \quad (3.43)$$

Adotando-se valor unitário para $i = j$ e valor nulo para $i \neq j$. Pode-se então, utilizar os polinômios de Lagrange na geração de funções aproximadoras conforme Eq. (3.44).

$$\phi(x) = \sum_{i=1}^n Y_i(x) f_i \quad (3.44)$$

Essa expressão é válida em qualquer dos $(n+1)$ pontos x_j resultando em:

$$\phi(x_j) = \sum_{i=1}^n Y_i(x_j) f_i = f_i \quad (3.45)$$

Para gerar a superfície de resposta procurada, procede-se de forma análoga aos polinômios de Lagrange de primeiro grau. Deste modo, as funções de interpolações bidimensionais poderão ser geradas por meio de produtos de polinômios de Lagrange, Eq. (3.46).

$$N_{ij}(x, y) = Y_{x_i}(x) Y_{y_j}(y) \quad (3.46)$$

Então, monta-se a superfície de resposta aproximadora, considerando $f_{ij} = \overline{\beta}_{ij}$, Eq. (3.47).

$$Superf_{\beta}(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n N_{ij}(x, y) \overline{\beta}_{ij}(x, y) \quad (3.47)$$

Onde $\overline{\beta}_{ij}(x, y)$ serão os valores da resposta da estrutura para cada par de variáveis.

3.8 - PESQUISAS RECENTES

Nas últimas décadas, o uso de sistemas estruturais mistos de aço e concreto recebeu atenção significativa tanto experimentalmente quanto numericamente. Tais estudos abordam diversos tópicos como a viabilidade de novos conectores, a resistência desses sistemas a situações de incêndio, Kirchhof (2004) e Rocha (2012), o ganho de resistência em relação aos sistemas convencionais, entre outros. A seguir serão descritos alguns estudos relevantes nessa área que motivaram este trabalho.

Sobre novas possibilidades de tipo de conectores, destacam-se os estudos de Cavalcante (2010), Chater (2015), Barbosa (2016), Rodrigues et al. (2017) e Le et al.. Rodrigues et al. (2017) realizou um estudo experimental a partir de testes *pull out* em conectores semi-rígidos, com foco nos modos de falha associados à falha do conector de cisalhamento, analisando a resistência do conector, a eficiência da solda e da conexão entre os componentes da viga mista. Le et al. (2016) apresentam os resultados de ensaios *push-out* para conectores do tipo *Crestbond*, nos quais demonstra-se que a eficiência desses conectores é equivalente à resistência dos conectores convencionais. Esses estudos mostram a necessidade do estudo dos modos de falha relacionados aos

conectores de cisalhamento, os quais são fundamentais para que o sistema funcione como um sistema misto.

Outro estudo que se preocupa com a eficiência do trabalho em conjunto dos componentes do sistema misto é o de Xing et al. (2016), que estudou o uso de concreto com adição de borracha em vigas mistas a fim de avaliar a contribuição da sua ductilidade à resistência do sistema. Os resultados das simulações mostram que o concreto utilizado reduziu a dimensão das fissuras e mitigou o deslizamento na interface do perfil e do concreto, aumentando a resistência da ligação e viabilizando o aumento do tamanho dos vãos.

E, evidenciando a importância da análise da interface aço concreto, tem-se ainda o estudo de Zhao et al. (2012) que propõe um macro-modelo computacionalmente eficiente para investigar a resposta não-linear de vigas mistas de aço e concreto. A metodologia explica a não-linearidade do sistema e o deslizamento na interface entre a laje de concreto e o perfil metálico. Os resultados mostram que o macro modelo proposto pode capturar as características essenciais da resposta não-linear da deformação-carga de vigas mistas.

Dessa forma, entende-se a importância do estudo do grau de conexão adotado em projeto de sistemas mistos, pois este fator distingue os sistemas convencionais, sem conexão, dos sistemas mistos, que podem ter conexão total ou parcial. Sobre este assunto, destaca-se o estudo de He e Yang (2015) que apresenta um modelo de viga mista com interação parcial considerando a deformação cisalhante de alta ordem dos seus elementos, mostrando a influência dos parâmetros rigidez dos conectores cisalhantes, módulo cisalhante e índice de esbeltez nas deflexões de vigas mistas em balanço, nas forças internas e nas tensões. As equações diferenciais governantes e as condições de contorno foram formuladas por meio do princípio da mínima energia potencial em vigas mistas, considerando uma análise linear elástica estática de alta ordem. Além disso, são apresentadas soluções analíticas para vigas mistas em balanço submetidas a um carregamento uniforme, realizadas a partir da técnica da Transformada de Laplace. Tais soluções são validadas utilizando o MEF (Método dos Elementos Finitos). Com isso, He e Yang (2015) mostram que o deslizamento interfacial tem um efeito importante nas deflexões, nas distribuições de forças internas e nas tensões.

Nessa mesma linha, mas focando no projeto de sistemas mistos, tem-se o trabalho de Turmo et al. (2015) que apresenta um modelo de elementos finitos para a análise de vigas mistas com interação parcial a fim de facilitar o processo de dimensionamento de tais sistemas. As principais vantagens do método utilizado são a aplicabilidade e a versatilidade. É um método intuitivo e que pode ser amplamente aplicado, pois é capaz de lidar com qualquer combinação de carga e com situações limites. Além disso, o modelo proposto permite a análise de estruturas estaticamente indeterminadas, por exemplo estruturas com conectores distribuídos não uniformemente. Com isso, realizou-se, também, o estudo da influência da rigidez da conexão no comportamento de vigas mistas com diferentes perfis I.

Outra vertente busca validar os parâmetros analisados numericamente a partir de resultados experimentais, Chung et al. (2016), Kumar e Reddy (2016), Leaf e Laman (2013), Zhao e Yuan (2010). Shao et al. (2015) realizou o estudo dos parâmetros estatístico da resistência de vigas mistas biapoiadas com interação total. Para isso, foram realizados ensaios da resistência a flexão de diferentes tipos de vigas mistas e da resistência de cisalhamento dos conectores. Os resultados dos ensaios foram tratados, obtendo-se os parâmetros estatísticos a respeito da resistência das vigas mistas, os quais eram indeterminados nos modelos computacionais. Este estudo mostra a importância da consideração dos parâmetros estatísticos no estudo dos sistemas mistos, garantindo que a variabilidade das variáveis envolvidas no sistema são devidamente abordadas.

Wang et al. (2017) desenvolve uma teoria para análise de vigas mistas de aço e concreto, na qual determinou-se uma fórmula explícita para a rigidez de flexão equivalente das vigas mistas, onde as deflexões das vigas mistas podem ser calculadas como se fossem vigas comuns de Bernoulli.

Zou et al. (2016) realizou um estudo a partir de uma simulação numérica sobre a propagação interna de fissuras, o modo de falha e a capacidade máxima de suporte de carga de vigas mistas de aço-concreto. Para estudar o mecanismo de falha, a viga mista foi modelada, considerando apenas uma parte da interação na interface entre o aço e o concreto. Os resultados indicam que existem dois modos de falha: quando a força da interface é menor do que a do concreto, a falha ocorre na interface de aço e concreto; quando a resistência da interface é maior do que a do concreto, os modos de falha são a

falha de coesão, isto é, o concreto é removido por causa das fissuras de cisalhamento na borda do concreto.

Holicky e Markova (2006) estudaram o nível de segurança de estruturas de concreto dimensionadas segundo os EUROCODES. Este trabalho serviu de input para o trabalho de Santos et al. (2014) que apresenta a análise da segurança de elementos estruturais submetidos à flexão simples, em concreto armado, em aço e em material misto, e dimensionados segundo as normas ABNT NBR 8681:2003, ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 8800:2008. O estudo permite uma comparação da segurança relativa de vigas produzidas com estes materiais e através destas normas. Os resultados mostram que, enquanto os índices de confiabilidade dos elementos de concreto são satisfatórios, as vigas metálicas apresentam resultados abaixo dos limites estabelecidos por normas internacionais. No caso das vigas mistas, os índices de confiabilidade encontrados estão entre os valores para concreto e aço.

Mujagi e Easterling (2009) Este artigo apresenta resultados de um estudo abrangente de confiabilidade de vigas mistas dimensionadas segundo a AISC. O estudo considera as mudanças de especificações desde o estudo de confiabilidade de 1979 por Galambos e Ravindra, e avalia propostas recentes de mudanças no projeto de conectores de cisalhamento. Uma comparação de três métodos de design diferentes é apresentada com base em 15.064 casos de feixe composto. É proposto um método para considerar o efeito do grau de conexão de corte no fator de redução de força.

Alguns estudos mostram a confiabilidade de modos de falha específicos de elementos estruturais em diferentes materiais, por exemplo, Castanheira (2004) apresenta a avaliação da confiabilidade de vigas metálicas, para o estado limite de flexão, projetadas segundo a ABNT NBR 8800:2008, indicando a variabilidade encontrada no índice de confiabilidade. Souza (2011) apresentou a confiabilidade de vigas de concreto armado reforçadas à torção com compósito de fibra de carbono. E, Aslani et al. (2016) propõe a calibração de fatores de segurança de vigas mistas sob flexão.

Com isso, destaca-se a relevância deste trabalho para o aperfeiçoamento do dimensionamento de estruturas mistas, pois avalia-se o β dos modos de falha de vigas mistas dimensionadas segundo a norma brasileira, mostrando os fatores relevantes desse sistema.

4 - METODOLOGIA

Neste trabalho, apresenta-se o estudo da confiabilidade dos modos de falha de vigas mistas biapoiadas com seção de aço compacta. Este estudo aborda o fator de importância das variáveis aleatórias envolvidas no dimensionamento, a análise de sensibilidade em relação a alguns parâmetros utilizados, a influência dos fatores de segurança no β , bem como a análise dos valores adotados pelas normas e o custo-benefício de diferentes graus de conexão, Figura 4.1.

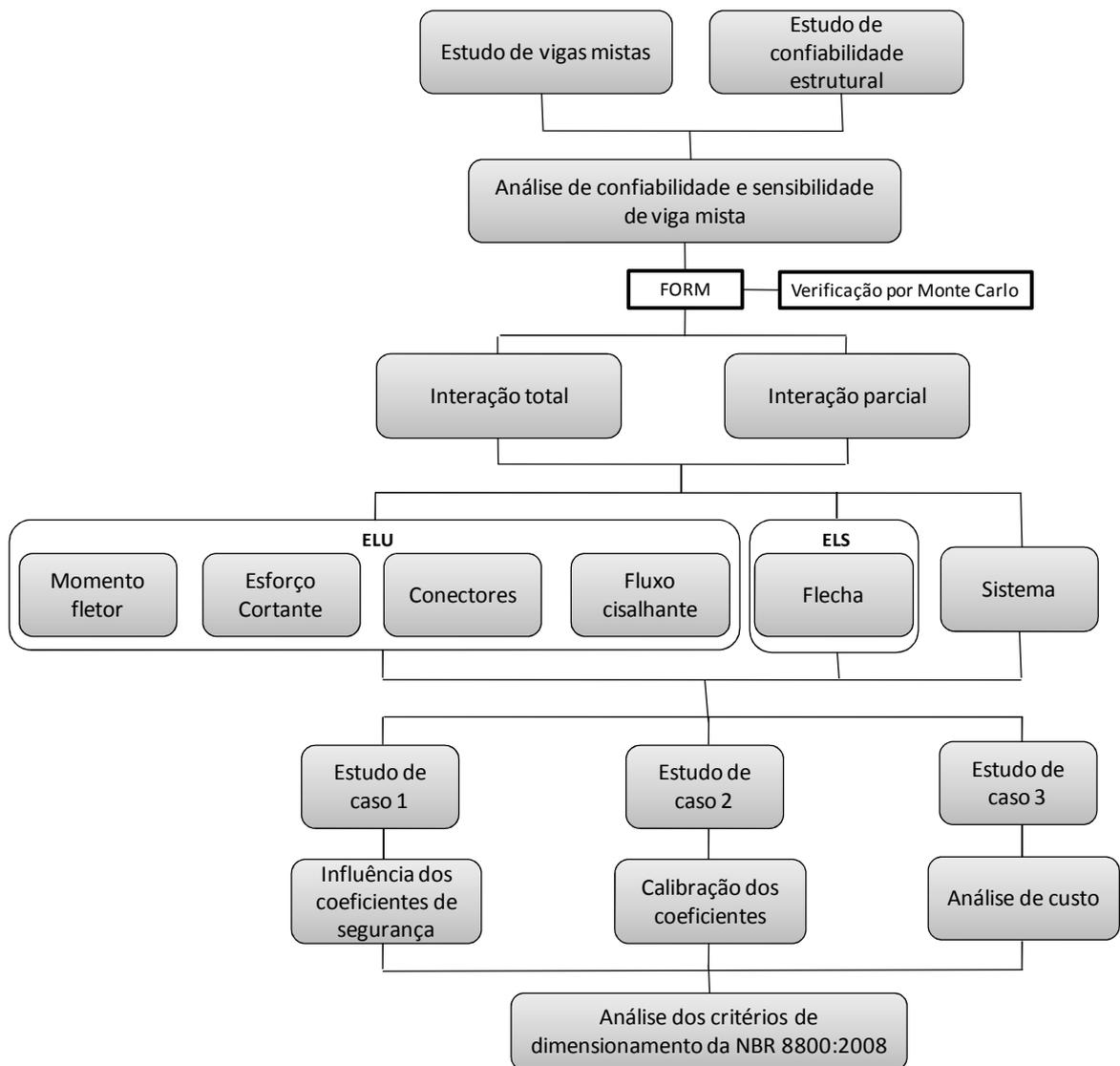


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.

Para isso, na obtenção do índice de confiabilidade das vigas mistas e dos seus modos de falha, adotou-se o método FORM descrito no FERUM (*Finite Element Reliability Using*

Matlab), o qual é executado no MATLAB e permite explorar vários tipos de problemas, analisar dados, apresentar e comunicar os resultados, Figura 4.2.

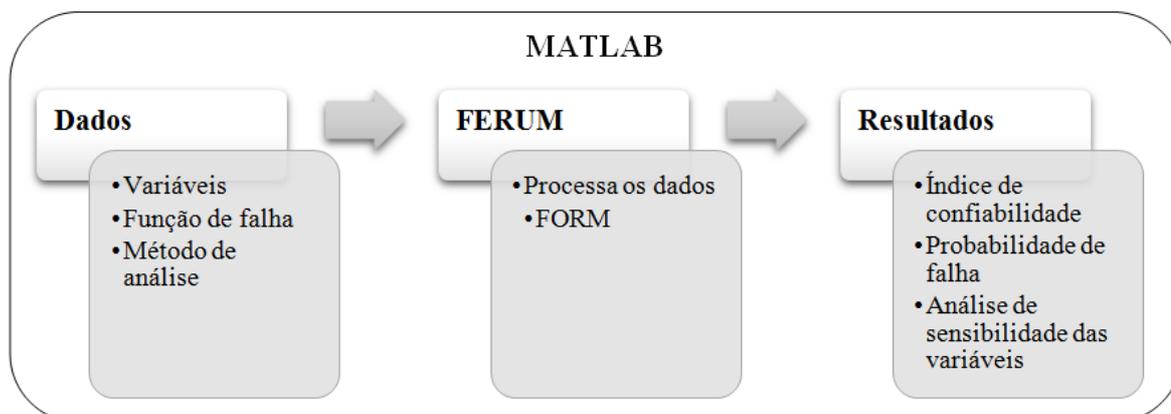


Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.

O FERUM funciona como uma caixa de ferramentas do Matlab que começou a ser desenvolvida em 1999 sob a liderança de Armen Der Kiureghian na Universidade da Califórnia em Berkeley (UCB). Este código de confiabilidade estrutural foi desenvolvido e mantido por Terje Haukaas, com as contribuições de muitos pesquisadores da UCB e é um código gratuito.

A versão utilizada nesta pesquisa é a 4.1 que foi desenvolvida com base em um trabalho realizado no *Institut Français de Mécanique Avancée* (IFMA) em Clermont-Ferrand, França. Esta nova versão oferece capacidades melhoradas, tais como técnicas baseadas em simulação, análise da sensibilidade global, etc.

A utilização do FERUM consiste na edição dos arquivos referentes às variáveis aleatórias na pasta *inputfiles* e às funções de falha na pasta *gfunctions*. No arquivo referente às variáveis deve-se entrar com o nome dessas variáveis e com os parâmetros estatísticos das mesmas. No arquivo referente às funções de falha, entra-se com as variáveis determinísticas e as equações que definem a função de falha. Em seguida, deve-se executar esses arquivos e os arquivos *gfun* e *gfunbasic*. Por fim, executa-se o arquivo *ferum*, a partir do qual será solicitada a escolha do tipo de análise que se deseja, FORM, Monte Carlo, SORM, entre outras. Após essa escolha, o programa apresenta os resultados obtidos, entre eles β , P_f , ζ , ponto de projeto X^* , os quais são apresentados no apêndice deste trabalho para cada ponto utilizado na construção dos gráficos.

Para a análise dos fatores de segurança, executou-se os exemplos com os valores estabelecidos na norma e com esses fatores igualados a 1, como é de praxe na análise de confiabilidade, não considerando-os na obtenção da P_f da estrutura, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Fatores de segurança.

		Considerando os fatores de segurança	Sem considerar os fatores de segurança
Carga permanente	ϕ_g	1,4	1
Carga variável	ϕ_q	1,5	1
Concreto	γ_c	1,4	1
Aço do perfil metálico	γ_a	1,1	1
Aço da armadura	γ_s	1,15	1

Na análise de sensibilidade, foram adotados diferentes valores para os parâmetros que se desejava analisar e computados o β para cada um desses valores. Com isso, foi possível analisar a influência desses parâmetros nos modos de falha do sistema.

Quanto a análise do custo benefício em relação aos graus de conexão, realizou-se a quantificação dos custos envolvidos em cada viga mista de acordo com a composição de custo abordada por Guimarães et al. (2010). Para atualização dos valores de cada item, realizou-se pesquisa de mercado com os principais fornecedores de cada item.

4.1 - ESTUDO DE CASO 1: VIGA ESCORADA

Neste capítulo será apresentado uma estrutura de viga mista de aço e concreto de alma cheia dimensionada segundo a ABNT NBR 8800:2008. Trata-se de uma viga mista escorada, simplesmente apoiada em um vão de 9 metros, espaçadas a 2,80 metros, Figura 4.3.

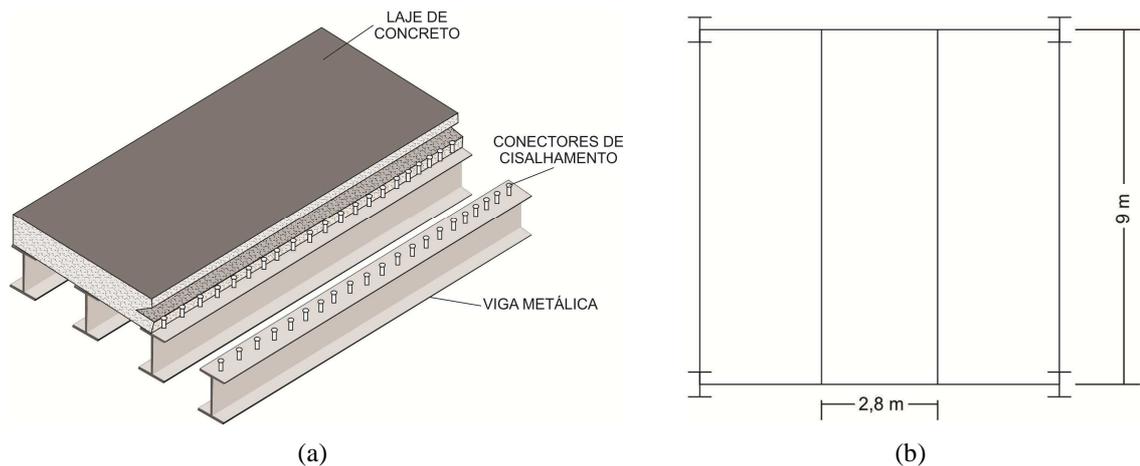


Figura 4.3 - Viga mista do estudo de caso 1: (a) Vista tridimensional; (b) Vista superior.

Composta pelo perfil metálico VS 400x49 com resistência (f_y) igual a 250 MPa e de seção compacta, e pela laje maciça de concreto de 10 cm de altura (h_c) e resistência (f_c) igual a 20 MPa. Os conectores são do tipo *stud* com diâmetro igual a 15,9 mm. As cargas são uniformemente distribuídas e estão descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Cargas atuantes na viga do estudo de caso 1.

	Cargas antes do concreto atingir 75% de resistência	Cargas depois do concreto atingir 75% de resistência
Carga permanente	$g_1 = 7,0 \text{ kN/m}$	$g_2 = 5,0 \text{ kN/m}$
Carga variável	$q_1 = 1,5 \text{ kN/m}$	$q_2 = 8,5 \text{ kN/m}$

As funções de falha utilizadas analisarão a confiabilidade estrutural da viga no estado limite último, flexão, esforço cortante e fluxo cisalhante e no estado limite de serviço, deslocamentos. Serão comparadas os índices de confiabilidade dos casos de interação total, 26 conectores, e parcial, 80%, 60% e 40%.

As variáveis aleatórias são definidas conforme especificado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Variáveis aleatórias do estudo de caso 1.

	Variáveis aleatórias	Representação	Distribuição	μ	Coefficiente de variação
Solicitantes	Carga permanente	g_1	Normal	7,0 kN/m	5 %
		g_2	Normal	5,0 kN/m	5 %
	Carga variável	q_1	Gumbel	1,5 kN/m	25 %
		q_2	Gumbel	8,5 kN/m	25 %
Resistentes	Resistência à compressão do concreto	f_c	Lognormal	20 MPa	17 %
	Resistência à tração do aço do perfil	f_y	Lognormal	250 MPa	7 %
	Resistência à tração do aço da armadura	f_u	Lognormal	500 MPa	5 %
	Largura efetiva da laje	b	Normal	225 cm	7,5 %
	Altura da laje	h_c	Normal	10 cm	4%

As variáveis determinísticas são definidas conforme especificado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Variáveis determinísticas do estudo de caso 1.

Variáveis determinísticas	Representação	Valor adotado
Tamanho do vão	L	9 m
Altura do perfil	h_a	40 cm
Área de aço do perfil	A	62 cm ²
Largura da mesa do perfil	b_f	20 cm
Espessura da alma do perfil	t_0	0,63 cm
Diâmetro do conector	D_{conec}	15,9 mm
Área de aço da armadura	A_s	2,0 cm ² /m
Módulo de elasticidade do aço	E_s	200.000 MPa
Inércia do perfil	I_x	17.393 cm ⁴

4.2 - ESTUDO DE CASO 2: VIGA NÃO ESCORADA

Neste capítulo será apresentado uma estrutura de viga mista de aço e concreto de alma cheia dimensionada segundo a ABNT NBR 8800 (2008). Trata-se de uma viga mista não escorada, simplesmente apoiada em um vão de 9 metros, espaçadas a 2,75 metros, Figura 4.4.

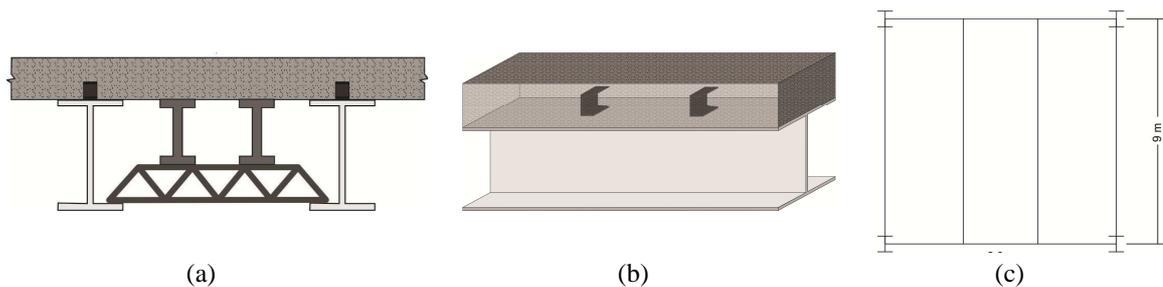


Figura 4.4 - Viga mista do estudo de caso 2: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral; e (c) Vista superior.

Composta pelo perfil metálico VS 350x42 com resistência (f_y) igual a 290 MPa e de seção compacta, e pela laje maciça de concreto de 12 cm de altura (h_c) e resistência (f_c) igual a 20 MPa. Os conectores são do tipo perfil U laminado 76x61x3mm. As cargas são uniformemente distribuídas, conforme Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Cargas atuantes na viga do estudo de caso 2.

	Cargas antes do concreto atingir 75% de resistência	Cargas depois do concreto atingir 75% de resistência
Carga permanente	$g_1 = 6,8 \text{ kN/m}$	$g_2 = 4,5 \text{ kN/m}$
Carga variável	$q_1 = 1,5 \text{ kN/m}$	$q_2 = 6,3 \text{ kN/m}$

As funções de falha utilizadas analisarão a confiabilidade estrutural da viga no estado limite último, flexão, esforço cortante e fluxo cisalhante e no estado limite de serviço, deslocamentos. Serão comparadas os índices de confiabilidade dos casos de interação total, 19 conectores, e parcial, 80%, 60% e 40%.

As variáveis aleatórias são definidas conforme especificado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Variáveis aleatórias do estudo de caso 2.

	Variáveis aleatórias	Representação	Distribuição	μ	Coefficiente de variação
Solicitantes	Carga permanente	g_1	Normal	6,8 kN/m	5 %
		g_2	Normal	4,5 kN/m	5 %
	Carga variável	q_1	Gumbel	1,5 kN/m	25 %
		q_2	Gumbel	6,3 kN/m	25 %
Resistentes	Resistência à compressão do concreto	f_c	Lognormal	20 MPa	17 %
	Resistência à tração do aço do perfil	f_y	Lognormal	290 MPa	7 %
	Resistência à tração do aço da armadura	f_u	Lognormal	500 MPa	5 %
	Largura efetiva da laje	b	Normal	225 cm	7,5 %
	Altura da laje	h_c	Normal	12 cm	4%

As variáveis determinísticas são definidas conforme especificado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Variáveis determinísticas do estudo de caso 2.

Variáveis determinísticas	Representação	Valor adotado
Tamanho do vão	L	9 m
Altura do perfil	h_a	35 cm
Área de aço do perfil	A	53,7 cm ²
Largura da mesa do perfil	b_f	20 cm
Espessura da alma do perfil	t_0	0,475 cm
Largura do conector	L_{cs}	5,0 cm
Espessura da mesa do conector	t_{fcs}	0,69 cm
Espessura da alma do conector	t_{wcs}	0,432 cm
Área de aço da armadura	A_s	2,4 cm ² /m
Módulo de elasticidade do aço	E_s	200.000 MPa
Inércia do perfil	I_x	12.453 cm ⁴
Módulo de resistência plástico do perfil	Z	777,0 cm ³

4.3 - ESTUDO DE CASO 3: VIGA COM DIFERENTES CONECTORES

Neste capítulo será apresentado uma estrutura de viga mista de aço e concreto de alma cheia dimensionada segundo a ABNT NBR 8800:2008. Trata-se de uma viga mista escorada, simplesmente apoiada em um vão de 9 metros, espaçadas a 2,80 metros, Figura 4.5.

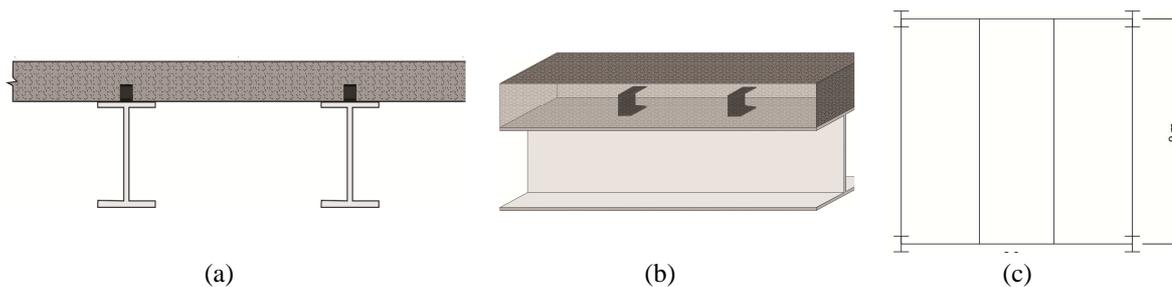


Figura 4.5 - Viga mista do estudo de caso 3: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral; e (c) Vista superior.

Composta pelo perfil metálico W 360x51 com resistência (f_y) igual a 250 MPa e de seção compacta, e pela laje maciça de concreto de 10 cm de altura (h_c) e resistência (f_c) igual a 20 MPa. As cargas são uniformemente distribuídas, conforme Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Cargas atuantes no estudo de caso 3.

	Cargas antes do concreto atingir 75% de resistência	Cargas depois do concreto atingir 75% de resistência
Carga permanente	$g_1 = 7,0 \text{ kN/m}$	$g_2 = 5,0 \text{ kN/m}$
Carga variável	$q_1 = 1,5 \text{ kN/m}$	$q_2 = 8,5 \text{ kN/m}$

As funções de falha utilizadas analisarão a confiabilidade estrutural da viga no estado limite último, flexão, esforço cortante e fluxo cisalhante. Serão comparadas os índices de confiabilidade dos casos de interação total e parcial, 80%, 60% e 40%,.

As variáveis aleatórias são definidas conforme especificado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Variáveis aleatórias do estudo de caso 3.

	Variáveis aleatórias	Representação	Distribuição	μ	Coefficiente de variação
Solicitantes	Carga permanente	g_1	Normal	7,0 kN/m	5 %
		g_2	Normal	5,0 kN/m	5 %
	Carga variável	q_1	Gumbel	1,5 kN/m	25 %
		q_2	Gumbel	8,5 kN/m	25 %
Resistentes	Resistência à compressão do concreto	f_c	Lognormal	20 MPa	17 %
	Resistência à tração do aço do perfil	f_y	Lognormal	250 MPa	7 %
	Resistência à tração do aço da armadura	f_u	Lognormal	500 MPa	5 %
	Largura efetiva da laje	b	Normal	225 cm	7,5 %
	Altura da laje	h_c	Normal	10 cm	4%

As variáveis determinísticas são definidas conforme especificado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Variáveis determinísticas do estudo de caso 3.

Variáveis determinísticas	Representação	Valor adotado
Tamanho do vão	L	9 m
Altura do perfil	h_a	36 cm
Área de aço do perfil	A	64,8 cm ²
Largura da mesa do perfil	b_f	17,1 cm
Espessura da alma do perfil	t_0	0,72 cm
Área de aço da armadura	A_s	2,0 cm ² /m
Módulo de elasticidade do aço	E_s	200.000 MPa
Inércia do perfil	I_x	14.222 cm ⁴

Foram comparados os conectores são do tipo perfil U laminado 76x61x3mm e do tipo *stud* com diâmetro igual a 3/4".

Realizou-se a quantificação dos custos envolvidos em cada viga mista de acordo com a composição de custo abordada por Guimarães et al. (2010). Para atualização dos valores de cada item, realizou-se pesquisa de mercado com os principais fornecedores de cada item. Na Tabela 4.11, apresenta-se a composição de custo da viga com conectores do tipo *stud* com diferentes graus de conexão.

Tabela 4.11 - Composição de custo com conector do tipo *stud*.

Descrição	Valor Unitário (R\$)	$\eta = 100\%$		$\eta = 80\%$		$\eta = 60\%$		$\eta = 40\%$	
		Qtd	Valor Total (R\$)	Qtd	Valor Total (R\$)	Qtd	Valor Total (R\$)	Qtd	Valor Total (R\$)
Perfil W 360x51	246,84	9	2.221,56	9	2.221,56	9	2.221,56	9	2.221,56
Concreto	220	2,03	445,50	2,03	445,50	2,03	445,50	2,03	445,50
Conector	7,25	19	137,75	16	116	12	87,00	8	58,00
Fôrma	25	20,25	506,25	20,25	506,25	20,25	506,25	20,25	506,25
Armadura	30	20,25	607,50	20,25	607,50	20,25	607,50	20,25	607,50
Solda	0,19	19	3,61	16	3,04	12	2,28	8	1,52
Total			R\$ 3.922,17		R\$ 3.899,85		R\$ 3.870,09		R\$ 3.840,33

Na Tabela 4.12, apresenta-se a composição de custo da viga com conectores do tipo perfil U com diferentes graus de conexão.

Tabela 4.12 - Composição de custo com conector do tipo perfil U.

Descrição	Valor Unitário (R\$)	$\eta = 100\%$		$\eta = 80\%$		$\eta = 60\%$		$\eta = 40\%$	
		Qtd	Valor Total (R\$)	Qtd	Valor Total (R\$)	Qtd	Valor Total (R\$)	Qtd	Valor Total (R\$)
Perfil W 360x51	246,84	9	2.221,56	9	2.221,56	9	2.221,56	9	2.221,56
Concreto	220	2,03	445,50	2,03	445,50	2,03	445,50	2,03	445,50
Conector	1,12	20	22,45	16	17,96	12	13,47	8	8,98
Fôrma	25	20,25	506,25	20,25	506,25	20,25	506,25	20,25	506,25
Armadura	30	20,25	607,50	20,25	607,50	20,25	607,50	20,25	607,50
Solda	0,75	20	15	16	12	12	9	8	6
Total			R\$ 3.818,26		R\$ 3.810,77		R\$ 3.803,28		R\$ 3.795,79

Adotou-se o valor da viga com conector do tipo pino com cabeça e grau de conexão 100% como referência. Portanto, nos gráficos que serão apresentados nos resultados, os custos relativos são dados em função deste custo, como percentual do mesmo.

4.4 - FUNÇÕES DE FALHA

As funções de falha estudadas neste trabalho foram estabelecidas a partir dos estados limites descritos na ABNT NBR 8800:2008. Cada um desses estados limites representam uma condição que o elemento estrutural deve ser capaz de desempenhar. Isto significa, que os esforços e deformações devem ser inferiores a certos valores limites, que dependem do material usado e do tipo de estrutura adotada. Sendo assim, cada estado limite pode ser considerado um modo de falha.

Neste trabalho, serão analisadas as seguintes funções de falha para o estado limite último:

- Momento fletor (G_M);
- Momento fletor na etapa construtiva (G_{MC}), para os casos de construção não escorada;
- Esforço cortante (G_V);
- Resistência dos conectores de cisalhamento (G_C);
- Fluxo cisalhante (G_A).

Para o estado limite de serviço:

- Deslocamento no meio do vão (G_δ).

E, também, a função de falha que representa o sistema.

Para realizar a análise de confiabilidade, transforma-se a inequação apresentada na Eq. (2.1) em uma equação de falha (G_i), Eq. (4.1), a partir da qual são estabelecidos os modos de falha.

$$G_i(R_i(X), S_i(X)) = R_i(X) - S_i(X) \quad (4.1)$$

As variáveis aleatórias abrangem as ações que atuam no sistema estrutural, as características do material, como resistência do concreto, e do próprio sistema, como tamanho do vão.

A análise estrutural deve considerar a influência de todas as ações que possam ter efeitos significativos sobre a estrutura. As ações podem ser classificadas, por exemplo, no que diz respeito à variação temporal (permanente, variável e acidental), à origem (direta ou indireta), à variação no espaço (fixo ou móvel) e à natureza ou resposta estrutural (estática e dinâmica).

Ações permanentes são aquelas que atuam sobre a estrutura por toda a sua vida útil com uma mudança insignificante de magnitude ao longo do tempo, ou com uma variação sempre na mesma direção ou até que a ação alcance um certo limite (ação monotônica).

Ações variáveis são aquelas que têm duração variável, intensidade ou direção ao longo do tempo e que não são monotônicas. Por exemplo: cargas de utilização em edifícios, eólica e térmica.

Ações acidentais são aquelas que têm duração muito curta e pequena probabilidade de ocorrência durante a vida de uma estrutura, mas têm intensidade significativa como explosões, impacto e terremotos de grande magnitude.

A ABNT NBR 8681:2003 define os valores característicos de ações permanentes como valores médios, quantil 50%, quer quando os efeitos são desfavoráveis, ou quando os efeitos são favoráveis. O modelo probabilístico para ações permanentes geralmente é a distribuição normal.

De acordo com ABNT NBR 8681:2003, o valor característico das ações variáveis estabelecidas por consenso e relatadas em códigos específicos correspondem a valores que têm 25% a 35% de probabilidade de serem excedidos em um período de 50 anos. As ações variáveis de utilização em edifícios, comumente são representadas usando distribuições de Gumbel.

Neste trabalho, apenas as ações permanentes e ações variáveis de utilização são consideradas.

Para combinações normais no estado limite último, as ações permanentes e a ação variável devem ser combinadas conforme Eq. (4.2).

$$S_d = \phi_g g + \phi_q q \quad (4.2)$$

Onde g é o valor do efeito de ação permanente, q é o valor do efeito de ação variável, e ϕ_g e ϕ_q seus respectivos coeficientes parciais de segurança.

A Eq. (4.2) deve ser aplicada a cada tipo de efeito de ação ao qual um elemento estrutural é submetido (momento fletor, esforço cortante, torque, etc).

A ABNT NBR 8800:2008 estabelece um valor para os fatores parciais de ações permanentes, $\phi_g = 1,4$, e variáveis, $\phi_q = 1,5$. O AISC define $\phi_g = 1,25$ e $\phi_q = 1,6$. E, no EUROCÓDIGO 4, $\phi_g = 1,35$ e $\phi_q = 1,55$.

A seguir serão descritos os modos de falha considerando o dimensionamento estabelecido na ABNT NBR 8800:2008 de uma viga mista biapoiada com carga distribuída Q e vão L , Figura 4.6.

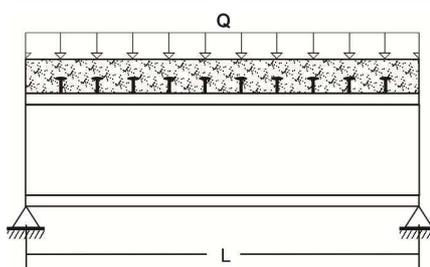


Figura 4.6 - Viga mista biapoiada com carga distribuída Q e vão L .

A funções de falha que serão apresentadas a seguir fazem menção as equações estabelecidas na norma, nas quais se utilizam os valores característicos. Contudo, para a análise de confiabilidade utilizam-se os valores médios e seus parâmetros estatísticos; portanto, deve-se considerar tais valores nas seguintes funções em vez dos valores característicos.

4.4.1 - Momento fletor

Este modo de falha analisa o desempenho do sistema em relação às solicitações de flexão impostas, Figura 4.7.

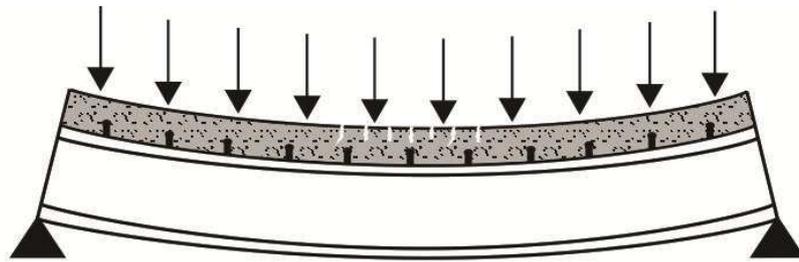


Figura 4.7 - Flexão.

Este modo de falha é avaliado conforme a Eq. (4.3).

$$G_M = M_{Rd} - M_{Sd} \quad (4.3)$$

Onde,

$$M_{Sd} = S_d \frac{L^2}{8} \quad (4.4)$$

A falha do sistema estrutural devido a essa função inicia-se com o surgimento de deslocamento excessivo no meio do vão e de fissuras na face superior do concreto seguido do colapso da viga, que ocorre quando as solicitações impostas são maiores do que a sua resistência à flexão.

4.4.2 - Momento fletor na etapa construtiva

Este modo de falha analisa o desempenho do sistema em relação às solicitações de flexão impostas na etapa construtiva, ou seja, vigas mistas não escoradas, onde as solicitações são resistidas pelo perfil metálico, Figura 4.8.

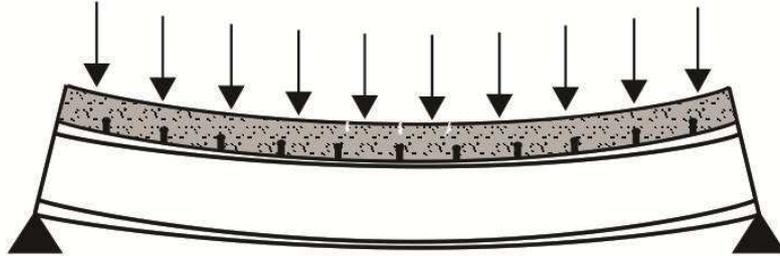


Figura 4.8 - Flexão na etapa construtiva.

Este modo de falha é avaliado conforme a Eq. (4.5).

$$G_{MC} = MC_{Rd} - MC_{Sd} \quad (4.5)$$

Onde,

$$MC_{Sd} = S_d \frac{L^2}{8} \quad (4.6)$$

Sendo que no cálculo do S_d consideram-se apenas as cargas da etapa construtiva, isto é, as cargas atuantes antes do concreto atingir 75% da sua resistência.

Nesta falha, não se observa o esmagamento do concreto, mas é possível observar o deslocamento excessivo no meio do vão e a parte inferior da peça metálica ficando delgada antes de atingir o colapso.

4.4.3 - Esforço cortante

Este modo de falha analisa o desempenho do sistema em relação aos esforços cortantes impostos, Figura 4.9.

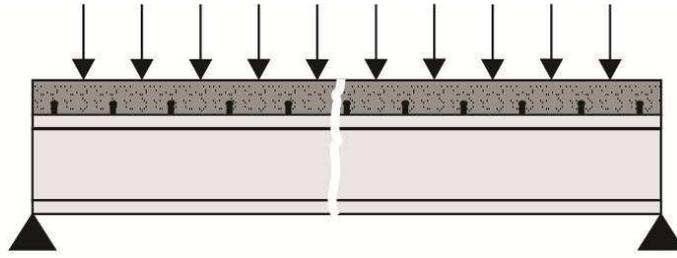


Figura 4.9 - Representação ilustrativa da falha devido o esforço cortante.

Este modo de falha é avaliado conforme a Eq. (4.7).

$$G_v = V_{Rd} - V_{Sd} \quad (4.7)$$

Onde,

$$V_{Sd} = S_d \frac{L}{2} \quad (4.8)$$

Neste caso a falha se dá pelo cisalhamento que ocorre em algum ponto do sistema.

4.4.4 - Resistência dos Conectores

Este modo de falha analisa o desempenho do sistema em relação à resistência dos conectores ao cisalhamento. Dado por

$$G_c = nQ_{Rd} - \eta Q_{Sd} \quad (4.9)$$

Adotou-se que a redução da solicitação é proporcional ao grau de conexão. Sendo que, a parte dessa solicitação que não é absorvida, resulta no deslizamento.

Para conectores tipo perfil U laminado, observa-se a resistência do conector, Figura 4.10, e a resistência do concreto ao esmagamento na região próxima ao conector.

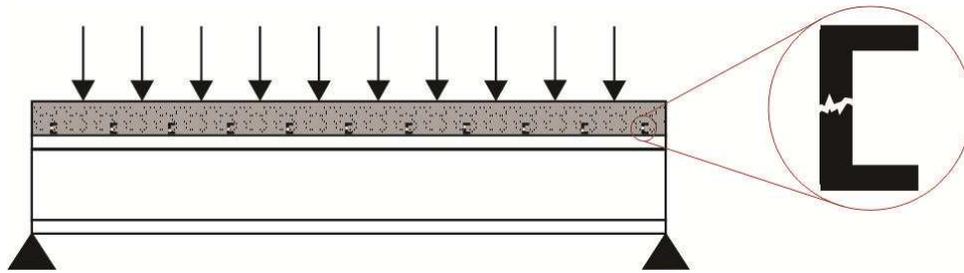


Figura 4.10 - Cisalhamento no conector tipo perfil U laminado.

Para conectores tipo pino com cabeça (*stud*), este modo de falha também é avaliado segundo a resistência do conector, Figura 4.11(a), e a resistência do concreto ao esmagamento na região próxima ao conector, Figura 4.11(b).

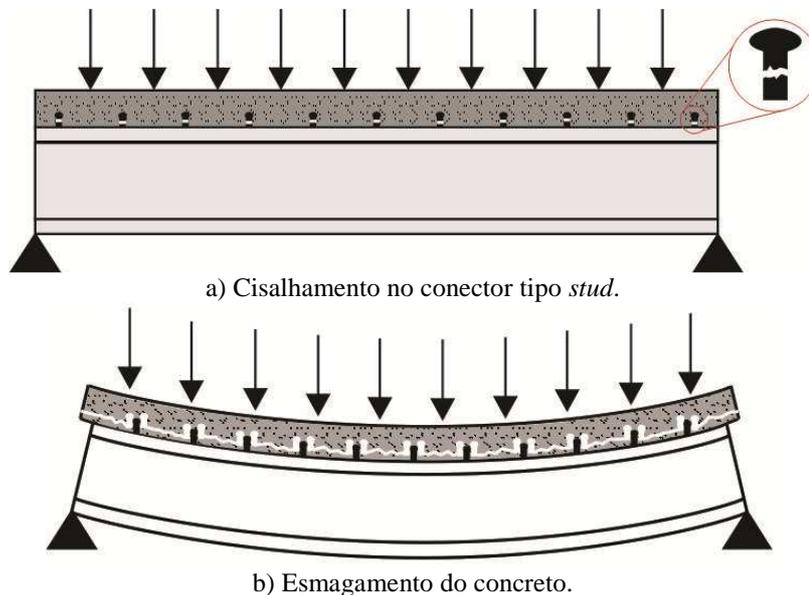


Figura 4.11 - Falha nos conectores devido

Para este modo de falha, avalia-se a resistência do sistema segundo os esforços internos atuantes nos conectores. Sendo que sua função é auxiliar no dimensionamento do número de conectores necessários para atender a essas solicitações internas. Portanto, sua eficiência quanto aos esforços externos não é avaliada. Tal eficiência é testada por ensaios *push out* que são realizados anteriormente a normatização do conector.

4.4.5 - Fluxo cisalhante

Este modo de falha analisa o desempenho do sistema em relação ao fluxo cisalhante na laje de concreto, Figura 4.12.

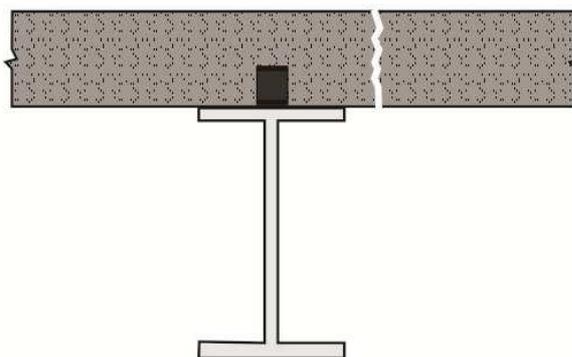


Figura 4.12 - Fluxo cisalhante na laje de concreto.

Este modo de falha é avaliado conforme a Eq. (4.10).

$$G_A = A_{Rd} - A_{Sd} \quad (4.10)$$

Uma das variáveis que contribuem para a resistência do cisalhamento da laje avaliado neste modo de falha é a área de concreto. Portanto, quanto maior o grau de conexão, maior será o número de conectores e menor será a área de concreto, conseqüentemente, uma viga com maior grau de conexão tem mais chances falhar por esse motivo do que em uma com menor grau de conexão.

4.4.6 - Deslocamento

Este modo de falha analisa o desempenho do sistema em relação ao deslocamento no meio do vão, Figura 4.13.

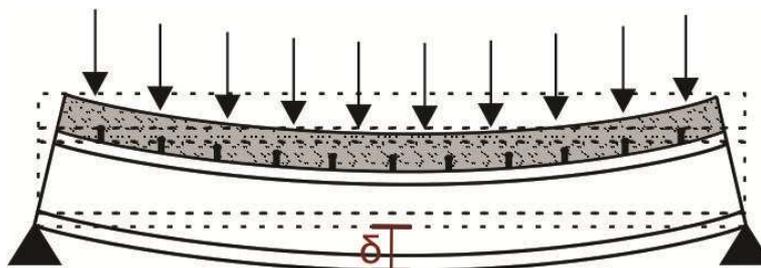


Figura 4.13 - Deslocamento no meio do vão.

Este modo de falha é avaliado conforme a Eq. (4.11) para ligação total.

$$G_{\delta} = \left(\frac{L}{350} \right) - \left[\frac{5}{384} \frac{(g + \psi_2 q) L^4}{EI} \right] \quad (4.11)$$

Onde, ψ_2 é o fator de redução de ações.

E, para a ligação parcial, Eq. (4.12).

$$G_{\delta} = \left(\frac{L}{350} \right) - \left[\frac{5}{384} \frac{(g + \psi_2 \cdot q) \cdot L^4}{EI_{ef}} \right] \quad (4.12)$$

O deslocamento excessivo no meio do vão por si só não leva ao colapso do sistema, porém afeta as condições de utilização, podendo interferir no escoamento da água ou no correto funcionamento das esquadrias, entre outros fatores.

4.4.7 - Sistema

Para a análise do sistema levou-se em consideração quatro situações, o sistema em paralelo, o sistema em série e os sistemas híbridos.

Para o sistema em paralelo, a função que avalia o sistema, G_{SP} , considera-se que, caso todas as falhas descritas anteriormente aconteçam, acontecerá a falha do sistema, Figura 4.14(a).

No sistema em série, a função, G_{SS} , considera-se que o sistema falhará, caso alguma das falhas descritas anteriormente aconteça, Figura 4.14(b).

Contudo, essas duas situações citadas não demonstram a real relevância de cada modo de falha no β do sistema. Por isso, estabeleceu-se dois sistemas híbridos que demonstrem melhor a P_f do sistema.

No primeiro caso, G_{SH1} , consideram-se apenas os modos de falha que avaliam o sistema quanto as solicitações externas, Figura 4.14(c). A definição desse caso levou em consideração que o sistema deve funcionar corretamente e que o seu mal funcionamento é uma falha, pois o mesmo não atende as necessidades para as quais foi idealizado.

No segundo caso, G_{SH2} , consideram-se os modos de falha que avaliam o sistema quanto as solicitações externas e fazem parte do ELU, Figura 4.14(d), visto que estes são os casos em que o sistema colapsa.

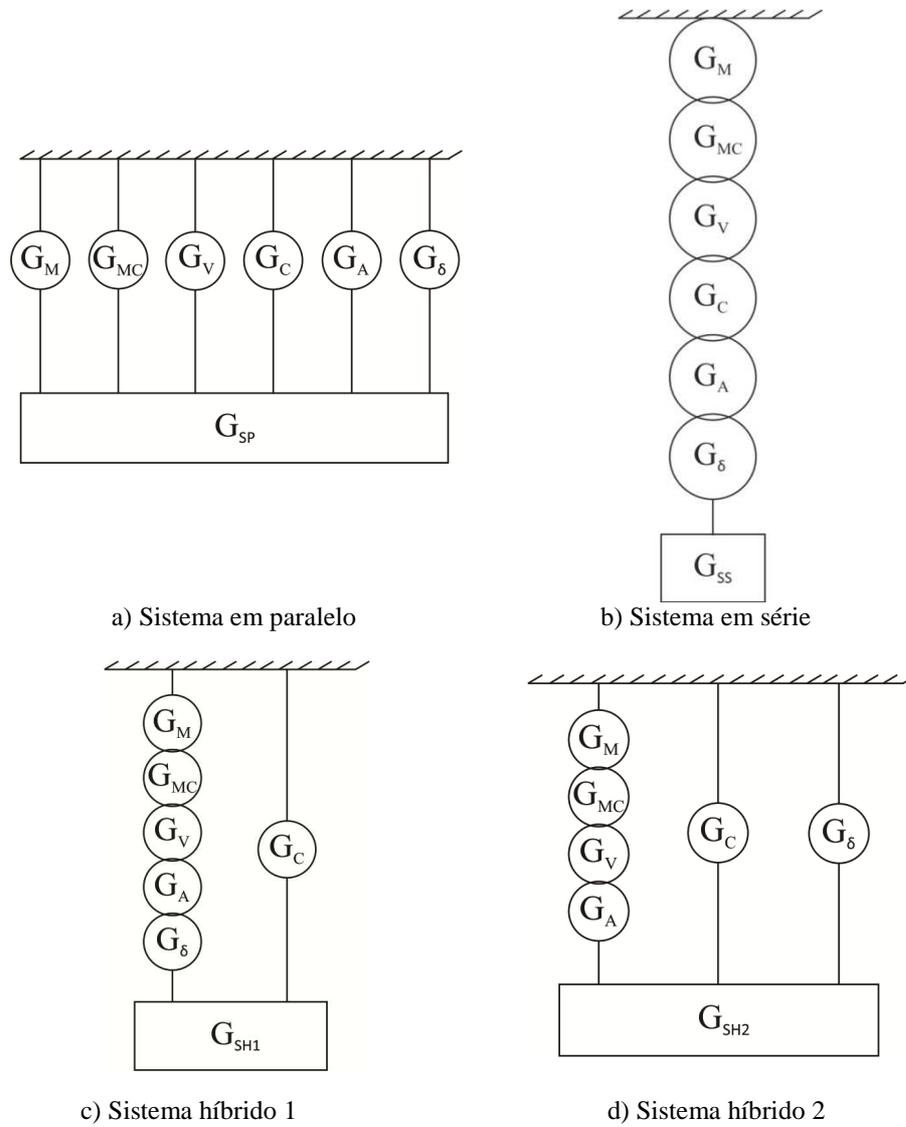


Figura 4.14 - Função de falha do sistema.

5 - RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste estudo. Tais resultados se subdividem na verificação do método FORM, na verificação dos fatores de importância probabilísticos, na análise da influência dos fatores de segurança, na análise de sensibilidade, na calibração dos coeficientes e no estudo do custo.

5.1 - VERIFICAÇÃO DO MÉTODO FORM

O método FORM nem sempre converge dependendo da linearidade da função. Portanto, utilizou-se o método de simulação de Monte Carlo para verificar a aplicabilidade do FORM nas funções de falha. O método de Monte Carlo é o método ideal, porém sua aplicação requer recursos mais rebuscados devido ao número de interações requerido, tornando sua utilização inviável devido a limitação dos recursos.

A seguir são apresentados os β das funções de falha com diferentes η , as quais estão na faixa realizável de interações pelo método de Monte Carlo, comparado com os resultados obtidos pelo FORM.

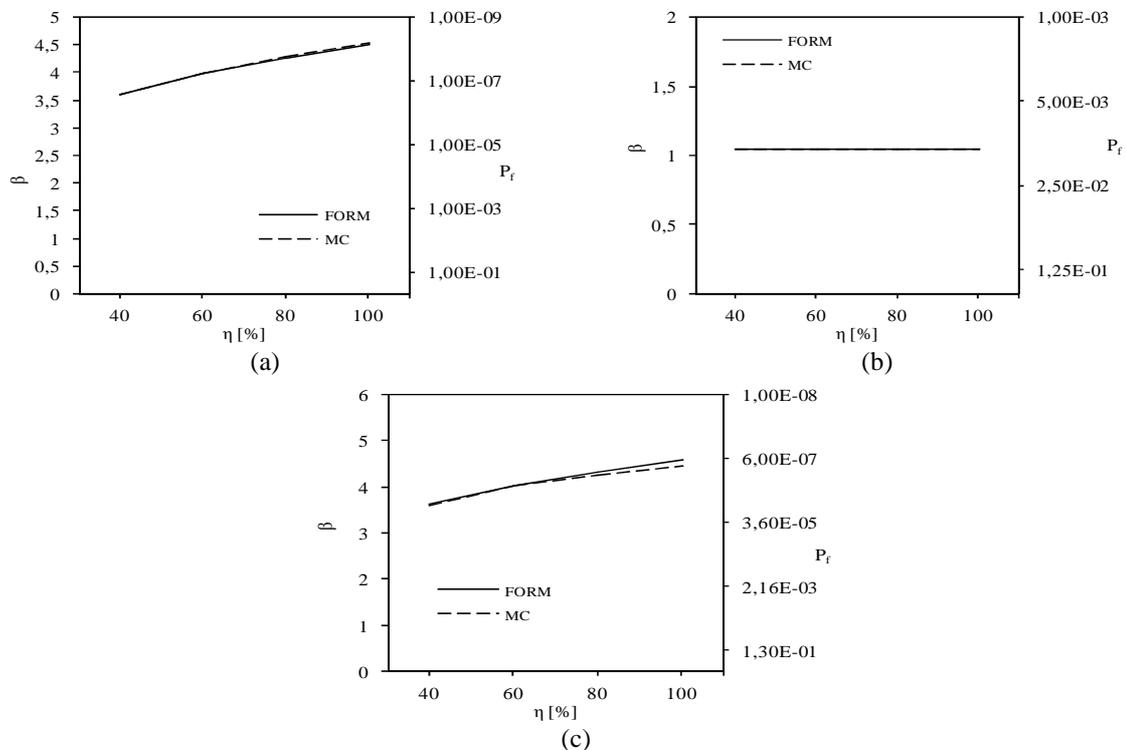


Figura 5.1 - Comparação FORM e Monte Carlo: (a) Momento fletor viga escorada com conector *stud*; (b) Resistência dos conectores viga não escorada; (c) Deslocamento viga não escorada.

Nota-se que as funções são bem comportadas e podem ser analisadas pelo método FORM, pois os resultados obtidos com esse método converge para o mesmo ponto quando se utiliza o método de simulação de Monte Carlo.

5.2 - FATORES DE IMPORTÂNCIA PROBABILÍSTICOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados a respeito da relevância de cada variável aleatória nos modos de falha por meio dos fator de importância probabilístico dado no método FORM, conforme a Eq. (3.37). Para esta análise, foram utilizadas as vigas 1 e 2 com ligação total.

A Figura 5.2 apresenta os fatores de importância probabilísticos de cada variável aleatória da função de falha momento fletor sem considerar os fatores de segurança.

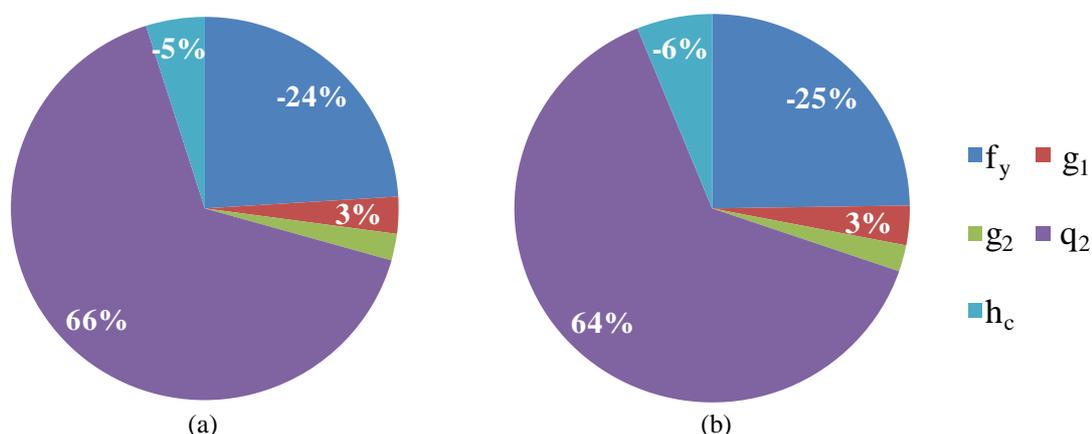


Figura 5.2 - Fatores de importância probabilísticos para a função de falha momento fletor: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.

Os resultados obtidos mostram que entre as variáveis aleatórias resistentes a mais relevante é a resistência do aço do perfil. Seguido da altura da laje de concreto, enquanto que a largura efetiva da laje e a resistência do concreto não se mostram relevantes. Isso se dá principalmente pelo fato de que a LN está situada na laje de concreto, portanto o momento fletor da viga é em função da resultante de tração do aço. Em relação as variáveis solicitantes, observa-se a grande influência da carga acidental, explicado pelo seu alto coeficiente de variação, sendo, então, uma das maiores incertezas do sistema, a qual é ser decisiva na determinação da sua P_f .

A Figura 5.3 mostra os fatores de importância probabilísticos, de cada variável aleatória

da função de falha esforço cortante sem considerar os fatores de segurança.

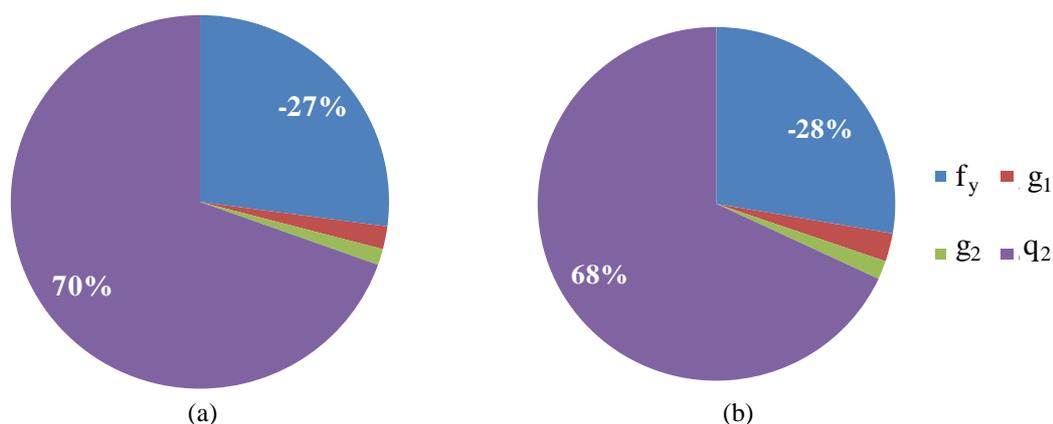


Figura 5.3 - Fatores de importância probabilísticos para a função de falha esforço cortante: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.

Os resultados obtidos são coerentes uma vez que o esforço cortante é resistido apenas pelo perfil metálico, conforme estabelecido na norma, e a carga acidental é a variável solicitante mais influente.

A Figura 5.4 mostra os fatores de importância probabilísticos, de cada variável aleatória da função de falha conectores sem considerar os fatores de segurança.

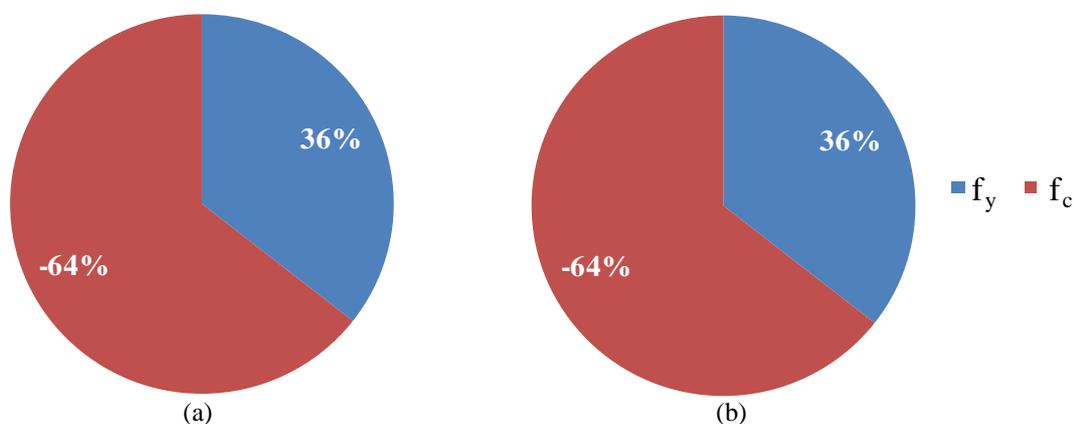


Figura 5.4 - Fatores de importância probabilísticos para a função de falha resistência dos conectores: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.

Os resultados obtidos mostram a relevância da resistência do concreto e do aço. Lembrando que esta função de falha avalia a resistência quanto aos esforços internos da viga e não das solicitações externas impostas ao sistema. Com isso, nota-se que a resistência do concreto é relevante na resistência do sistema, enquanto que a resistência

do aço atua como a variável solicitante.

A Figura 5.5 mostra os fatores de importância probabilísticos, de cada variável aleatória da função de falha fluxo cisalhante sem considerar os fatores de segurança.

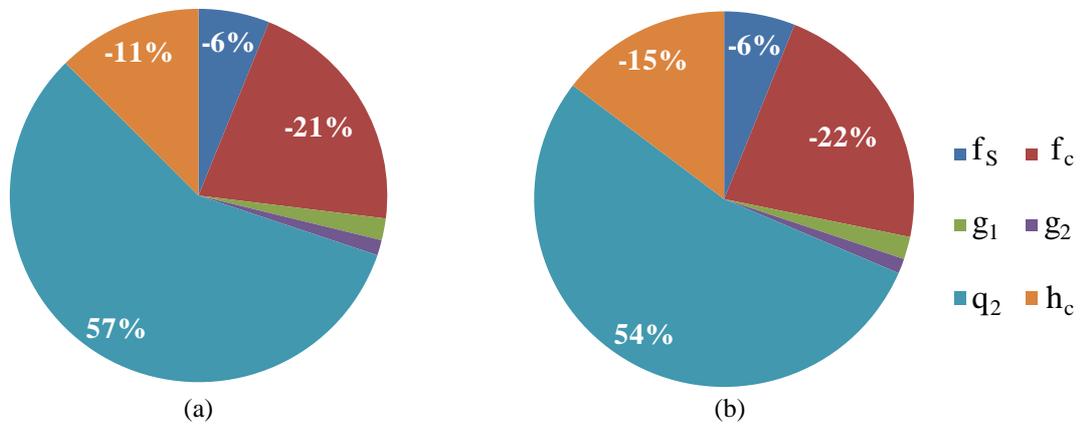


Figura 5.5 - Fatores de importância probabilísticos para a função de falha fluxo cisalhante: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.

Os resultados obtidos mostram a importância das variáveis relacionadas à resistência do concreto. Esta função de falha avalia o fluxo cisalhante na laje de concreto, verificando a necessidade da armadura que impede o cisalhamento da laje.

Outra observação importante é a baixa influência da largura efetiva da laje e das cargas permanentes para as funções de falha analisadas até então e a alta influência da carga acidental, sendo a principal variável solicitante.

A Figura 5.6 mostra os fatores de importância probabilísticos, de cada variável aleatória da função de falha deslocamento sem considerar os fatores de segurança.

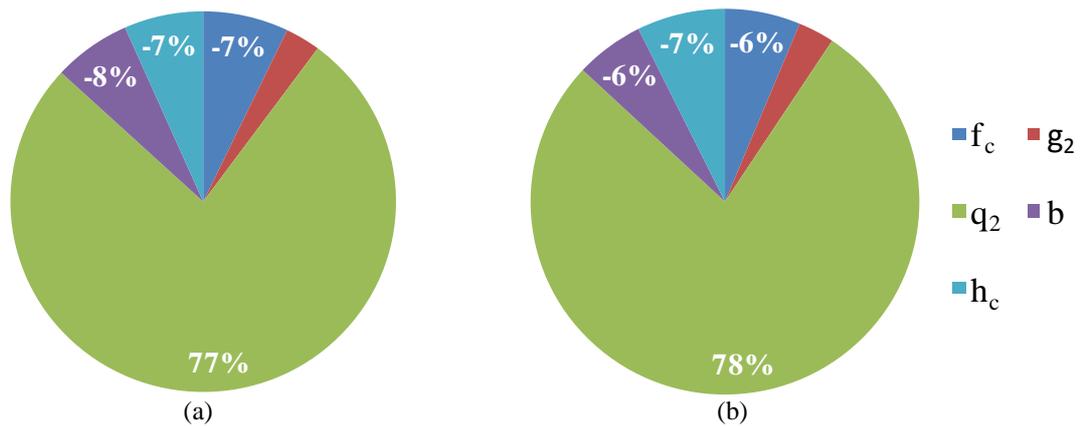


Figura 5.6 - Fatores de importância probabilísticos para a função de falha deslocamento: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.

Os resultados obtidos mostram a importância das variáveis relacionadas à resistência do concreto, inclusive da largura efetiva da laje, a qual não havia se mostrado relevante até então. Observa-se então a importância do concreto para que o sistema atenda aos requisitos no ELS, ainda que a LN esteja na laje de concreto.

A seguir analisa-se a influência dos fatores de segurança nos os fatores de importância probabilísticos das variáveis aleatórias. Na Figura 5.7, apresenta-se os resultados referentes as funções relacionadas ao ELU.

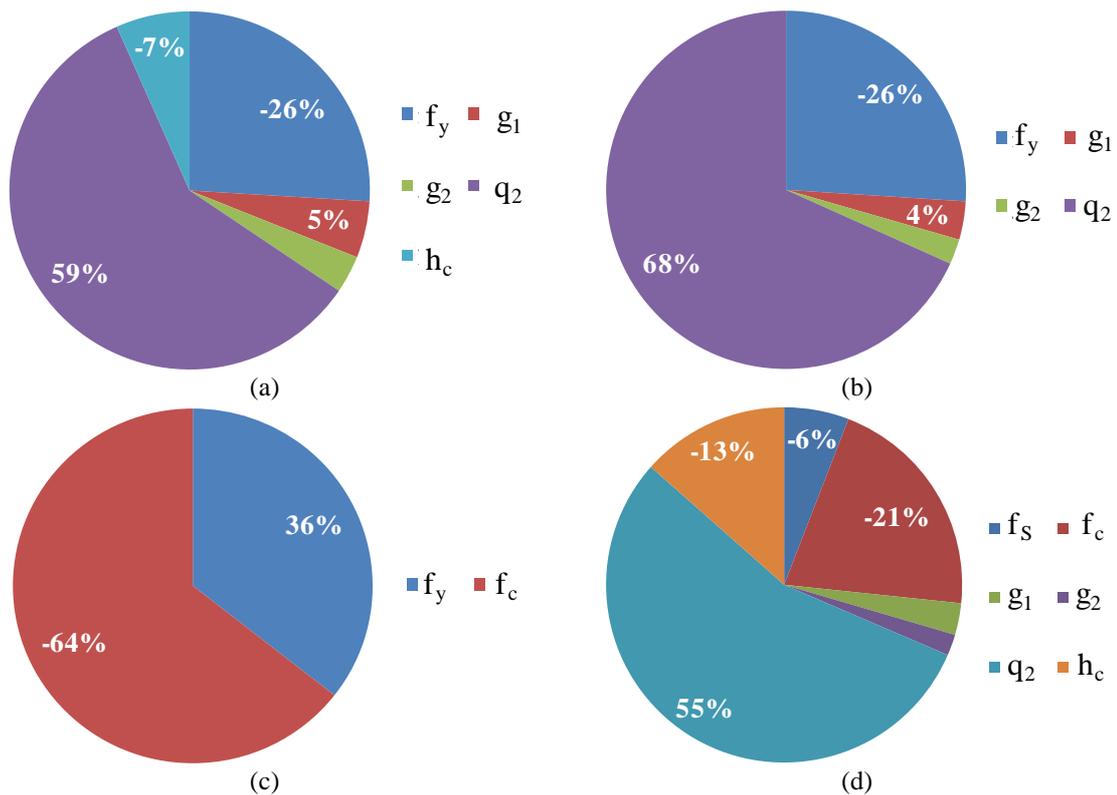


Figura 5.7 - Fatores de importância probabilísticos das variáveis aleatórias considerando os fatores de segurança: (a) Momento fletor; (b) Esforço cortante; (c) Resistência dos conectores; (d) Fluxo cisalhante.

Nota-se que, quando se consideram os fatores de segurança, os fatores de importância probabilísticos se redistribuem de forma mais amena, por exemplo, no momento fletor, a carga acidental perde um pouco de relevância, enquanto que as outras variáveis com relevância menor ganham. Com isso, entende-se que os fatores de segurança fazem com que a contribuição das variáveis sejam consideradas de forma mais amena, o que está a favor da segurança, pois não se considera o máximo da resistência oferecida pelo material e considera possíveis variações nas cargas.

5.3 - INFLUÊNCIA DOS FATORES DE SEGURANÇA

Nesta seção será analisada a influência dos fatores de segurança no comportamento de modos de falha. Para isso, serão apresentados os resultados obtidos para as vigas dos estudos de caso 1 e 2.

A Figura 5.8 mostra o quanto os fatores de segurança contribuem para a redução das probabilidades de falha das estruturas em consideração, aumentando os seus índices de confiabilidade até 3,9 unidades em relação ao que aconteceria se não fossem

considerados. Esta é a reserva de segurança exigida pela norma, que torna nossas estruturas extremamente seguras, porém reduzem a sua viabilidade econômica.

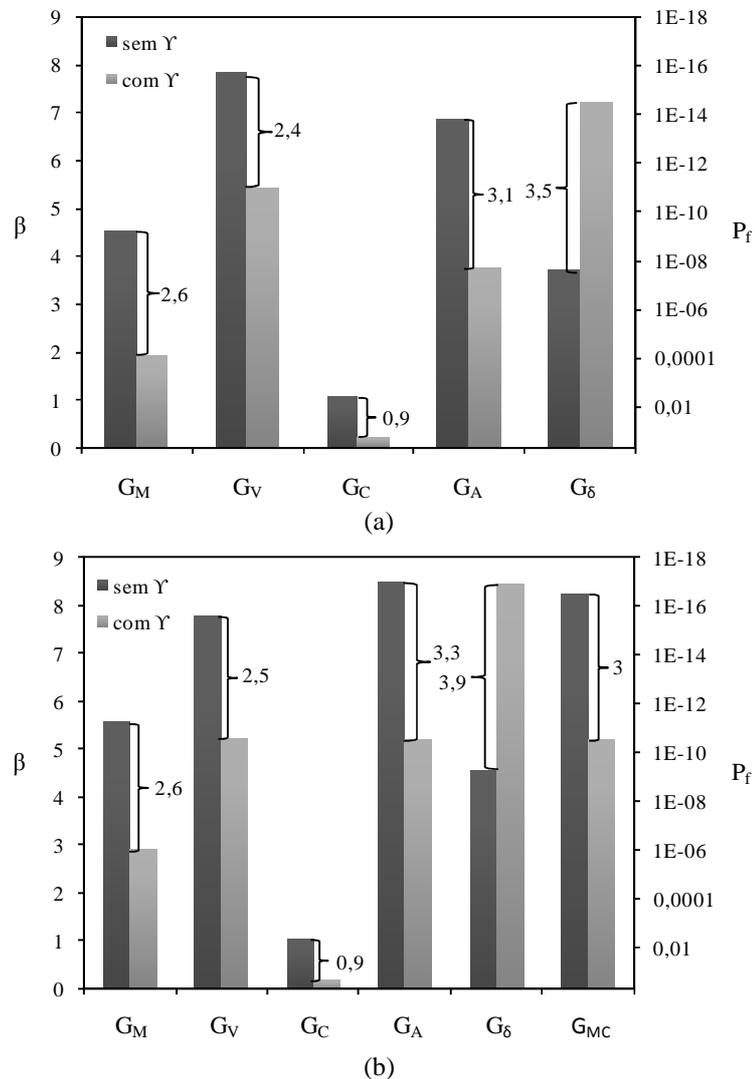


Figura 5.8 - Influência do fator de segurança no índice de confiabilidade: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.

Na Figura 5.9, observa-se a influência dos fatores de segurança no modo de ruptura da viga escorada. A principal mudança é observada para o modo de falha do deslocamento. Nota-se que sem considerar os fatores de segurança este modo de falha é o segundo mais crítico e, quando se consideram os coeficiente ele passa a ser o mais seguro para graus de conexão maiores que 60%. Em relação aos modo de falha mais seguro, observa-se que, quando não se consideram os fatores de segurança, há a alternância entre o fluxo cisalhante e o cortante no grau de conexão em trono de 80%. Já, quando são considerados, alterna-se entre o fluxo cisalhante e o deslocamento no grau de conexão de

quase 60%. A alternância entre o fluxo cisalhante e o cortante ocorre para grau de conexão menor quando se consideram os coeficientes. Isso mostra que os fatores de segurança não atuam apenas modificando o β dos modos de falha, mas também influenciam a criticidade desses modos falha.

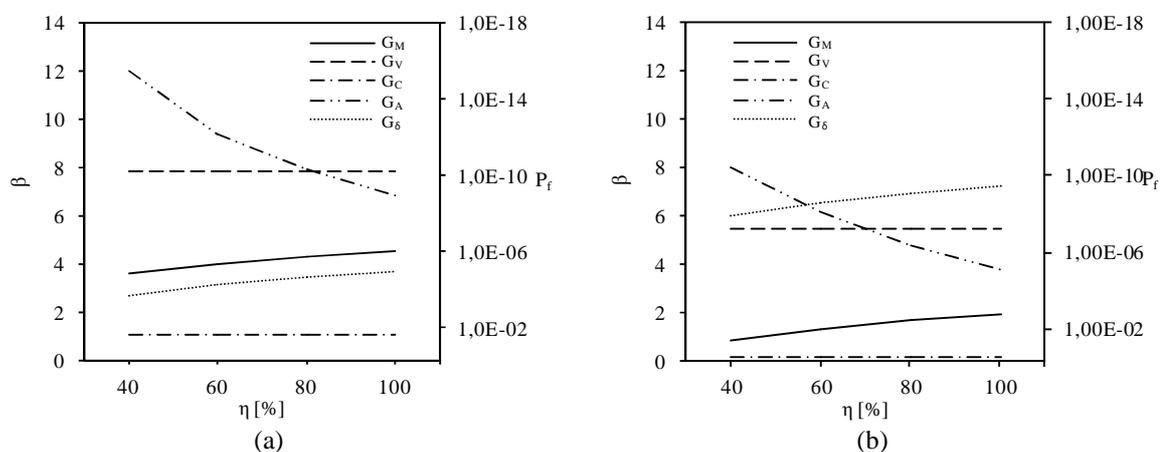


Figura 5.9 - Influência dos fatores de segurança nos modos de falha da viga escorada: (a) Sem considerar os coeficientes segurança; (b) Considerando os fatores de segurança.

Além disso, percebe-se a grande diferença entre os índices de confiabilidade dos modos de falha. Isso tem um grande impacto no custo dessas estruturas, pois dever-se-ia considerar modificações que calibrassem tais modos de falha a fim de reduzir gastos desnecessários, por exemplo, a taxa de armadura mínima exigida pela norma, representada pela função G_A , é muito além do que a necessária, pois antes que a estrutura falhasse pelo fluxo cisalhante que é impedido por essa armadura, ela falharia pelos outros modos de falha, como o momento fletor. Essa taxa de armadura já foi reduzida na revisão da norma realizada em 2008, porém ainda se mostra bastante elevada.

Na Figura 5.10, também se observa a influência dos fatores de segurança no modo de ruptura da viga não escorada. E, pode-se observar que o modo de falha momento fletor na etapa construtiva tem β alto, próximo do β do esforço cortante, não sendo um dos modos de falha mais crítico, o que ressalta uma das vantagens desse tipo de estrutura, na qual pode-se evitar a utilização do escoramento.

Outro fator importante observado em ambos os exemplos é que apenas a função G_δ , que analisa o deslocamento tem um comportamento diferenciado. Isso acontece porque o

coeficiente adotado pela norma minora a carga acidental, enquanto nas outras funções as cargas são majoradas e as resistências são minoradas pelos fatores de segurança.

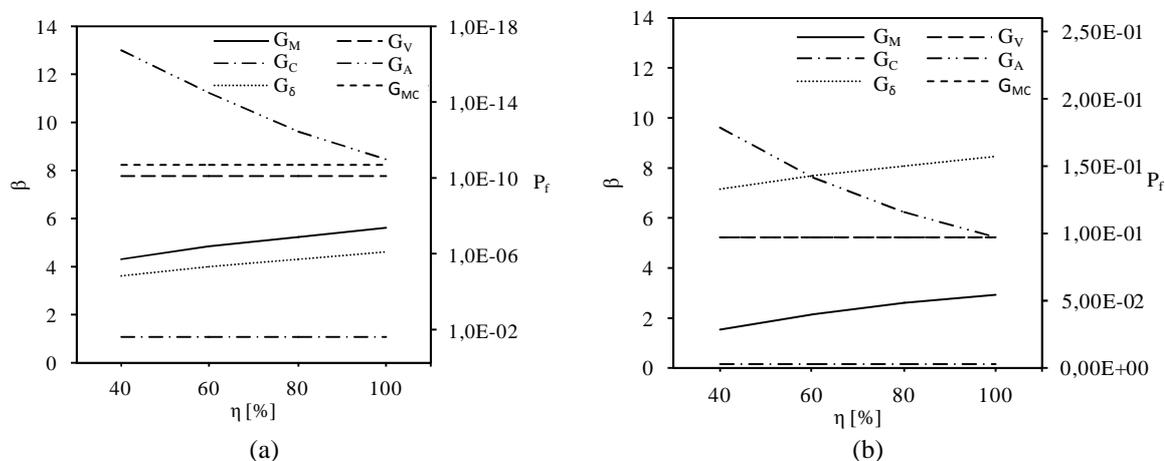


Figura 5.10 - Influência dos fatores de segurança nos modos de falha da viga não escorada: (a) Sem considerar os coeficientes segurança; (b) Considerando os fatores de segurança.

Por fim, é importante observar que, ao contrário do que acontece nas outras funções, na função de falha que avalia a armadura, a probabilidade de falha aumenta a medida que o grau de interação aumenta. Isso acontece porque a função da armadura é impedir o cisalhamento da laje no plano dos conectores, com isso, quanto mais conectores, menor é a área de concreto, reduzindo a sua capacidade de resistir ao cisalhamento, ou seja, quanto maior o grau de interação, maior a necessidade de armadura, pois a punção deverá ser evitada.

A Figura 5.11 apresenta os resultados obtidos para o sistema. Ressalta-se a grande diferença entre o G_{SS} e G_{SP} , β aproximadamente 8 vezes maior. Isso confirma a necessidade do ajuste da sistema em relação aos modos de falha individuais de modo que os β s do sistema em série e em paralelo seja menos destoante. Além disso, observa-se que a utilização dos fatores de segurança amenizam a diferença do β do G_{SP} entre os diferentes graus de conexão, reduzindo a segurança do sistema para graus de conexão mais baixos. O que é coerente, pois a estrutura não está de fato tão segura visto que pode ter falhado em outros modos de falha e não ter falhado apenas em um.

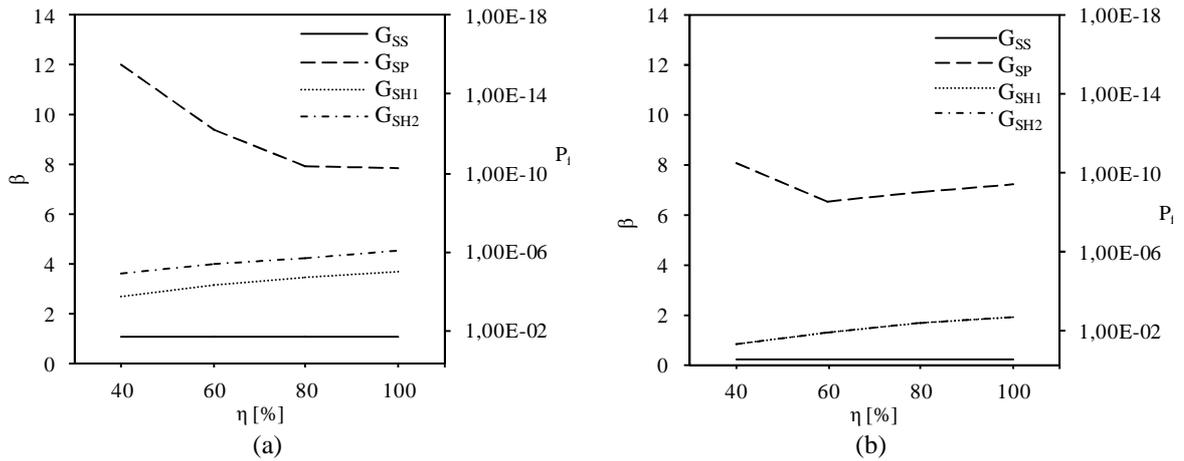


Figura 5.11 - Influência dos fatores de segurança no sistema da viga escorada: (a) Sem considerar os coeficientes segurança; (b) Considerando os fatores de segurança.

Na Figura 5.11(a), observa-se que o β do G_{SH1} está próximo do que se espera para estruturas em geral. Nota-se também, a proximidade dos sistemas híbridos nos dois casos. Logo, entende-se que este é tipo de sistema mais provável considerado pela norma, onde as a falha das funções que avaliam o sistema quanto às solicitações internas e das funções relacionadas ao ELS não o levam a falha.

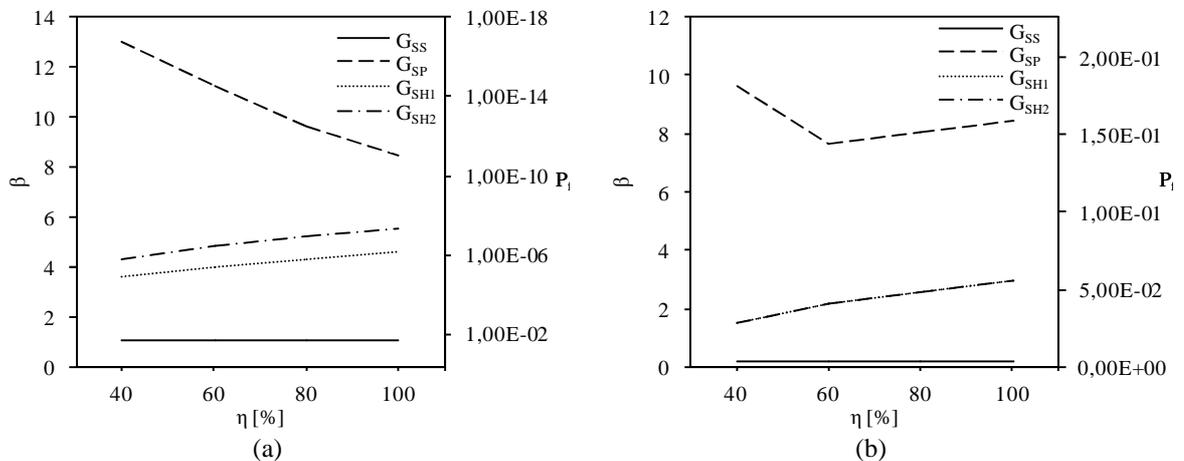


Figura 5.12 - Influência dos fatores de segurança no sistema da viga não escorada: (a) Sem considerar os coeficientes segurança; (b) Considerando os fatores de segurança.

A Figura 5.12 apresenta o resultados dos sistemas para a viga não escorada e confirma as análises realizadas para a viga escorada, por exemplo, o β do G_{SH1} está próximo do que se espera para estruturas em geral e os sistemas híbridos possuem β próximos.

5.4 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Nesta seção será analisada a sensibilidade dos modos de falha da viga escorada à variação dos parâmetros resistência do concreto, altura da laje, largura efetiva e percentual de carga permanente. Para esta análise não foram considerados os fatores de segurança.

5.4.1 - Altura da laje, h_c

Para avaliar a influência do parâmetro h_c nos modos de falha estudados, variou-se a altura da laje de 1 em 1 unidade entre 8 e 12 cm. Na Figura 5.13 apresenta-se a modificação do β em relação a essa variação.

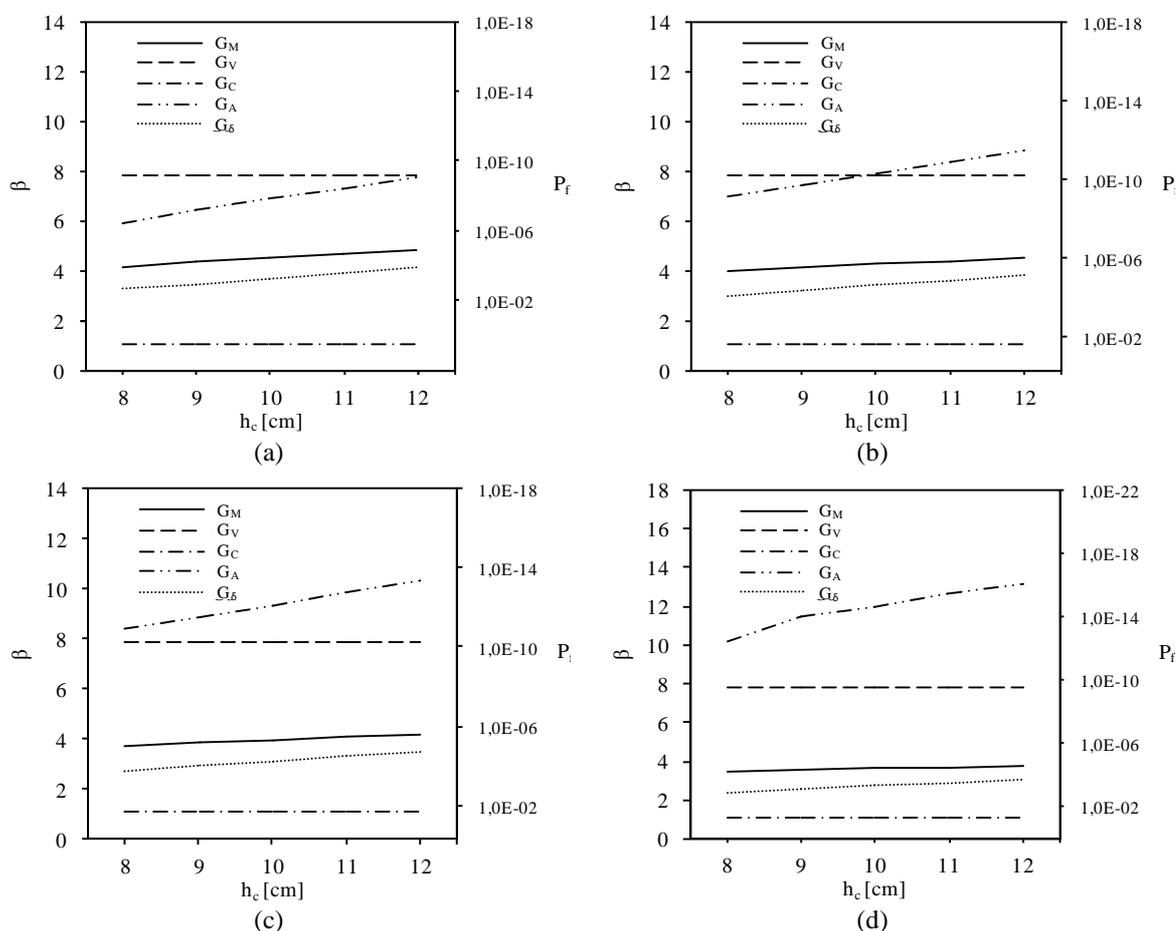


Figura 5.13 - Relação β x h_c para η : (a) 100%; (b) 80%; (c) 60%; (d) 40%.

Pela Figura 5.13, observa-se que h_c é relevante para a função que avalia o fluxo cisalhante. Isso acontece porque a laje mais espessa dificulta o rompimento por cisalhamento, pois tem maior área de contato entre as regiões de concreto sob condições

diferentes, apoiado na mesa do perfil ou não. Além disso, nota-se que, para η igual a 100% , essa função de falha tem β menor do que a função de falha cortante. Isso vai mudando a medida que o η reduz, sendo que para η igual a 40% o β do fluxo cisalhante já é bem maior do que o do cortante, principalmente para h_c elevado.

Já para as outras funções de falha não há alterações significativas. Isso acontece, pois a LN permaneceu na laje de concreto em todas as situações analisadas. Portanto, as variáveis relevantes na determinação das outras funções são as variáveis relacionadas ao perfil metálico.

5.4.2 - Resistência do concreto, f_c

Para avaliar a influência do parâmetro f_c nos modos de falha estudados, variou-se a resistência do concreto de 5 em 5 unidades entre 20 e 40 MPa. Na Figura 5.14 apresenta-se a variação do β em relação a essa variação.

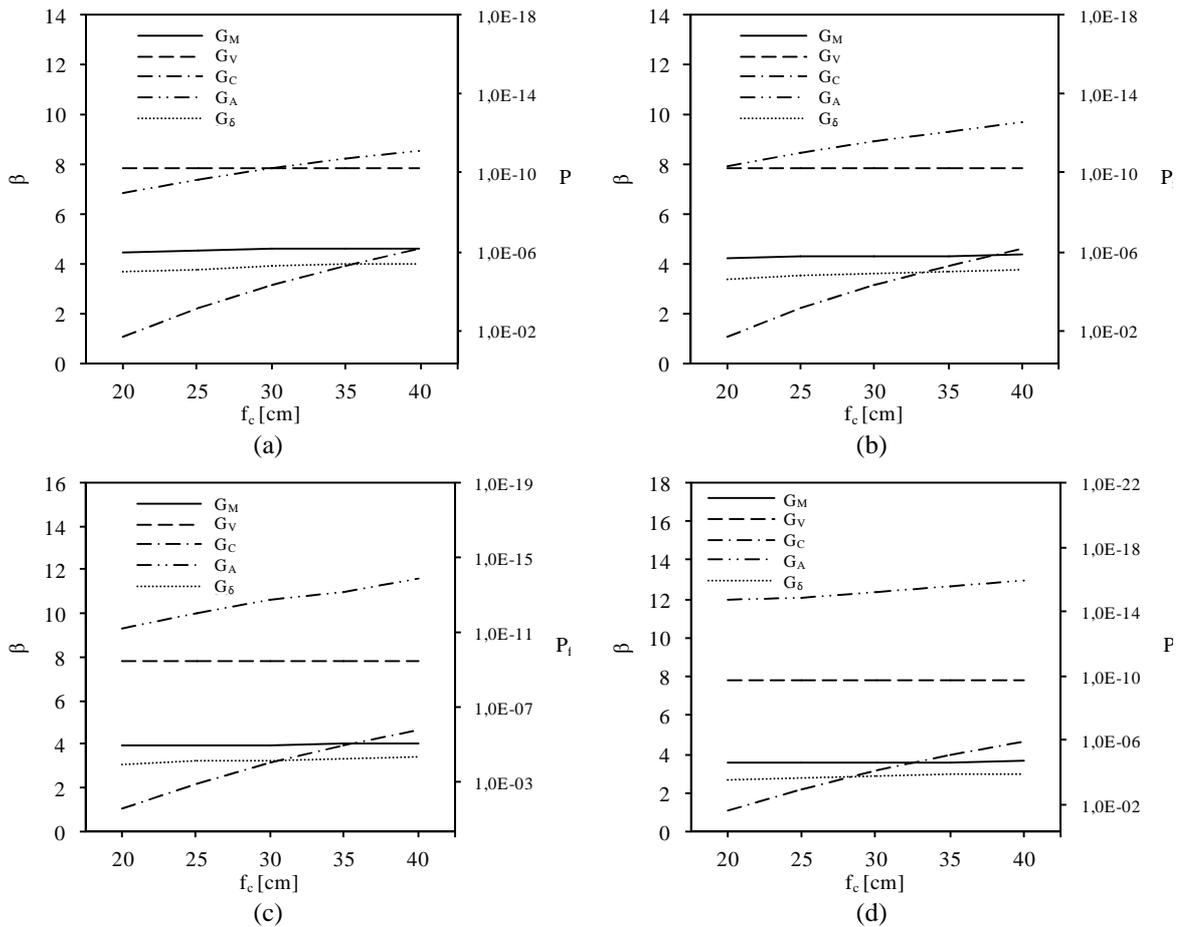


Figura 5.14 - Relação β x f_c para η : (a) 100%; (b) 80%; (c) 60%; (d) 40%.

O comportamento da estrutura para a variação da altura da laje é similar ao seu comportamento para a variação da resistência do concreto, como se é esperado, pois esses dois fatores influenciam na resistência da laje.

Contudo, há diferença no comportamento da função de falha dos conectores que não sofria influência da altura da laje, mas é influenciado pela resistência do concreto. Com isso, nota-se que há uma transferência do modo de falha com a variação do grau de interação. Para graus de interação baixos essa transferência também ocorre de acordo com a variação da resistência do concreto. Por exemplo, para grau de interação igual a 40%, o modo de falha crítico é a resistência dos conectores para f_c menor que 32MPa e, para f_c maior que 32 MPa, o modo crítico é o deslocamento seguido do momento fletor.

5.4.3 - Largura efetiva, b

Para avaliar a influência do parâmetro b nos modos de falha estudados, variou-se a

resistência do concreto de 25 em 25 unidades entre 175 e 275 cm. Na Figura 5.15 apresenta-se a variação do β em relação a essa variação.

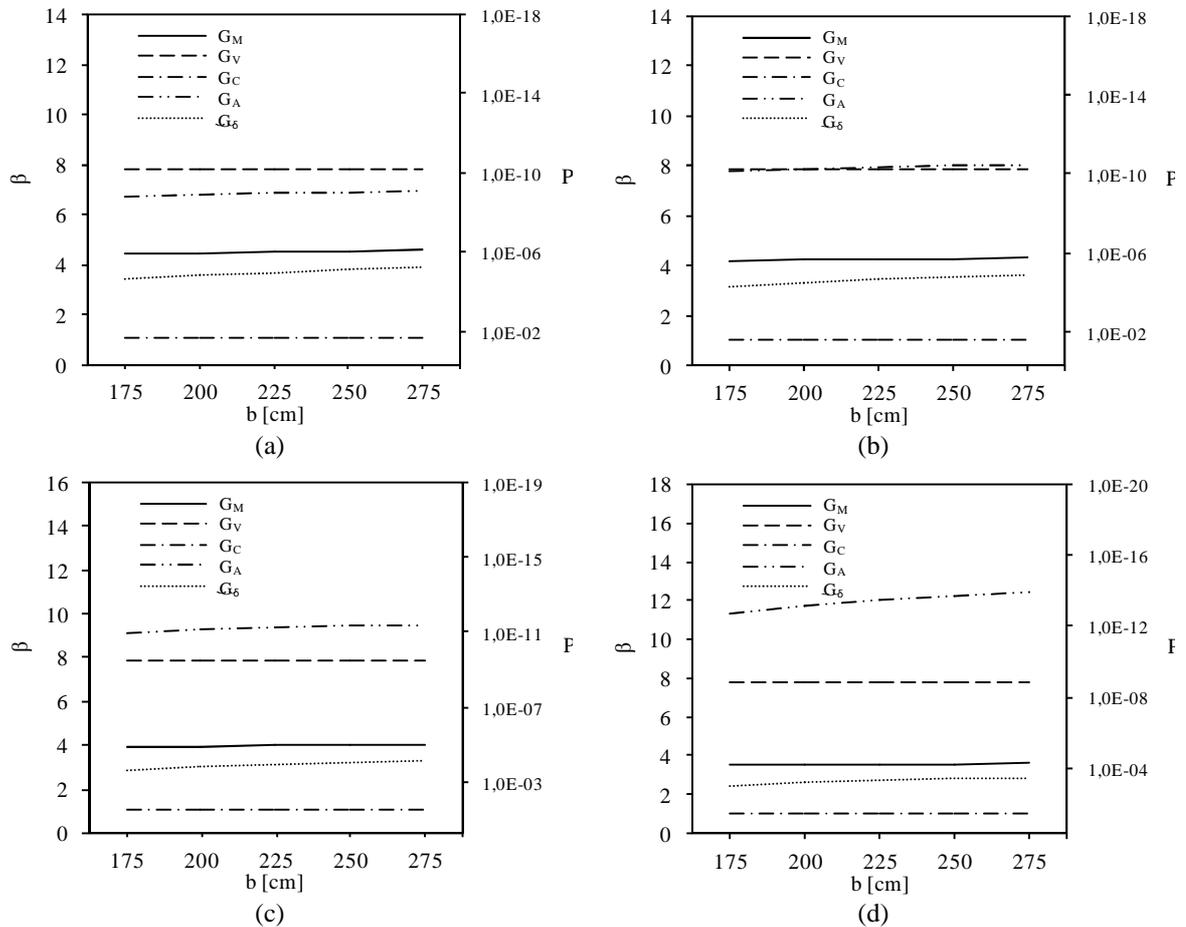


Figura 5.15 - Relação β x b para η : (a) 100%; (b) 80%; (c) 60%; (d) 40%.

Conclui-se que o parâmetro b não tem influência significativa no sistema. Portanto, a simplificação adotada pela norma para definir este valor não prejudica a segurança estrutural do sistema no caso de vigas mistas com a LN localizada na laje de concreto.

5.4.4 - Percentual de carga permanente, X

Para avaliar a influência do percentual de carga permanente, X , nos modos de falha estudados, variou-se X de 20 em 20 unidades entre 20% e 80%. Na Figura 5.16 apresenta-se a variação do β em relação a essa variação para as vigas 1 e 2 com η igual a 100%.

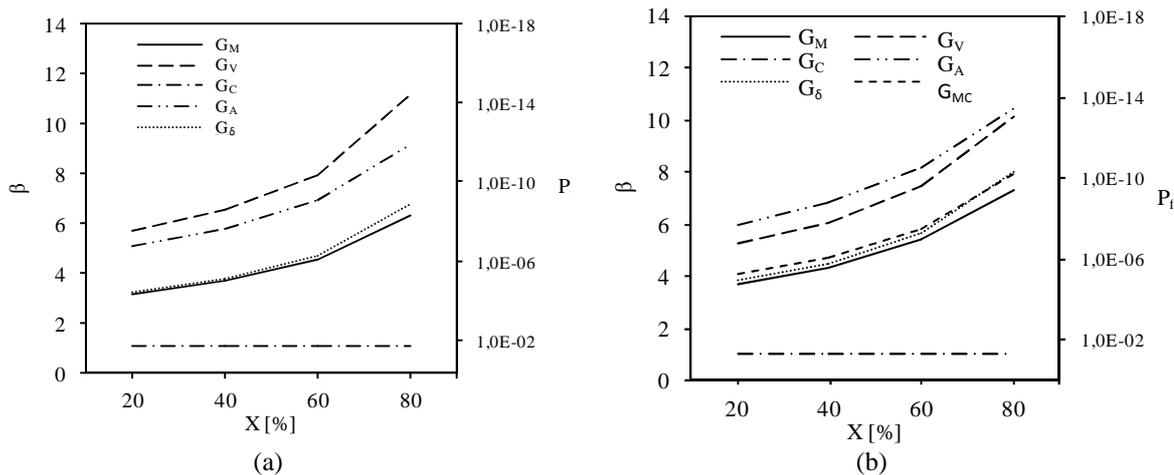


Figura 5.16 - Relação β x X para $\eta=100\%$: (a) Viga escorada; (b) Viga não escorada.

Nota-se a grande influência dessa parcela no índice de confiabilidade das funções de falha, exceto da função de falha conectores, a qual avalia o sistema quanto às solicitações internas. O comportamento das funções é semelhante para os diferentes graus de conexão, Figura 5.17, portanto a influência da variação de carga permanente é bem definida, como era esperado ao se analisar os fatores de importância probabilísticos das funções, nos quais a carga acidental era sempre preponderante.

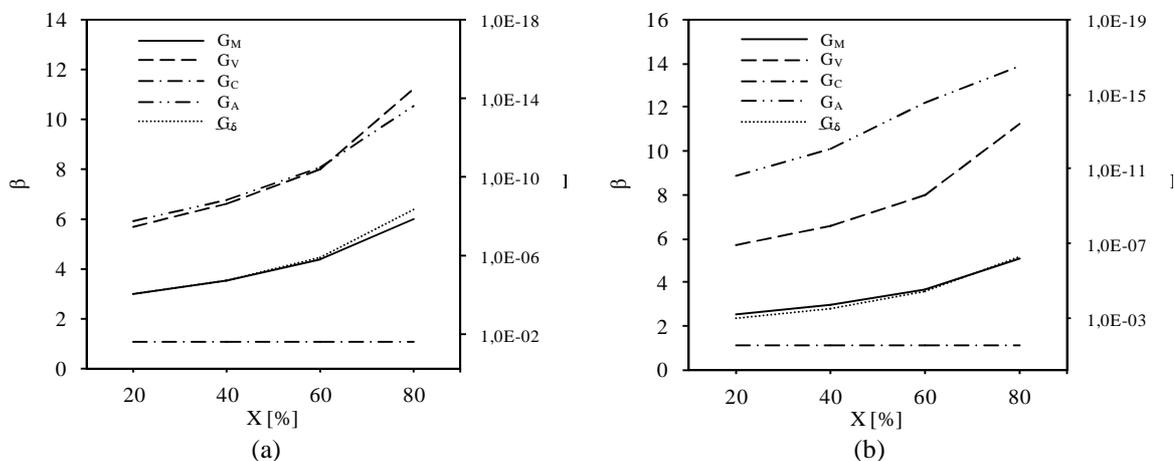


Figura 5.17 - Relação β x X para η : (a) 80%; (b) 40%.

Ao analisar os gráficos apresentados, pode-se observar que, para o momento fletor, por exemplo, observa-se que a parcela de carga permanente entre 70% e 90%, são ideais para a redução da probabilidade de falha, pois apresentam um crescimento acentuado do índice de confiabilidade, bem como no cortante e no deslocamento e no fluxo cisalhante. Já para o fluxo cisalhante essa faixa varia de acordo com o η .

Logo, conclui-se a importância desse parâmetro no dimensionamento de vigas mistas. A proporção de carga permanente e carga acidental tem grande influência na confiabilidade do sistema e, por isso, deve-se ter cautela ao determinar as cargas que atuarão no sistema.

5.4.5 - Correlação, $\rho_{q,fy}$

Para avaliar a influência da correlação entre as variáveis carga acidental e resistência do aço, $\rho_{q,fy}$, nos modos de falha estudados, foram adotados os seguintes valores para tal parâmetro: 0, 0,15 e 0,4. Na Figura 5.18 apresenta-se a variação do β em relação a essa variação para a viga escorada com η igual a 100%.

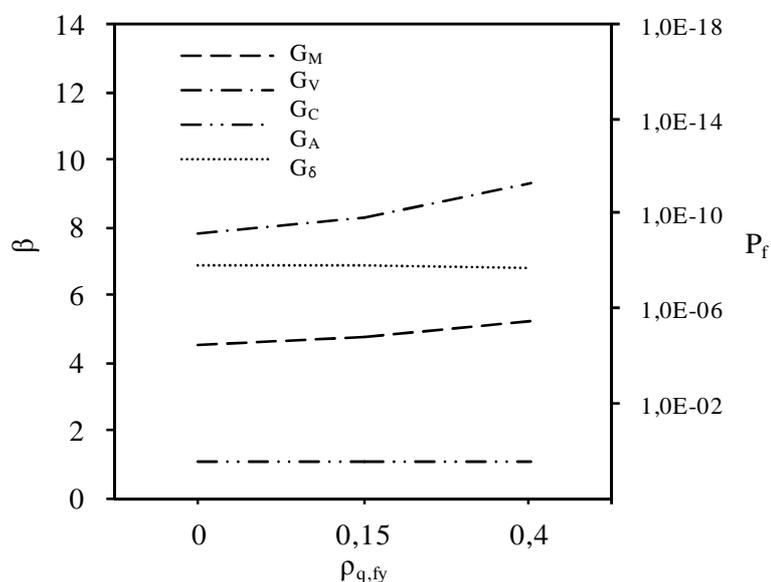


Figura 5.18 - Relação β x $\rho_{q,fc}$ para a viga escorada.

Ao analisar o gráfico apresentado, pode-se observar que a possível correlação estudada não afeta significativamente o β das funções de falha. Sendo que a função de falha que mais sofre influência desse parâmetro é a do esforço cortante.

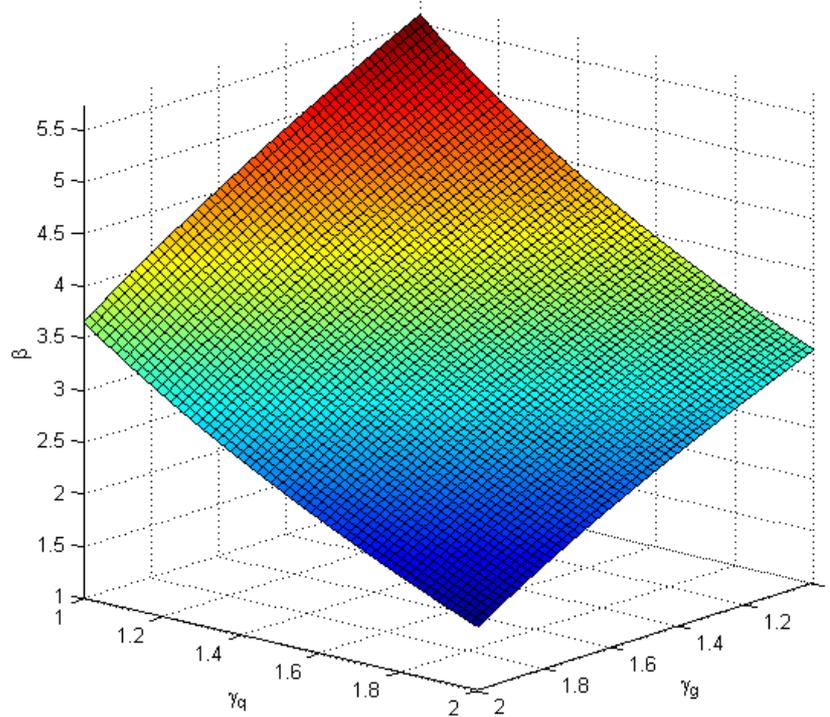
5.5 - CALIBRAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA

Nesta seção, serão descritos os resultados quanto a calibração dos fatores de segurança e a comparação do grau de segurança de diferentes normas, NBR, ACI e EUROCODE. Para isso, não foram considerados os coeficientes de minoração da resistência e considerou-se apenas as funções de falha do ELU que verificam o sistema quanto às

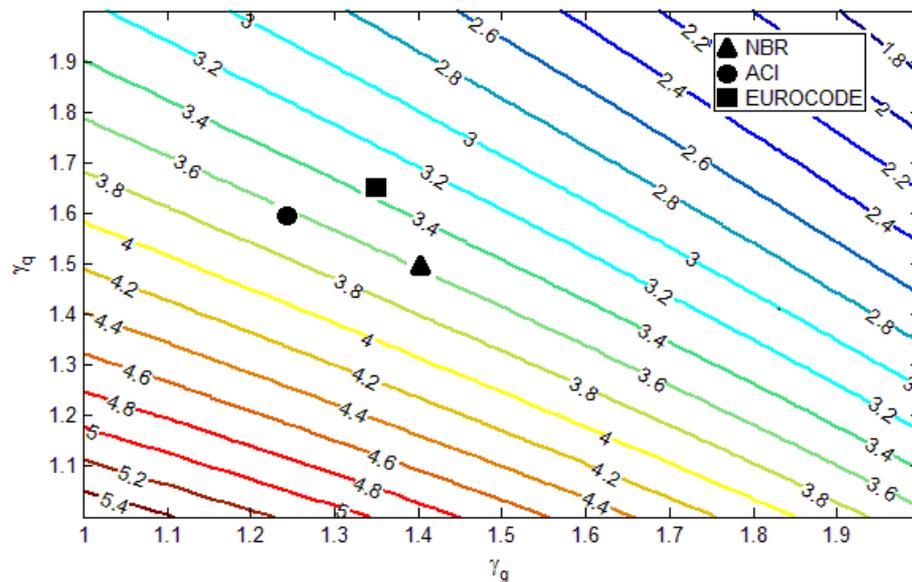
solicitações externas ao longo de sua vida útil para a viga apresentada no estudo de caso 2. A calibração foi realizada para o percentual de carga permanente em torno de 65%.

As diferentes combinações dos coeficientes que majoram as cargas mostram que, quanto maiores forem eles, menores serão os índices de confiabilidade visto que está se considerando cargas cada vez maiores. Contudo, foi escolhido o índice de confiabilidade alvo, 3,8, conforme recomendado e será verificada quais as possíveis combinações que atendem a esse requisito.

Na Figura 5.19, apresenta-se a superfície de resposta e a curva de nível do modo de falha que analisa o desempenho da estrutura quanto ao momento fletor. Nota-se que para este modo de falha os índices de confiabilidade são próximos do esperado, em torno de 3,65 para as normas brasileira e norte americana, e 3,35 para a norma européia. Portanto, apesar das normas adotarem diferentes fatores de segurança, esperam um mesmo nível de segurança para a sua estrutura. Uma combinação possível em que o índice de confiabilidade seria 3,8 é $\gamma_g=1,25$ e $\gamma_q= 1,5$. Essa combinação é bem próxima da combinação atual adotada pela NBR e a pequena diferença sugerida para se alcançar o β alvo é garantida com os coeficientes de minoração da resistência.



(a)



(b)

Figura 5.19 - Gráfico do β da função G_M : (a) Superfície de resposta; e (b) Curva de nível.

Na Figura 5.20, apresenta-se a superfície de resposta e a curva de nível do modo de falha que analisa o desempenho da estrutura quanto ao esforço cortante. Nota-se que para este modo de falha os índices de confiabilidade são altos, em torno de 5,8 para a norma brasileira, 5,65 para a norma norte americana e 5,45 para a norma europeia. Neste caso também nota-se a proximidade dos índices de confiabilidade para as diferentes normas, apesar de ser um dos casos em que os índices são os mais destoantes, chegando a

diferença de 0,35. Para este caso, não se tem uma combinação ideal, pois tal combinação elevaria demasiadamente a carga de projeto em relação a carga real esperada. O que se percebe é que tal sistema estrutural é extremamente seguro para tal modo de falha em relação aos outros modos de falha. Portanto, este não é uma falha provável de acontecer e não são necessários coeficientes.

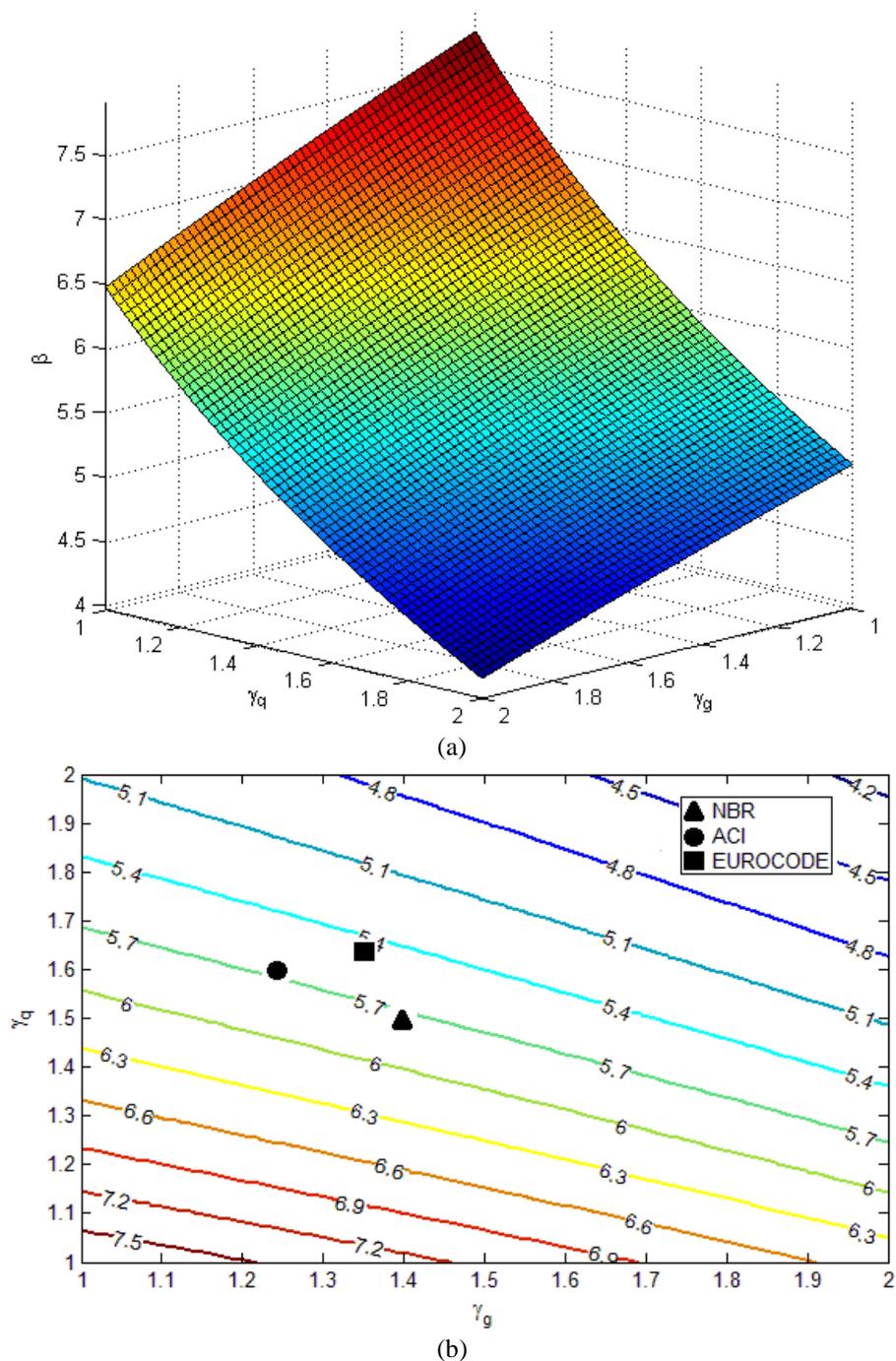


Figura 5.20 - Gráfico do β da função G_V : (a) Superfície de resposta; e (b) Curva de nível.

Na Figura 5.22, apresenta-se a superfície de resposta e a curva de nível do modo de falha que analisa o desempenho da estrutura quanto ao fluxo cisalhante na laje de concreto. Nota-se que para este modo de falha os índices de confiabilidade também são altos, em torno de 6,7 para a norma brasileira, 6,5 para a norma norte americana e 6,4 para a norma européia. Neste caso também nota-se a proximidade dos índices de confiabilidade para as diferentes normas, apesar de ser outro caso em que os índices são os mais destoantes. Da mesma forma que no caso anterior, não se tem uma combinação ideal, pois tal combinação elevaria demasiadamente a carga de projeto em relação a carga real esperada. O que se percebe é que tal sistema estrutural é extremamente seguro para tal modo de falha em relação aos outros modos de falha. Portanto, este não é uma falha provável de acontecer. Esse fato pode ter sido uma das razões que levaram a redução da armadura mínima exigida pela norma brasileira na sua revisão realizada em 2008. Contudo, o que se pode concluir é que essa taxa de armadura ainda é elevada para o índice de confiabilidade que se espera.

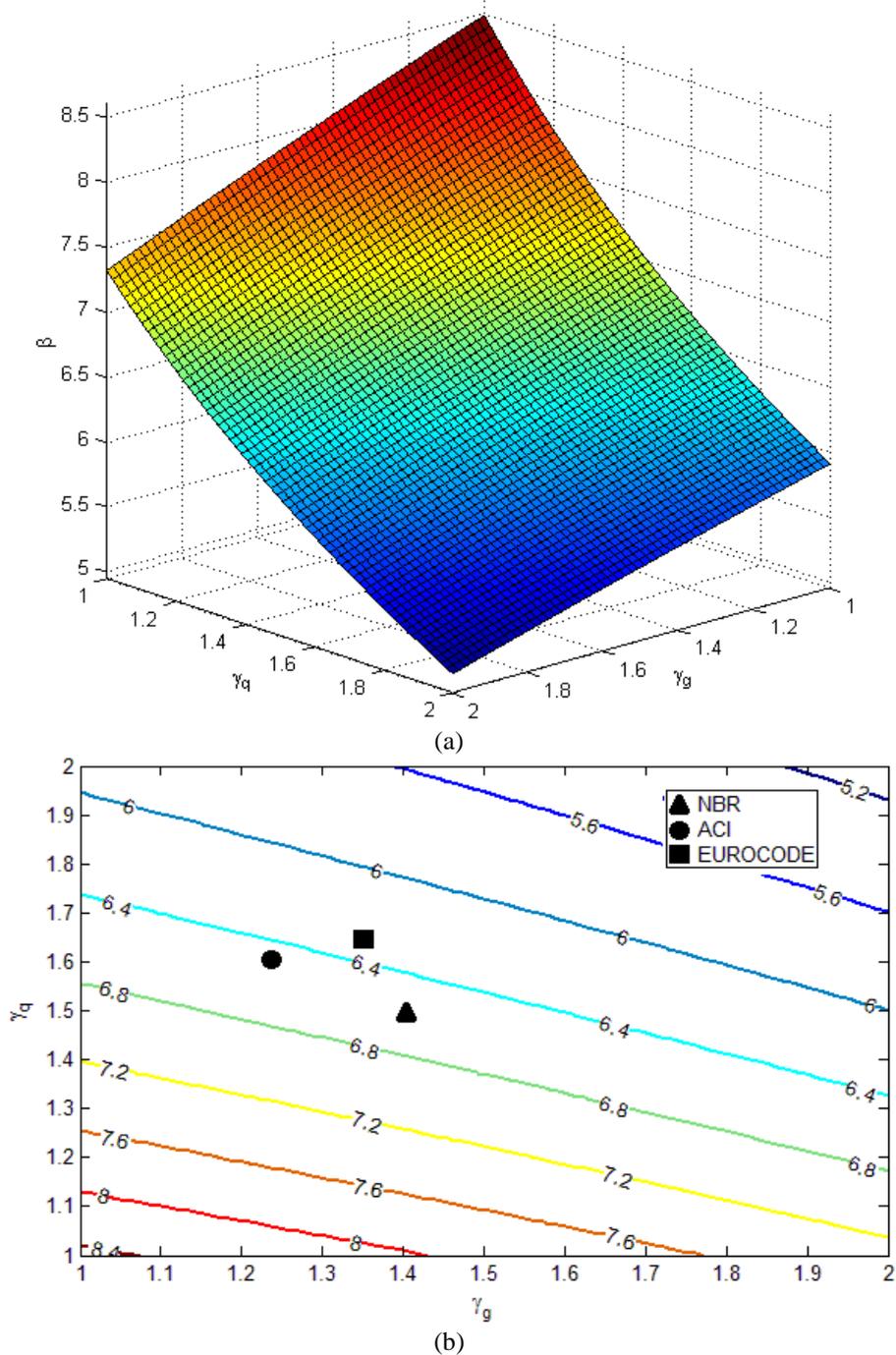


Figura 5.21 - Gráfico do β da função G_A : (a) Superfície de resposta; e (b) Curva de nível.

Na Figura 5.23, apresenta-se a superfície de resposta e a curva de nível do sistema em série. Observa-se que o sistema em série é comandado pela função G_M , a qual possui menor β , sendo a razão da primeira falha do sistema.

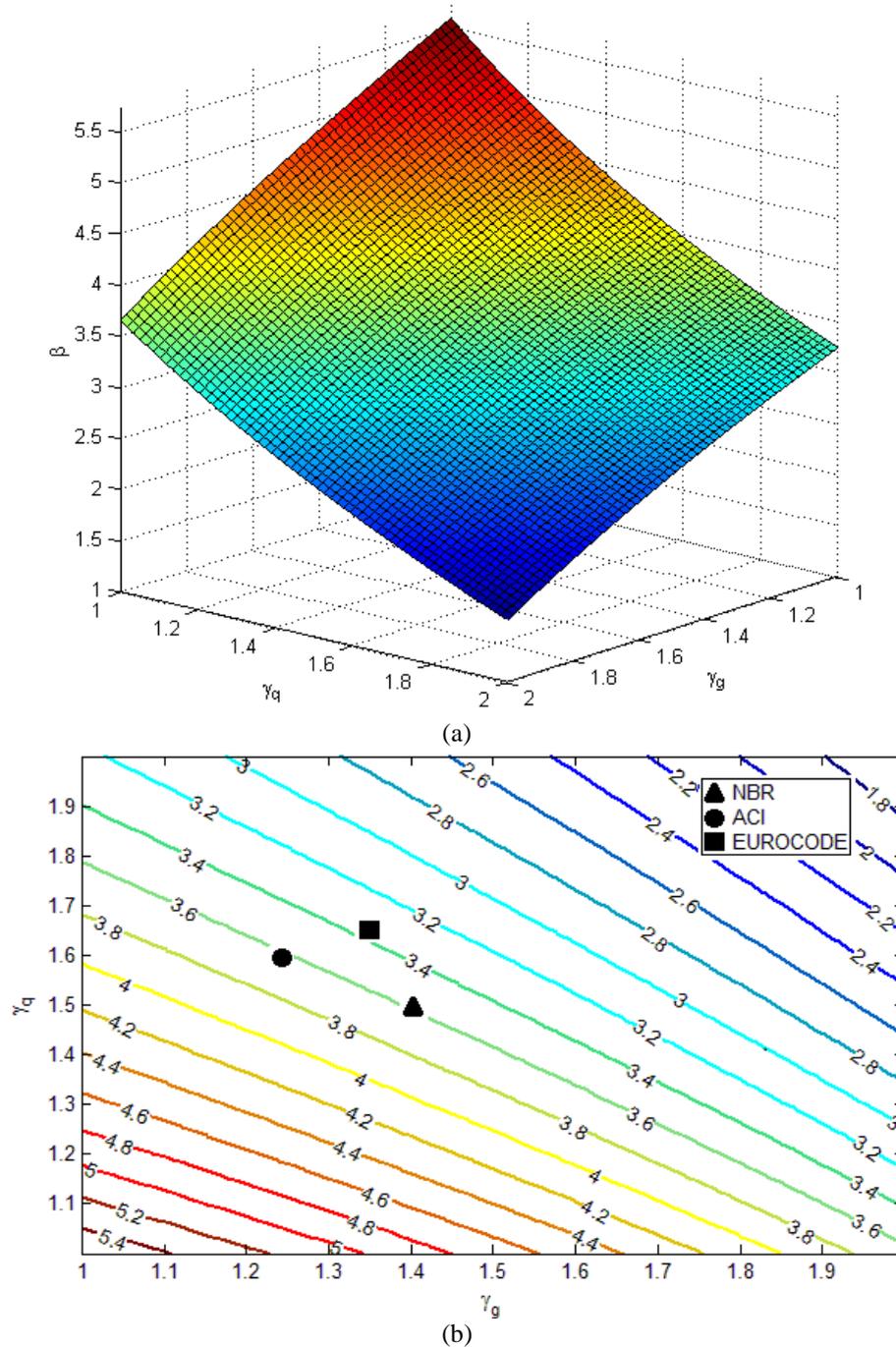


Figura 5.22 - Gráfico do β da função G_{SS} : (a) Superfície de resposta; e (b) Curva de nível.

Na Figura 5.23, apresenta-se a superfície de resposta e a curva de nível do sistema em paralelo. Observa-se que o sistema em série é comandado pela função G_A , a qual possui maior β , sendo a última razão pela qual o sistema falhará.

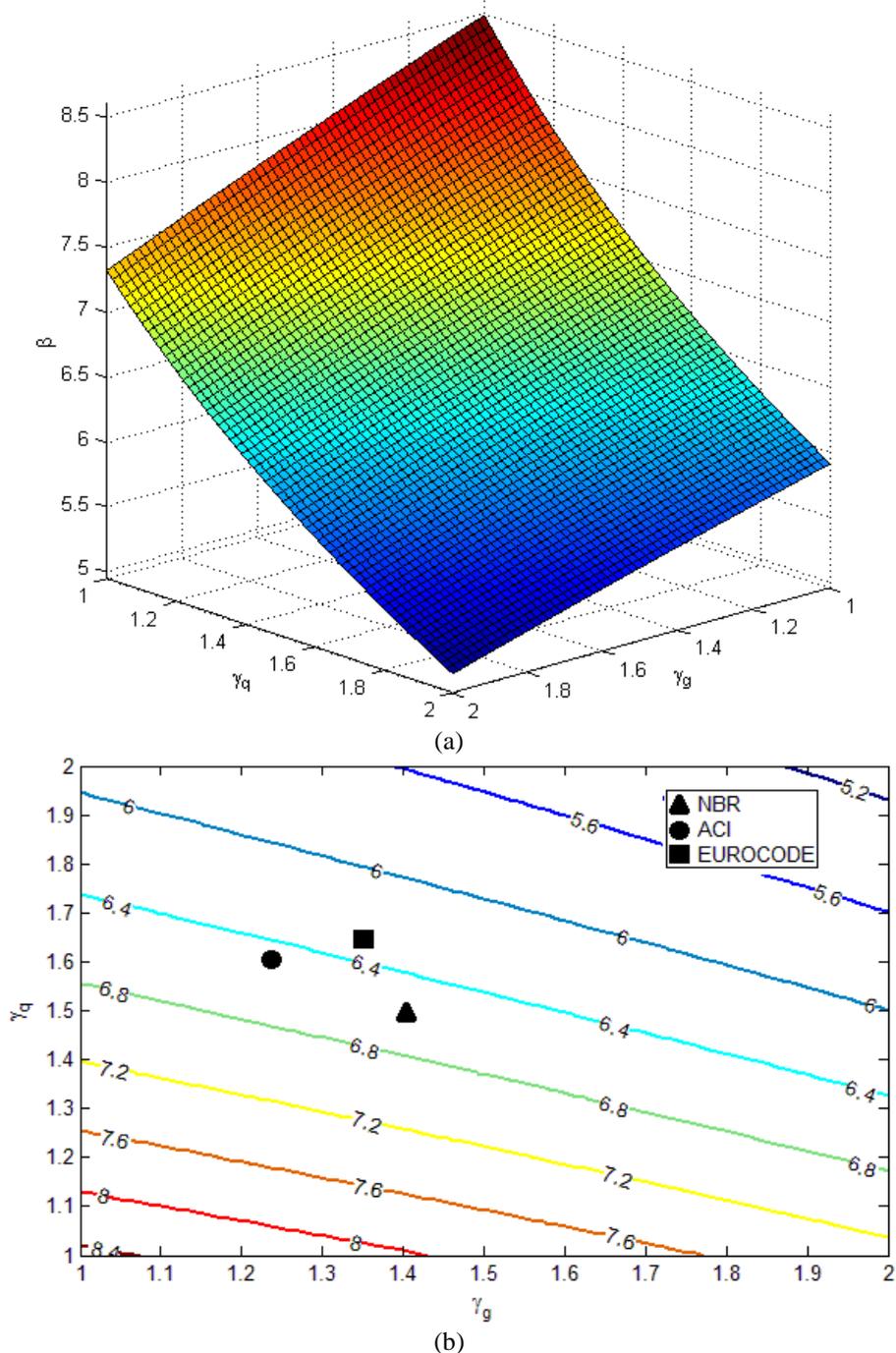


Figura 5.23 - Gráfico do β da função G_{Sp} : (a) Superfície de resposta; e (b) Curva de nível.

Após a análise dos modos de falha da viga, nota-se a disparidade entre os índices de confiabilidade dos modos de falha, sendo possível identificar quais deles são os mais críticos, ou seja, as falhas mais prováveis de acontecerem. O modo de falha mais crítico é o momento fletor, o qual é um modo de falha importante que está relacionado aos deslocamentos e fissuras, estado limite de serviços, sendo um dos mais abordados na literatura. Portanto, o seu índice de confiabilidade apesar de ser o mais crítico está

próximo do que se espera para que se tenha uma estrutura com o nível de segurança aceitável. Os altos índices de confiabilidade do modos de falha cortante e fluxo cisalhante mostram que ainda temos como tornar nossas estruturas mais econômicas sem que haja perdas significativas em seus níveis de segurança.

5.6 - CUSTO-BENEFÍCIO DO GRAU DE CONEXÃO

Nesta seção, apresenta-se o estudo em relação ao custo relativo, CR , e o β da viga apresentada no estudo de caso 3 com diferentes η , foram analisadas as funções do ELU.

A Tabela 5.1 apresenta o β dos modos de falha da viga utilizando conector tipo pino com cabeça. Percebe-se que o β relacionado ao esforço cortante não é influenciado pelo grau de conexão e é satisfatório em relação ao nível de segurança esperado. O β do modo de falha G_A também é satisfatório, apesar de ter uma variação de aproximadamente 40% entre o grau de conexão 100% e 40% em direção oposta aos outros modos de falha. O modo de falha G_C é o mais crítico determinando o modo de falha do sistema em série. Enquanto, o sistema em paralelo é determinado pelos modos de falha G_A , para η mais baixos, e G_C , para η maiores.

Tabela 5.1 - Conector pino com cabeça: β dos modos de falha da viga com diferentes η .

	G_M	G_V	G_C	G_A	G_{SS}	G_{SP}
40%	3,36	7,99	1,07	10,79	1,07	10,79
60%	3,77	7,99	1,07	8,93	1,07	8,93
80%	4,09	7,99	1,07	7,53	1,07	7,99
100%	4,35	7,99	1,07	6,48	1,07	7,99

Na Tabela 5.2, apresenta o β dos modos de falha da viga utilizando o conector tipo perfil U. Observam-se os mesmos comportamentos do caso anterior, porém o β da função G_C é mais alto.

Tabela 5.2 - Conector perfil U: β dos modos de falha da viga com diferentes η .

	G_M	G_V	G_C	G_A	G_{SS}	G_{SP}
40%	3,36	7,99	1,13	10,79	1,13	10,79
60%	3,77	7,99	1,13	8,93	1,13	8,93
80%	4,09	7,99	1,13	7,53	1,13	7,99
100%	4,35	7,99	1,13	6,48	1,13	7,99

A seguir são apresentados os gráficos que relacionam o custo, o grau de conexão e o índice de confiabilidade dos modos de falha das vigas estudadas.

A Figura 5.24 mostra os gráficos referentes ao conector do tipo pino com cabeça. Observa-se que o modo de falha mais crítico é o modo de falha que analisa o cisalhamento dos conectores. Contudo, ele não varia com o grau de conexão. O modo de falha que analisa o momento fletor é o segundo modo de falha mais crítico. O nível de segurança deste modo de falha para o grau de conexão 40% está abaixo do esperado. Portanto, nota-se que a viga em estudo não se mostra segura para graus de conexão mais baixos permitidos pela norma brasileira. Além disso, o ganho econômico em detrimento da redução do grau de conexão não é significativo, em torno de 2%, que corresponde a aproximadamente R\$ 80,00, entre a interação total e a parcial 40%.

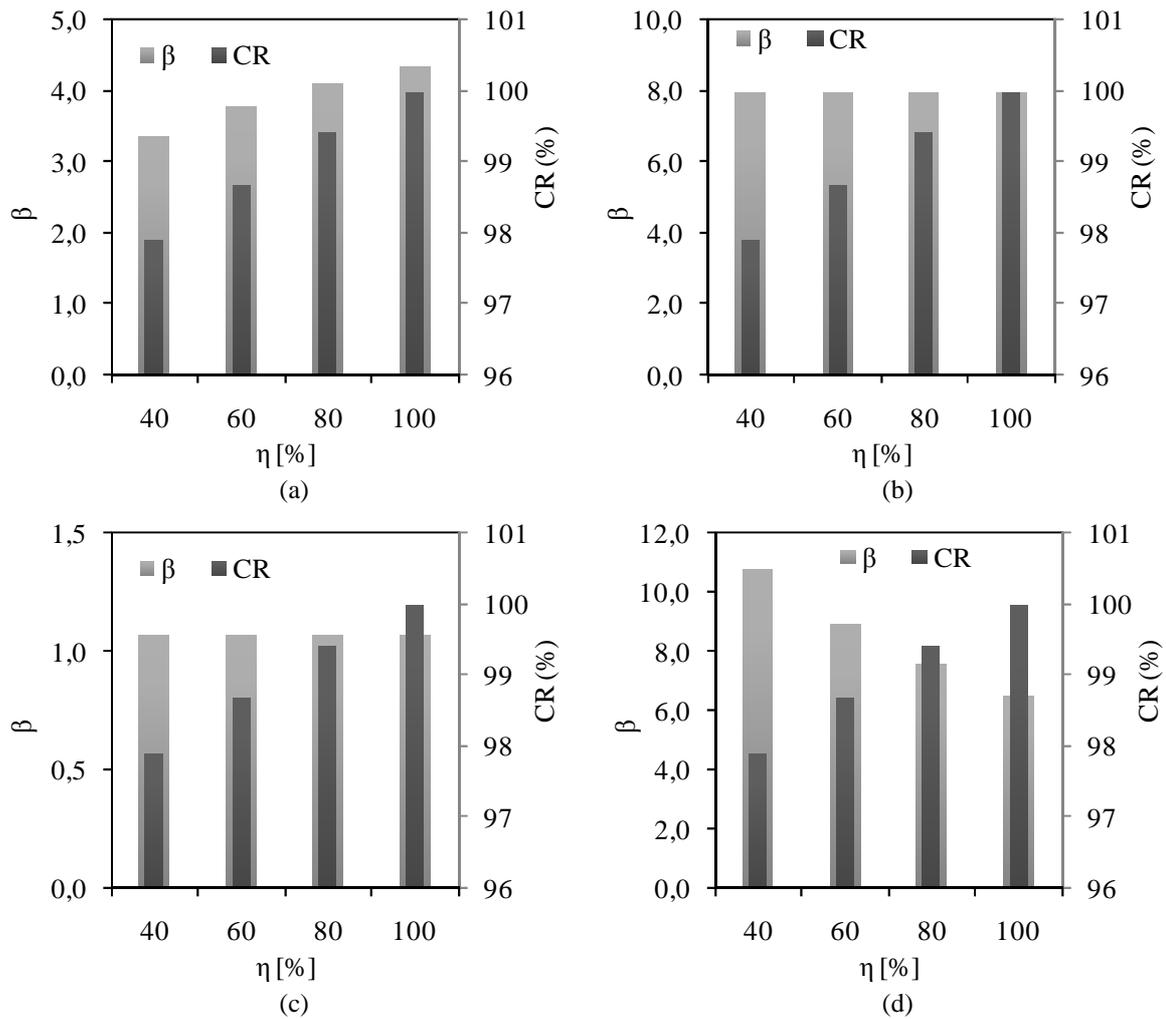


Figura 5.24 - Relação η x CR x β viga com conector tipo pino com cabeça: (a) G_M ; (b) G_V ; (c) G_C ; (d) G_A .

A Figura 5.25 apresenta os resultados para conectores do tipo perfil U. Observa-se que a ordem de criticidade dos modos de falha é a mesma do caso anterior. Sendo que o ganho econômico em detrimento da redução do η é ainda mais insignificante, em torno de 0,6%, que corresponde a aproximadamente R\$ 22,00, entre a interação total e a parcial 40%. Além disso, o custo do sistema com este tipo de conector é menor, em torno de R\$ 100,00. Isso acontece devido a diferença no custo dos conectores.

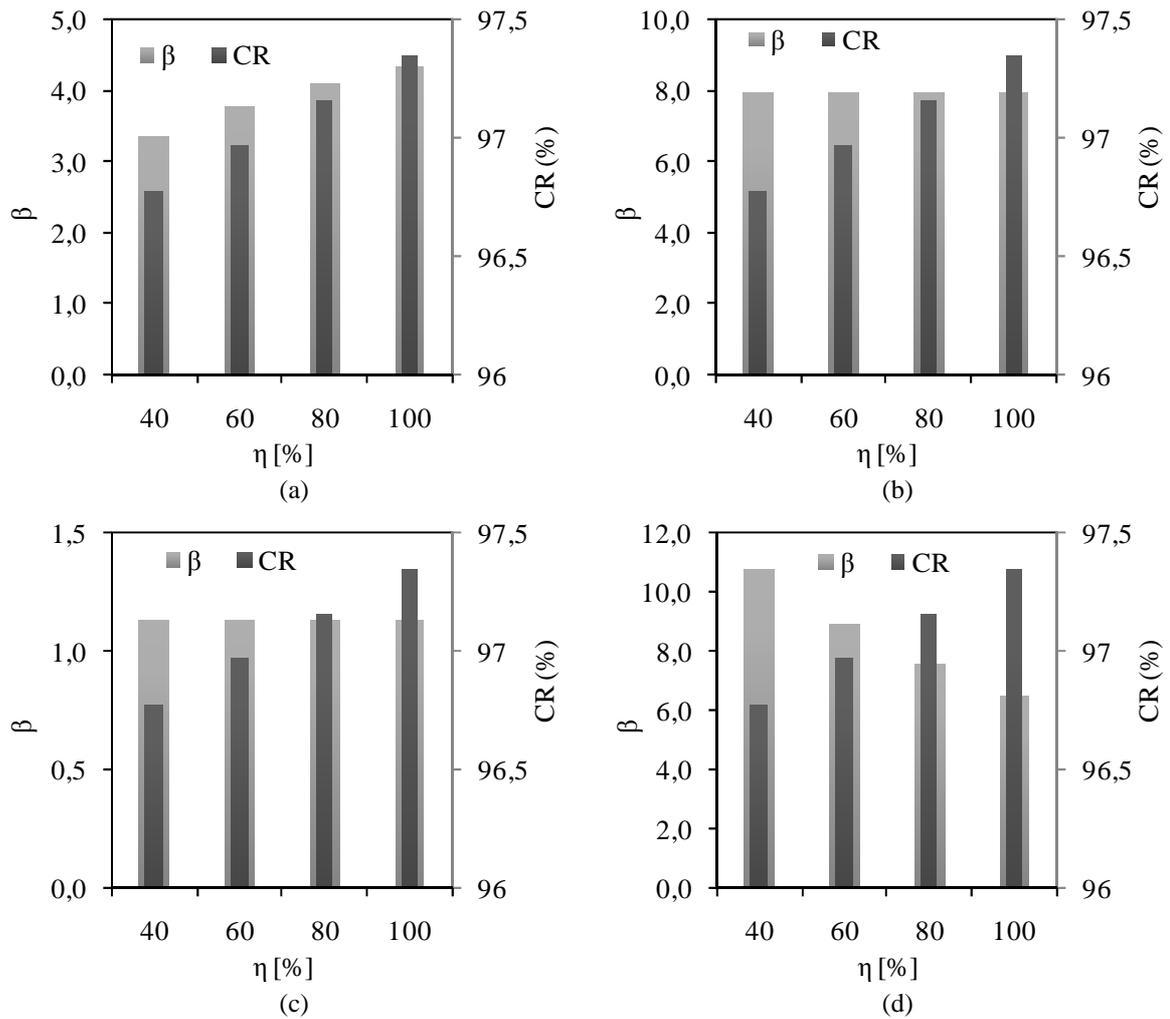


Figura 5.25 - Relação η x CR x β viga com conector tipo perfil U: (a) G_M ; (b) G_V ; (c) G_C ; (d) G_A .

Na Figura 5.26, apresentam-se as análises dos sistemas em híbrido e em paralelo. Observa-se que a redução do β devido a redução do η para ao sistema híbrido é significativa em relação a redução do custo. E que, para o sistema em paralelo, a redução ocorre com o aumento do η .

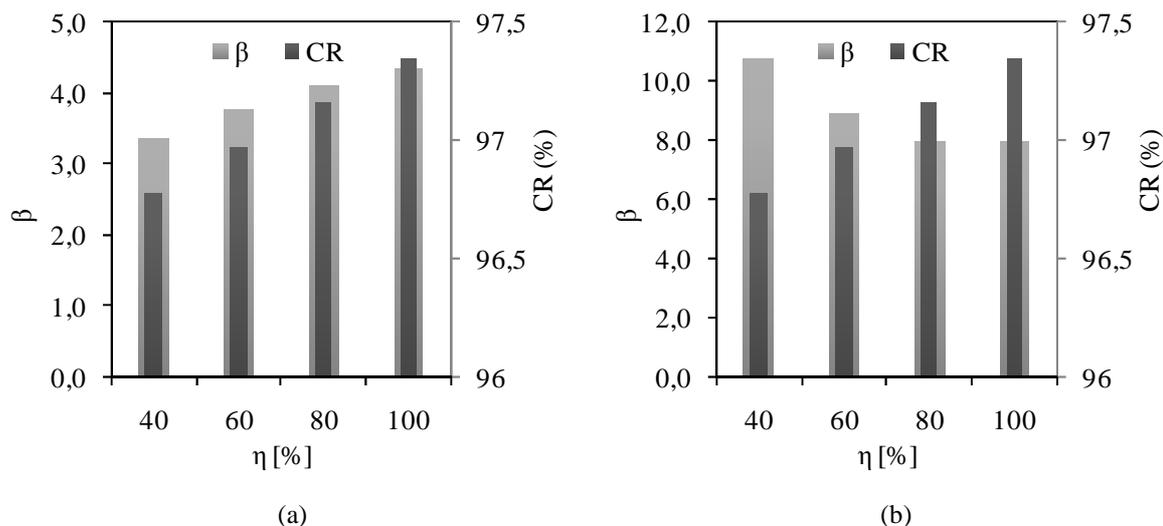


Figura 5.26 - Relação η x CR x β para a viga com conector perfil U: (a) G_{SH1} ; (b) G_{SP} .

Com isso, pode-se concluir que o pequeno ganho econômico que se tem reduzindo o grau de conexão não se equilibra com a perda no nível de segurança da estrutura. Além disso, vale ressaltar a importância da adaptação das técnicas construtivas em relação aos materiais disponíveis no mercado de cada região. Um bom exemplo disso são os conectores do tipo pino com cabeça, amplamente utilizado em outros países em que seu custo é menor; porém, no Brasil, ainda tem um custo elevado se comparado a outros materiais que podem ser utilizados. Essa é uma das razões e, de certa forma, uma motivação para o desenvolvimento de estudos sobre novos tipos de conectores. Também se observa esse comportamento em relação ao tipo de perfil utilizado nas vigas mistas, nesse estudo eles representaram em torno de 56% do custo total do sistema. Com isso, estudos recentes vem abordando a viabilidade da utilização de perfis formados a frio, os quais tem maior disponibilidade no mercado brasileiro.

6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 - CONCLUSÕES

Esta dissertação abordou o estudo dos modos de falha de vigas mistas via análise de confiabilidade. Esse estudo arremeteu a influência dos coeficientes parciais de segurança e da variação de parâmetros de projeto no índice de confiabilidade dos modos de falha, bem como a calibração desses coeficientes e a comparação entre os índices de confiabilidade das normas brasileira, norte americana e européia em função dos valores adotados para tais coeficientes. Por fim, abordou a análise de custo de vigas mistas com diferentes graus de conexão e o índice de confiabilidade correspondente a esses graus.

Observou-se que os coeficientes parciais de segurança omitem a importância de algumas variáveis aleatórias. Além disso, os níveis de segurança dos modos de falha utilizados para dimensionar o sistema estrutural são muito diferentes entre si, o que leva a índices de confiabilidades bem variados. O coeficiente de redução utilizado no modo de falha que analisa o deslocamento no meio do vão afeta o modo de falha crítico de vigas mistas com interação entre 80% e 100%. Este modo de falha dá lugar ao que analisa a força cisalhante nos conectores para esses casos.

Portanto, deve-se repensar a forma que as vigas mistas são dimensionadas de modo a torná-las economicamente mais viáveis, pois não é coerente adotar níveis de segurança altíssimos para determinados modos de falha enquanto outros estão muito aquém, ou seja, muito antes que a estrutura falhe por algum desses modos com tais níveis elevados, ela já terá entrado em colapso devido aos modos que tem baixo índice de confiabilidade. É essencial que se busque uniformizar os índices de confiabilidade dos modos de falha verificados no dimensionamento das vigas mistas.

Com isso, realizou-se o estudo sobre a calibração dos coeficientes parciais de segurança que majoram as cargas atuantes na estrutura, observando-se que, apesar das normas brasileira, norte americana e européia adotarem diferentes fatores de segurança, levam ao mesmo nível de segurança. E que há uma disparidade relevante entre o índice de confiabilidade dos modos de falha, sendo uma razão para a adoção de diferentes coeficientes para cada modo de falha. Além disso, confirmou-se que os fatores de segurança modificam o grau de criticidade dos modos de falha.

Por fim, observou-se a influência do grau de conexão das vigas mistas no índice de confiabilidade de seus modos de falha, notando que o pequeno ganho econômico que se tem reduzindo o grau de conexão não se equilibra com a grande perda no nível de segurança da estrutura. Notou-se também que alguns modos de falha não apresentam níveis de segurança satisfatórios para graus de conexão muito baixos e que a escolha dos materiais, principalmente do tipo de conector, influencia bastante o custo do sistema e o seu nível de segurança para diferentes graus de conexão. O conector do tipo perfil U laminado se mostrou mais apropriado do que o do tipo pino com cabeça em relação ao custo do sistema. Portanto, vale ressaltar a importância da adaptação das técnicas construtivas em relação aos materiais disponíveis no mercado de cada região.

6.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros são sugeridos os seguintes tópicos:

- Verificação dos resultados apresentados através de experimentos práticos, o que possibilitaria verificar se o que se espera que aconteça segundo a ABNT NBR 8800:2008, está de acordo;
- Aprofundamento da metodologia utilizada, possibilitando sua aplicação em outras áreas e outros sistemas, de forma a torná-la mais abrangente sem deixar de ser consistente;
- Análise de possíveis alterações no sistema, visando ajustar a probabilidade de falha de cada verificação, buscando deixar o sistema mais uniforme e econômico segundo seu nível de segurança;
- Calibração dos coeficientes parciais de segurança que atuam na resistência dos materiais;
- Estudo de novos materiais que possam ser utilizados a fim de minimizar o custo, como novos tipos de conectores e o estudo sobre a utilização de outros tipos de perfis.

REFERÊNCIAS DA LITERATURA

ALMEIDA, A. F. Projeto ótimo baseado em confiabilidade de pórticos planos de concreto armado. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

ALVA, G. M. S. Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto. 2000. 296p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

ALVA, G. M. S.; MALITE, M. Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto. Publicação Interna: Cadernos de Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, vol. 7, n. 25, p. 51-84, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8681:2003 - Ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8800:1986. Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios (Método dos Estados Limites). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8800:2008. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (AISC), Load and resistance factor design specifications for structural steel buildings, Chicago, IL, USA, 1999.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (ANSI/AISC 360-10), Specification for Structural Steel Buildings, An American National Standard, 2010.

ASLANI, F.; LLOYD, R.; UY, B. Statistical calibration of safety factors for flexural stiffness of composite columns. Steel and Composite Structures, v. 20, n. 1, 2016.

BARBOSA, W. C. de S. Estudo de Conectores de cisalhamento em barras de aço para vigas mistas de aço e concreto. 2016. 511p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção

Civil), Publicação E.TD – 008^a/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

BECK, A. T. Curso de Confiabilidade Estrutural. Universidade de São Paulo. SP, 2010.

CAMPOS, S. E. Análise da Confiabilidade de Vigas de Concreto Armado com Plástico Reforçado por fibras. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Departamento de Engenharia Civil, Belo Horizonte/MG, 2009.

CASTANHEIRA, A. M. Avaliação da Confiabilidade de Vigas Metálicas Dimensionadas pela NBR 8800. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto/MG, 2004.

CAVALCANTE, O. R. O. Estudo de Conectores de Cisalhamento do Tipo ‘V’ em Vigas Mistas. 2010. 192p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil), Publicação E.TD – 006^a/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN), EUROCODE 4 – Calcul des structures mixtes acier-béton, Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments, Bruxelles, 2005.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN), EN 1990 – Europe: Basis of Structural Design, 2001.

CHATER, L. Estudo numérico e experimental de conectores de cisalhamento feitos de vergalhão CA-50 para uso em estrutura mista aço-concreto. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília - UnB. Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil. Brasília/DF, 2015.

CHOI, S.K, GRANDHI, R.V, CANFIELD, R.A. Reliability-Based Structural Desing. Springer-Verlag, Londres, 2007.

CHUNG, L.; LIM, J. J.; HWANG, H. J.; EOM, T.S. Review of Design Flexural Strengths of Steel–Concrete Composite Beams for Building Structures. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 10, n. 3, 2016.

COSTA, M. A. G. S. Ambiente Computacional Pedagógico sobre o Comportamento e Dimensionamento de Vigas Mistas em Aço e Concreto. 2005. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo.

DAVID, D. L. Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis formado a frio e laje de vigotas pré-moldadas. 2007. 250p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

DER KIUREGHIAN, A.; LIU, P. Structural Reliability Under Incomplete Probability Information, J. Eng. Mech., 112:85,104, 1986.

ELLINGWOOD, B. R.; GALAMBOS, T. V.; MACGREGOR, J. G.; CORNELL, C. A. *Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58. NBS SpecialReport577, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 222 pp. 1980.*

GALAMBOS, T. V., ELLINGWOOD, B., MACGREGOR, J. G., COMELL, C. A. Probability Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, Número 5, pp. 959-977, 1982.

GALAMBOS, T. V. Design Codes. Engineering Safety, McGraw-Hill, Inglaterra, 1992.

GUIMARÃES, F. dos S., PINHEIRO, J. R., VASCONCELOS, P. F. de, RESENDE, P. H. de C. Análise experimental de vigas mistas de aço e concreto com perfil de aço formado a frio. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia da Universidade Vale do Rio Doce. Governador Valadares/MG 2010.

HASOFER, A. M., LIND, N. C. Exact and Invariant Second Moment Code Format, Journal of Engineering Mechanics Division, New York, ASCE, V. 100, No. 1, pp. 111-121, 1974.

HE, G.-hui; YANG Xiao. Analysis of higher order composite beams by exact and finite element methods. Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal v. 53 n. 4, 2015.

HOLICKY, M.; MARKOVA, J. Safety of concrete structures in accordance with eurocodes. Proceedings of the 2nd international fib congress, Naples, Itália, 2006.

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

KIRCHHOF, L. D. Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos - UFSCAR. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. São Carlos/SP, 2004.

KRUGER, C. M. Análise de confiabilidade estrutural aplicada às barragens de concreto. Curitiba, PR, 2008.

KUMAR, P.T.; REDDY, L. S..Experimental Studies on Steel-Concrete Composite Beams in Bending. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, v. 2, 2016.

LE, V. P. N.; BUI, D. V.; CHU, T. H. V.; KIM, I. T.; AHN, J. H.; DAO, D.K. Behavior of steel and concrete composite beams with a newly puzzle shape of crestbond rib shear connector: an experimental study. Structural Engineering and Mechanics, v. 60, n. 6, 2016.

LEAF, D.; LAMAN, J. A. Testing and Analysis of Composite Steel-Concrete Beam Flexural Strength. International Journal of Structural and Civil Engineering Research, v.2, n. 3, 2013.

MALITE, M. Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: ênfase em edifícios.1990. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MELCHERS, R. E. On Bounds and Approximations in Structural Systems Reliability. Research Report No. 1/1981, Department of Civil Engineering, Monash University, Australia, 1981.

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

NARVÁEZ, N. S. Projeto baseado em Confiabilidade de Vigas em Concreto Armado com e sem Reforço de Compósitos de Fibras de Carbono. 2012. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NOGUEIRA, C. G. Um modelo de confiabilidade e otimização aplicado às estruturas de barras de concreto armado. São Carlos, SP, maio, 2005.

NOWAK, A. S.; COLLINS, K. R. Reliability of structures. McGraw-Hill Higher Education. United States of America, ISBN 0-07-048-6, 2000.

NOWAK, A. S.; SZERSZEN, M. “Calibration of design code for buildings (ACI 318): Part 1 – Statistical models for resistance”. ACI structural Journal, New York, v. 100, n. 3, 2003.

MUJAGI, J. R. U.; EASTERLING, W. S. Reliability assessment of composite beams. Journal of Constructional Steel Research, v. 65, 2009.

OEHLERS, D. J.; BRADFORD, M. A. Composite Steel and Concrete Structural Members: Fundamental Behaviour. Kidlington, Oxford, 1995.

PACHÁS, M. A. C. Análise limite com otimizador de grande escala e análise de confiabilidade. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rio de Janeiro/RJ, 2009.

PANTOJA, J. da C. Geração automática via otimização topológica e avaliação de segurança de modelos de bielas e tirantes. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rio de Janeiro/RJ, 2012.

PANTOJA, J. da C; SILVA, T. S. da; NARVAEZ, N. S. Avaliação de segurança de punção em lajes sem armadura de cisalhamento via análise de confiabilidade. Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais para Engenharia – CILAMCE XXXVI, Rio de Janeiro/RJ, 2015.

PFEIL, W. C.; PFEIL, M. S. Estruturas de Aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

RACKWITZ; FIESSLER, B. Structural reliability under combined load sequences, Computers and Structures, 9:489-494, 1978.

ROCHA, F. M. Modelos numéricos de vigas mistas de aço e concreto pertencentes a sistemas de pisos mistos de pequena altura em situação de incêndio. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos - UFSCAR. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. São Carlos/SP, 2012.

RODRIGUES, M. C.; ANDRADE, S. A. L. de; LIMA, L. R. O de; VELLASCO, P. C. G. da S.; RAMIRES, F. B. Experimental assessment of the composite joints shear connector component. Journal of Constructional Steel Research, v. 132, 2017.

SAGRILO, L. V. S. Apostila do Curso de Confiabilidade Estrutural, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

SANTOS, D. M.; STUCCHI, F. R.; BECK, A. T. Reliability of beams designed in accordance with Brazilian codes. Revista IBRACON de Estruturas, v.7, n. 5, 2014.

SHAO, X.; BAI, C.; LIANG, W.. Statistical Resistance and Reliability Analysis of Steel-Concrete Composite Beams. International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering - AEECE, China, 2015.

SOUZA Jr., A. C. de. Aplicação de Confiabilidade na Calibração de Coeficientes Parciais de Segurança de Normas Brasileiras de Projeto Estrutural. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SOUZA, O. L. C. Aplicação da Teoria de Confiabilidade às Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Torção com Compósito de Fibra de Carbono. Tese de doutorado. Universidade Federal Fluminense – UFF. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Niterói/RJ, 2011.

TURMO, J.; LOZANO-GALANTE, J. A.; XU, M. D. Modeling composite beams with partial interaction. Journal of Constructional Steel Research, v. 114, 2015.

VAZ, L. E. Análise de Confiabilidade - DME, Escola Politécnica da UFRJ, Notas de Aula, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

_____. Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas, Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

_____. Applications of Reliability Analysis in Civil Engineering Problems - Plenary Lecture, Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais para Engenharia – CILAMCE XXXII, Ouro Preto, 2011.

VERÍSSIMO, G. S. Desenvolvimento de um Conector de Cisalhamento em Chapa Dentada para Estruturas Mistas de Aço e Concreto e Estudo do seu Comportamento. 316p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

ZHAO, H.; YUAN, Y. Experimental studies on composite beams with high-strength steel and concrete. *Steel and Composite Structures*, v. 10, n. 4, 2010.

ZHAO, H.; YUAN, Y.; YE, Z. Simplified nonlinear simulation of steel–concrete composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 71, 2012.

ZOU, G. P.; SHEN, X.H.; WANG, P. Investigation on the failure mechanism of steel-concrete steel composite beam. *Steel and Composite Structures, An Int'l Journal* v. 20 n. 6, 2016.

XING, Y.; HAN, Q.; XUA, J.; GUO, Q.; WANG, Y. Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete-steel composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 123, 2016.

WANG, S.; TONG, G.; ZHANG, L. Reduced stiffness of composite beams considering slip and shear deformation of steel. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 131, 2017.

APÊNDICE I - VIGA ESCORADA

A seguir são apresentadas as tabelas com os dados referentes aos resultados apresentados para a viga escorada.

Resultados para a viga escorada com os dados originais.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável							
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10
G_M	100	4,52	3,15E-06	5	α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,07
					X^*_{final}	223,88	-	19,72	7,07	5,04	26,33	225,00	9,87
	80	4,27	9,60E-06	5	α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,06
					X^*_{final}	225,03	-	19,72	7,07	5,04	24,69	225,00	9,90
	60	3,98	3,50E-05	5	α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05
					X^*_{final}	226,40	-	19,72	7,07	5,04	22,78	225,00	9,92
	40	3,61	1,53E-04	5	α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,03
					X^*_{final}	228,03	-	19,72	7,07	5,04	20,57	225,00	9,95
G_V	100	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
	80	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
	60	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
	40	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
G_C	100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-

continua

continuação

G_C	80	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	40	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
G_A	100	6,87	3,18E-12	9	α	0,00	-0,10	-0,33	0,03	0,02	0,92	0,00	-0,20	
					X^*_{final}	249,39	48,30	13,40	7,07	5,04	44,96	225,00	9,45	
	80	7,94	9,99E-16	11	α	0,00	-0,10	-0,34	0,03	0,02	0,91	0,00	-0,21	
					X^*_{final}	249,39	47,92	12,52	7,07	5,04	55,81	225,00	9,35	
	60	9,37	0,00E+00	61	α	0,00	-0,14	-0,40	0,03	0,02	0,87	0,00	-0,25	
					X^*_{final}	249,39	46,81	10,52	7,09	5,05	67,26	225,00	9,04	
	40	12,01	0,00E+00	63	α	0,00	-0,26	-0,53	0,04	0,03	0,69	0,00	-0,42	
					X^*_{final}	249,39	42,73	6,68	7,18	5,09	67,26	225,00	8,00	
	G_δ	100	3,70	1,09E-04	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,09
						X^*_{final}	-	-	18,61	-	5,04	22,36	219,76	9,87
		80	3,44	2,88E-04	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,08
						X^*_{final}	-	-	18,74	-	5,04	20,82	220,37	9,89
60		3,13	8,67E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08	
					X^*_{final}	-	-	18,87	-	5,03	19,04	221,05	9,90	
40		2,72	3,23E-03	5	α	-	-	-0,08	-	0,05	0,99	-0,07	-0,07	
					X^*_{final}	-	-	19,04	-	5,03	16,92	221,86	9,92	

Resultados para a viga escorada com $h_c = 8$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável							
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	Q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10
G_M	100	4,15	1,63E-05	5	α	-0,35	-	0,00	0,05	0,03	0,93	0,00	-0,06
					X^*_{final}	225,60	-	19,72	7,07	5,04	23,90	225,00	7,92
	80	3,97	3,60E-05	5	α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05
					X^*_{final}	226,43	-	19,72	7,07	5,04	22,73	225,00	7,94
	60	3,73	9,47E-05	5	α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,04
					X^*_{final}	227,49	-	19,72	7,07	5,04	21,29	225,00	7,95
	40	3,43	2,99E-04	5	α	-0,36	-	0,00	0,06	0,04	0,93	0,00	-0,03
					X^*_{final}	228,80	-	19,72	7,07	5,03	19,57	225,00	7,97
G_V	100	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
	80	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
	60	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
	40	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
G_C	100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-
	80	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-
	60	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-

continua

continuação

G_C	40	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
					X*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-
G_A	100	5,92	1,61E-09	8	α	0,00	-0,11	-0,31	0,03	0,02	0,93	0,00	-0,18
					X*_{final}	249,39	48,40	14,48	7,07	5,04	36,92	225,00	7,67
	80	6,98	1,46E-12	9	α	0,00	-0,11	-0,31	0,03	0,02	0,93	0,00	-0,18
					X*_{final}	249,39	48,04	13,66	7,07	5,04	46,78	225,00	7,60
	60	8,39	0,00E+00	20	α	0,00	-0,12	-0,32	0,02	0,02	0,92	0,00	-0,19
					X*_{final}	249,39	47,49	12,59	7,07	5,04	62,07	225,00	7,49
	40	10,21	0,00E+00	100	α	0,00	-0,16	-0,31	0,03	0,02	0,91	0,00	-0,22
					X*_{final}	249,39	43,62	7,91	7,15	5,08	64,97	225,00	6,83
G_δ	100	3,25	5,73E-04	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,73	-	5,03	19,69	220,34	7,92
	80	3,02	1,27E-03	4	α	-	-	-0,09	-	0,05	0,99	-0,08	-0,07
					X*_{final}	-	-	18,84	-	5,03	18,41	220,89	7,93
	60	2,73	3,15E-03	5	α	-	-	-0,08	-	0,05	0,99	-0,08	-0,07
					X*_{final}	-	-	18,97	-	5,03	16,95	221,51	7,94
	40	2,35	9,27E-03	5	α	-	-	-0,08	-	0,06	0,99	-0,07	-0,06
					X*_{final}	-	-	19,12	-	5,03	15,20	222,24	7,95

Resultados para a viga escorada com $h_c = 9$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,34	7,16E-06	5	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	80	4,12	1,86E-05	5	X^*_{final}	224,73	-	19,72	7,07	5,04	25,12	225,00	8,90	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,03	0,93	0,00	-0,05	
	60	3,86	5,76E-05	5	X^*_{final}	225,72	-	19,72	7,07	5,04	23,72	225,00	8,92	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,04	
	40	3,52	2,14E-04	5	X^*_{final}	226,94	-	19,72	7,07	5,04	22,04	225,00	8,94	
					α	-0,36	-	0,00	0,06	0,04	0,93	0,00	-0,03	
						X^*_{final}	228,41	-	19,72	7,07	5,03	20,07	225,00	8,96
						α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
G_V	100	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
	80	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
	60	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
40	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-		
				α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-		
G_C	100	1,08	1,40E-01	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
	80	1,08	1,40E-01	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
40	1,08	1,40E-01	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-		
				α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-		

continua

continuação

G_A	100	6,41	7,25E-11	8	α	0,00	-0,10	-0,32	0,03	0,02	0,92	0,00	-0,19
					X^*_{final}	249,39	48,35	13,92	7,07	5,04	40,97	225,00	8,57
	80	7,48	3,84E-14	8	α	0,00	-0,11	-0,33	0,03	0,02	0,92	0,00	-0,19
					X^*_{final}	249,39	47,98	13,07	7,07	5,04	51,36	225,00	8,48
	60	8,89	0,00E+00	22	α	0,00	-0,13	-0,36	0,03	0,02	0,89	0,00	-0,22
					X^*_{final}	249,39	47,10	11,42	7,08	5,04	64,60	225,00	8,28
40	11,43	0,00E+00	36	α	0,00	-0,26	-0,52	0,04	0,03	0,72	0,00	-0,38	
				X^*_{final}	249,39	43,17	7,32	7,17	5,09	67,26	225,00	7,44	
G_δ	100	3,48	2,51E-04	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,08
					X^*_{final}	-	-	18,67	-	5,04	21,02	220,05	8,90
	80	3,24	6,06E-04	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,08
					X^*_{final}	-	-	18,79	-	5,03	19,61	220,62	8,91
	60	2,94	1,66E-03	5	α	-	-	-0,08	-	0,05	0,99	-0,08	-0,07
					X^*_{final}	-	-	18,92	-	5,03	17,99	221,27	8,92
	40	2,54	5,48E-03	5	α	-	-	-0,08	-	0,05	0,99	-0,07	-0,07
					X^*_{final}	-	-	19,08	-	5,03	16,06	222,05	8,94

Resultados para a viga escorada com $h_c = 11$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,69	1,39E-06	5	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	80	4,42	4,98E-06	5	X^*_{final}	223,06	-	19,72	7,07	5,04	27,52	225,00	10,85	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,06	
	60	4,09	2,13E-05	5	X^*_{final}	224,34	-	19,72	7,07	5,04	25,66	225,00	10,88	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,03	0,93	0,00	-0,05	
	40	3,69	1,10E-04	5	X^*_{final}	225,87	-	19,72	7,07	5,04	23,51	225,00	10,91	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,04	
	G_V	100	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	227,66	-	19,72	7,07	5,04	21,07	225,00	10,94
						α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
80		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
60		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
40		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
G_C		100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
						X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-
	80	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	40	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	

continua

continuação

G_A	100	7,31	1,35E-13	10	α	0,00	-0,09	-0,34	0,03	0,02	0,91	0,00	-0,21
					X^*_{final}	249,39	48,25	12,90	7,07	5,04	48,86	225,00	10,33
	80	8,38	0,00E+00	12	α	0,00	-0,10	-0,35	0,02	0,02	0,90	0,00	-0,22
					X^*_{final}	249,39	47,86	11,99	7,07	5,04	60,04	225,00	10,19
	60	9,86	0,00E+00	64	α	0,00	-0,15	-0,44	0,03	0,02	0,83	0,00	-0,30
					X^*_{final}	249,39	46,30	9,41	7,11	5,05	67,26	225,00	9,70
40	12,65	0,00E+00	100	α	0,00	-0,19	-0,48	0,03	0,02	0,78	0,00	-0,35	
				X^*_{final}	249,39	44,84	7,88	7,14	5,07	67,26	225,00	9,28	
G_δ	100	3,90	4,73E-05	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,09
					X^*_{final}	-	-	18,56	-	5,04	23,71	219,48	10,84
	80	3,64	1,36E-04	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,09
					X^*_{final}	-	-	18,68	-	5,04	22,03	220,11	10,86
	60	3,32	4,51E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X^*_{final}	-	-	18,83	-	5,03	20,10	220,83	10,88
	40	2,90	1,89E-03	5	α	-	-	-0,08	-	0,05	0,99	-0,07	-0,08
					X^*_{final}	-	-	19,00	-	5,03	17,79	221,68	10,90

Resultados para a viga escorada com $h_c = 12$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,85	6,19E-07	12	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,08	
	80	4,56	2,59E-06	5	X^*_{final}	222,24	-	19,72	7,07	5,04	28,71	225,00	11,82	
					α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	60	4,21	1,30E-05	5	X^*_{final}	223,67	-	19,72	7,07	5,04	26,62	225,00	11,85	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,05	
	40	3,78	7,89E-05	5	X^*_{final}	225,34	-	19,72	7,07	5,04	24,25	225,00	11,89	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,04	
	G_V	100	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	227,29	-	19,72	7,07	5,04	21,57	225,00	11,93
						α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
80		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
60		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
40		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
G_C	100	1,08	1,40E-01	4	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
	80	1,08	1,40E-01	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
	40	1,08	1,40E-01	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	

continua

continuação

G_A	100	7,72	5,66E-15	11	α	0,00	-0,09	-0,35	0,03	0,02	0,90	0,00	-0,22
					X*_{final}	249,39	48,20	12,43	7,07	5,04	52,69	225,00	11,19
	80	8,81	0,00E+00	37	α	0,00	-0,09	-0,35	0,02	0,02	0,91	0,00	-0,22
					X*_{final}	249,39	47,91	11,74	7,07	5,04	65,44	225,00	11,07
	60	10,35	0,00E+00	65	α	0,00	-0,16	-0,48	0,03	0,02	0,79	0,00	-0,34
					X*_{final}	249,39	45,86	8,53	7,12	5,06	67,26	225,00	10,32
40	13,13	0,00E+00	100	α	0,00	-0,12	-0,30	0,02	0,02	0,92	0,00	-0,24	
				X*_{final}	249,39	44,18	6,97	7,16	5,08	67,26	225,00	9,72	
G_δ	100	4,11	2,02E-05	4	α	-	-	-0,09	-	0,03	0,99	-0,08	-0,10
					X*_{final}	-	-	18,50	-	5,04	25,07	219,20	11,81
	80	3,83	6,32E-05	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,09
					X*_{final}	-	-	18,63	-	5,04	23,26	219,86	11,83
	60	3,50	2,32E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,09
					X*_{final}	-	-	18,78	-	5,04	21,17	220,61	11,85
	40	3,06	1,10E-03	4	α	-	-	-0,08	-	0,05	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,97	-	5,03	18,68	221,49	11,88

Resultados para a viga escorada com $f_c = 25$ MPa.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,58	2,32E-06	5	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	80	4,32	7,89E-06	5	X^*_{final}	223,57	-	24,65	7,07	5,04	26,78	225,00	9,87	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,06	
	60	4,00	3,13E-05	5	X^*_{final}	224,82	-	24,65	7,07	5,04	24,99	225,00	9,90	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05	
	40	3,62	1,46E-04	5	X^*_{final}	226,28	-	24,65	7,07	5,04	22,94	225,00	9,92	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,03	
	G_V	100	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
						X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
80		7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
60		7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
40	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-		
				X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-		
G_C	100	2,24	1,27E-02	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	268,98	-	17,71	-	-	-	-	-	
	80	2,24	1,27E-02	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	268,98	-	17,71	-	-	-	-	-	
	60	2,24	1,27E-02	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	268,98	-	17,71	-	-	-	-	-	
40	2,24	1,27E-02	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-		
				X^*_{final}	268,98	-	17,71	-	-	-	-	-		

continua

continuação

G_A	100	7,41	6,25E-14	10	α	0,00	-0,09	-0,35	0,03	0,02	0,91	0,00	-0,21
					X*_{final}	249,39	48,27	15,89	7,07	5,04	49,80	225,00	9,39
	80	8,50	0,00E+00	26	α	0,00	-0,10	-0,36	0,02	0,02	0,90	0,00	-0,21
					X*_{final}	249,39	47,90	14,79	7,07	5,04	61,37	225,00	9,28
	60	10,03	0,00E+00	55	α	0,00	-0,16	-0,47	0,03	0,02	0,82	0,00	-0,30
					X*_{final}	249,39	46,15	11,21	7,11	5,06	67,26	225,00	8,79
40	12,12	0,00E+00	86	α	0,00	-0,24	-0,55	0,04	0,03	0,68	0,00	-0,41	
				X*_{final}	249,39	43,28	8,06	7,18	5,09	67,26	225,00	8,03	
G₈	100	3,82	6,77E-05	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,09
					X*_{final}	-	-	23,27	-	5,04	23,15	219,77	9,87
	80	3,56	1,88E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,08	-0,08
					X*_{final}	-	-	23,42	-	5,04	21,52	220,37	9,88
	60	3,24	5,98E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	23,59	-	5,03	19,66	221,05	9,90
	40	2,82	2,39E-03	5	α	-	-	-0,07	-	0,05	0,99	-0,07	-0,07
					X*_{final}	-	-	23,80	-	5,03	17,42	221,86	9,92

Resultados para a viga escorada com $f_c = 30$ MPa.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,62	1,90E-06	5	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	80	4,35	6,92E-06	5	X^*_{final}	223,36	-	29,58	7,07	5,04	27,08	225,00	9,87	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,06	
	60	4,02	2,91E-05	5	X^*_{final}	224,68	-	29,58	7,07	5,04	25,18	225,00	9,90	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05	
	40	3,63	1,41E-04	5	X^*_{final}	226,20	-	29,58	7,07	5,04	23,06	225,00	9,92	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,03	
	G_V	100	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	227,94	-	29,58	7,07	5,04	20,70	225,00	9,95
						α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
80		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
60		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
40	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-		
				α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-		
G_C	100	3,18	7,31E-04	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
	80	3,18	7,31E-04	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
	60	3,18	7,31E-04	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
40	3,18	7,31E-04	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-		
				α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-		

continua

continuação

G_A	100	7,86	1,94E-15	16	α	0,00	-0,09	-0,36	0,03	0,02	0,90	0,00	-0,21
					X*_{final}	249,39	48,25	18,23	7,07	5,04	53,94	225,00	9,33
	80	8,96	0,00E+00	35	α	0,00	-0,09	-0,36	0,02	0,02	0,91	0,00	-0,21
					X*_{final}	249,39	47,98	17,25	7,07	5,03	67,26	225,00	9,25
	60	10,62	0,00E+00	54	α	0,00	-0,17	-0,51	0,03	0,02	0,77	0,00	-0,34
					X*_{final}	249,39	45,65	11,83	7,13	5,07	67,26	225,00	8,57
40	12,35	0,00E+00	85	α	0,00	-0,23	-0,57	0,04	0,03	0,67	0,00	-0,41	
				X*_{final}	249,39	43,43	9,15	7,18	5,09	67,26	225,00	7,97	
G₈	100	3,91	4,59E-05	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,09
					X*_{final}	-	-	27,93	-	5,04	23,79	219,80	9,87
	80	3,65	1,32E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	28,11	-	5,04	22,10	220,40	9,88
	60	3,32	4,43E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	28,32	-	5,03	20,15	221,07	9,90
	40	2,90	1,87E-03	5	α	-	-	-0,07	-	0,05	0,99	-0,06	-0,07
					X*_{final}	-	-	28,57	-	5,03	17,83	221,87	9,92

Resultados para a viga escorada com $f_c = 35$ MPa.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,65	1,64E-06	5	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	80	4,37	6,31E-06	5	X^*_{final}	223,21	-	34,50	7,07	5,04	27,29	225,00	9,87	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,06	
	60	4,03	2,76E-05	5	X^*_{final}	224,58	-	34,50	7,07	5,04	25,32	225,00	9,90	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05	
	40	3,64	1,38E-04	5	X^*_{final}	226,14	-	34,50	7,07	5,04	23,14	225,00	9,92	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,03	
	G_V	100	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	227,91	-	34,50	7,07	5,04	20,73	225,00	9,95
						α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
80		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
60		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
40		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
G_C		100	3,98	3,42E-05	4	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
						α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
	80	3,98	3,42E-05	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
	60	3,98	3,42E-05	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
	40	3,98	3,42E-05	4	X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
					α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	

continua

continuação

G_A	100	8,24	1,11E-16	16	α	0,00	-0,08	-0,38	0,03	0,02	0,90	0,00	-0,22
					X*_{final}	249,39	48,24	20,43	7,07	5,04	57,58	225,00	9,29
	80	9,36	0,00E+00	33	α	0,00	-0,11	-0,43	0,03	0,02	0,86	0,00	-0,25
					X*_{final}	249,39	47,52	17,61	7,09	5,04	66,11	225,00	9,05
	60	11,00	0,00E+00	100	α	0,00	-0,19	-0,59	0,04	0,03	0,68	0,00	-0,39
					X*_{final}	249,39	45,42	12,65	7,14	5,07	67,26	225,00	8,44
40	12,65	0,00E+00	87	α	0,00	-0,22	-0,58	0,04	0,03	0,66	0,00	-0,42	
				X*_{final}	249,39	43,44	10,06	7,19	5,09	67,26	225,00	7,88	
G_δ	100	3,99	3,32E-05	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,08	-0,09
					X*_{final}	-	-	32,60	-	5,04	24,33	219,84	9,86
	80	3,72	9,90E-05	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	32,81	-	5,04	22,58	220,43	9,88
	60	3,39	3,44E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	33,05	-	5,03	20,57	221,10	9,90
	40	2,96	1,52E-03	5	α	-	-	-0,07	-	0,05	0,99	-0,06	-0,07
					X*_{final}	-	-	33,33	-	5,03	18,17	221,89	9,92

Resultados para a viga escorada com $f_c = 40$ MPa.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,67	1,47E-06	5	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	80	4,38	5,88E-06	5	X^*_{final}	223,10	-	39,43	7,07	5,04	27,45	225,00	9,87	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,06	
	60	4,04	2,65E-05	5	X^*_{final}	224,51	-	39,43	7,07	5,04	25,42	225,00	9,90	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05	
	40	3,64	1,35E-04	5	X^*_{final}	226,10	-	39,43	7,07	5,04	23,19	225,00	9,92	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,03	
	G_V	100	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	227,89	-	39,43	7,07	5,04	20,76	225,00	9,95
						α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
80		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
60		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
40		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
G_C		100	4,67	1,48E-06	5	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
						X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-
	80	4,67	1,48E-06	5	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	60	4,67	1,48E-06	5	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	40	4,67	1,48E-06	5	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	

continua

continuação

G_A	100	8,58	0,00E+00	21	α	0,00	-0,08	-0,39	0,02	0,02	0,89	0,00	-0,22
					X*_{final}	249,39	48,21	22,43	7,07	5,04	60,62	225,00	9,23
	80	9,73	0,00E+00	53	α	0,00	-0,11	-0,46	0,03	0,02	0,84	0,00	-0,27
					X*_{final}	249,39	47,32	18,63	7,09	5,05	67,26	225,00	8,93
	60	11,66	0,00E+00	81	α	0,00	-0,18	-0,57	0,04	0,03	0,70	0,00	-0,38
					X*_{final}	249,39	44,92	12,91	7,16	5,08	67,26	225,00	8,22
40	12,95	0,00E+00	100	α	0,00	-0,18	-0,57	0,04	0,03	0,70	0,00	-0,38	
				X*_{final}	249,39	44,92	12,91	7,16	5,08	67,26	225,00	8,22	
G_δ	100	4,06	2,51E-05	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	37,28	-	5,04	24,80	219,88	9,86
	80	3,78	7,71E-05	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	37,51	-	5,04	22,99	220,46	9,88
	60	3,45	2,77E-04	4	α	-	-	-0,07	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	37,78	-	5,04	20,93	221,13	9,89
	40	3,02	1,27E-03	4	α	-	-	-0,07	-	0,05	0,99	-0,06	-0,07
					X*_{final}	-	-	38,11	-	5,03	18,46	221,91	9,92

Resultados para a viga escorada com 20% de carga permanente.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	3,17	7,67E-04	5	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,26	-	0,00	0,01	0,01	0,97	0,00	-0,05	
	80	2,99	1,39E-03	5	X^*_{final}	235,66	-	19,72	2,50	1,60	36,29	225,00	9,93	
					α	-0,26	-	0,00	0,01	0,01	0,97	0,00	-0,04	
	60	2,77	2,78E-03	5	X^*_{final}	236,37	-	19,72	2,50	1,60	34,51	225,00	9,95	
					α	-0,26	-	0,00	0,01	0,01	0,97	0,00	-0,04	
	40	2,50	6,16E-03	5	X^*_{final}	237,22	-	19,72	2,50	1,60	32,43	225,00	9,96	
					α	-0,26	-	0,00	0,01	0,01	0,96	0,00	-0,03	
					X^*_{final}	238,24	-	19,72	2,50	1,60	30,03	225,00	9,97	
					α	-0,26	-	0,00	0,01	0,01	0,96	0,00	-0,03	
G_V	100	5,70	6,07E-09	6	α	-0,28	-	-	0,01	0,00	0,96	-	-	
					X^*_{final}	223,15	-	-	2,50	1,60	70,87	-	-	
	80	5,70	6,07E-09	6	α	-0,28	-	-	0,01	0,00	0,96	-	-	
					X^*_{final}	223,15	-	-	2,50	1,60	70,87	-	-	
	60	5,70	6,07E-09	6	α	-0,28	-	-	0,01	0,00	0,96	-	-	
					X^*_{final}	223,15	-	-	2,50	1,60	70,87	-	-	
	40	5,70	6,07E-09	6	α	-0,28	-	-	0,01	0,00	0,96	-	-	
					X^*_{final}	223,15	-	-	2,50	1,60	70,87	-	-	
	G_C	100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
						X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-
80		1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
60		1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
40		1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	

G_A	100	5,07	1,95E-07	8	α	0,00	-0,07	-0,27	0,01	0,00	0,95	0,00	-0,15
					X^*_{final}	249,39	49,06	15,66	2,50	1,60	59,63	225,00	9,69
	80	5,92	1,63E-09	7	α	0,00	-0,07	-0,28	0,01	0,00	0,94	0,00	-0,16
					X^*_{final}	249,39	48,84	14,94	2,50	1,60	72,98	225,00	9,62
	60	7,06	8,03E-13	9	α	0,00	-0,08	-0,29	0,01	0,00	0,94	0,00	-0,17
					X^*_{final}	249,39	48,50	13,92	2,50	1,60	93,67	225,00	9,51
	40	8,81	0,00E+00	28	α	0,00	-0,11	-0,33	0,00	0,00	0,91	0,00	-0,21
					X^*_{final}	249,39	47,67	12,00	2,51	1,60	127,56	225,00	9,28
G_δ					$X^*_{inicial}$	250	50	20	-	2,7	10,8	225	10
	100	3,22	6,50E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,02	0,99	-0,07	-0,08
					X^*_{final}	-	-	18,86	-	2,71	24,81	220,97	9,90
	80	2,99	1,40E-03	4	α	-	-	-0,08	-	0,02	0,99	-0,07	-0,07
					X^*_{final}	-	-	18,96	-	2,71	23,24	221,44	9,91
	60	2,71	3,35E-03	4	α	-	-	-0,07	-	0,02	0,99	-0,07	-0,07
					X^*_{final}	-	-	19,07	-	2,71	21,45	221,98	9,93
	40	2,35	9,48E-03	5	α	-	-	-0,07	-	0,02	0,99	-0,06	-0,06
					X^*_{final}	-	-	19,20	-	2,71	19,30	222,61	9,94

Resultados para a viga escorada com 40% de carga permanente.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	3,72	9,98E-05	6	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,29	-	0,00	0,03	0,02	0,95	0,00	-0,06	
	80	3,52	2,19E-04	5	X^*_{final}	231,24	-	19,72	5,02	3,21	31,43	225,00	9,91	
					α	-0,29	-	0,00	0,03	0,02	0,95	0,00	-0,05	
	60	3,27	5,47E-04	5	X^*_{final}	-2,92	-	0,00	2,75	1,76	95,46	0,00	-0,05	
					α	-0,29	-	0,00	0,03	0,02	0,95	0,00	-0,04	
	40	2,96	1,56E-03	5	X^*_{final}	233,16	-	19,72	5,02	3,21	27,68	225,00	9,95	
					α	-0,30	-	0,00	0,03	0,02	0,95	0,00	-0,03	
	G_V	100	6,58	2,40E-11	6	X^*_{final}	234,42	-	19,72	5,02	3,21	25,36	225,00	9,97
						α	-0,31	-	-	0,02	0,01	0,95	-	-
80		6,58	2,40E-11	6	X^*_{final}	215,87	-	-	5,03	3,21	64,30	-	-	
					α	-0,31	-	-	0,02	0,01	0,95	-	-	
60		6,58	2,40E-11	6	X^*_{final}	215,87	-	-	5,03	3,21	64,30	-	-	
					α	-0,31	-	-	0,02	0,01	0,95	-	-	
40	6,58	2,40E-11	6	X^*_{final}	215,87	-	-	5,03	3,21	64,30	-	-		
				α	-0,31	-	-	0,02	0,01	0,95	-	-		
G_C	100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	80	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	40	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	

G_A	100	5,82	2,91E-09	7	α	0,00	-0,08	-0,30	0,02	0,01	0,94	0,00	-0,17
					X*_{final}	249,39	48,78	14,73	5,03	3,21	52,83	225,00	9,60
	80	6,76	6,81E-12	9	α	0,00	-0,09	-0,30	0,02	0,01	0,93	0,00	-0,18
					X*_{final}	249,39	48,50	13,93	5,03	3,21	65,13	225,00	9,51
	60	8,03	5,00E-16	15	α	0,00	-0,10	-0,32	0,01	0,01	0,92	0,00	-0,19
					X*_{final}	249,39	48,06	12,83	5,03	3,21	83,95	225,00	9,39
	40	10,06	0,00E+00	100	α	0,00	-0,18	-0,46	0,02	0,01	0,81	0,00	-0,31
					X*_{final}	249,39	45,68	9,07	5,05	3,22	97,33	225,00	8,75
G₈					X*_{inicial}	-	-	20	-	5,4	8,1	225	10
	100	3,80	7,26E-05	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,09	-0,09
					X*_{final}	-	-	18,56	-	5,44	21,92	219,48	9,87
	80	3,54	2,00E-04	4	α	-	-	-0,09	-	0,05	0,99	-0,08	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,69	-	5,44	20,38	220,11	9,88
	60	3,22	6,35E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,05	0,99	-0,08	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,83	-	5,44	18,62	220,83	9,90
	40	2,80	2,52E-03	5	α	-	-	-0,08	-	0,05	0,99	-0,07	-0,07
X*_{final}					-	-	19,01	-	5,44	16,50	221,68	9,92	

Resultados para a viga escorada com 60% de carga permanente.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,60	2,13E-06	5	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,03	0,93	0,00	-0,07	
	80	4,35	6,73E-06	5	X^*_{final}	223,06	-	19,72	7,07	5,34	25,88	225,00	9,87	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,06	
	60	4,05	2,56E-05	5	X^*_{final}	224,23	-	19,72	7,07	5,34	24,26	225,00	9,90	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05	
	40	3,68	1,18E-04	5	X^*_{final}	225,64	-	19,72	7,07	5,34	22,35	225,00	9,92	
					α	-0,36	-	0,00	0,06	0,04	0,93	0,00	-0,04	
	G_V	100	7,97	7,77E-16	8	X^*_{final}	227,31	-	19,72	7,07	5,34	20,16	225,00	9,95
						α	-0,37	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
80		7,97	7,77E-16	8	X^*_{final}	203,16	-	-	7,08	5,34	55,84	-	-	
					α	-0,37	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
60		7,97	7,77E-16	8	X^*_{final}	203,16	-	-	7,08	5,34	55,84	-	-	
					α	-0,37	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
40	7,97	7,77E-16	8	X^*_{final}	203,16	-	-	7,08	5,34	55,84	-	-		
				α	-0,37	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-		
G_C	100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	80	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	40	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	

G_A	100	6,98	1,49E-12	9	α	0,00	-0,10	-0,34	0,03	0,02	0,91	0,00	-0,20
					X*_{final}	249,39	48,24	13,26	7,07	5,34	44,23	225,00	9,44
	80	8,06	3,89E-16	19	α	0,00	-0,11	-0,34	0,03	0,02	0,91	0,00	-0,21
					X*_{final}	249,39	47,86	12,38	7,08	5,34	54,95	225,00	9,33
	60	9,51	0,00E+00	56	α	0,00	-0,15	-0,41	0,03	0,02	0,86	0,00	-0,27
					X*_{final}	249,39	46,57	10,18	7,10	5,36	64,89	225,00	8,98
	40	12,21	0,00E+00	68	α	0,00	-0,27	-0,54	0,05	0,03	0,68	0,00	-0,43
					X*_{final}	249,39	42,44	6,52	7,19	5,41	64,89	225,00	7,92
G₈					X*_{inicial}	-	-	20	-	8,1	5,4	225	900
	100	4,75	1,00E-06	5	α	-	-	-0,12	-	0,08	0,98	-0,11	-0,11
					X*_{final}	-	-	17,98	-	8,25	18,81	216,47	9,80
	80	4,44	4,46E-06	5	α	-	-	-0,11	-	0,08	0,98	-0,10	-0,10
					X*_{final}	-	-	18,16	-	8,25	17,33	217,44	9,82
	60	4,06	2,45E-05	5	α	-	-	-0,10	-	0,09	0,98	-0,09	-0,10
					X*_{final}	-	-	18,37	-	8,25	15,63	218,53	9,84
	40	3,56	1,88E-04	5	α	-	-	-0,09	-	0,10	0,98	-0,09	-0,09
X*_{final}					-	-	18,63	-	8,25	13,58	219,82	9,87	

Resultados para a viga escorada com 80% de carga permanente.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	6,36	1,03E-10	7	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,47	-	0,00	0,09	0,07	0,87	0,00	-0,09	
	80	6,02	8,96E-10	6	X^*_{final}	202,76	-	19,72	9,25	7,57	18,07	225,00	9,76	
					α	-0,47	-	0,00	0,09	0,07	0,87	0,00	-0,08	
	60	5,60	1,08E-08	6	X^*_{final}	204,56	-	19,72	9,25	7,57	16,68	225,00	9,81	
					α	-0,48	-	0,00	0,10	0,08	0,87	0,00	-0,07	
	40	5,09	1,84E-07	6	X^*_{final}	206,74	-	19,72	9,24	7,56	15,06	225,00	9,85	
					α	-0,49	-	0,00	0,11	0,09	0,86	0,00	-0,05	
	G_V	100	11,18	0,00E+00	14	α	-0,67	-	-	0,09	0,07	0,73	-	-
						X^*_{final}	147,56	-	-	9,44	7,70	32,44	-	-
80		11,18	0,00E+00	14	α	-0,67	-	-	0,09	0,07	0,73	-	-	
					X^*_{final}	147,56	-	-	9,44	7,70	32,44	-	-	
60		11,18	0,00E+00	14	α	-0,67	-	-	0,09	0,07	0,73	-	-	
					X^*_{final}	147,56	-	-	9,44	7,70	32,44	-	-	
40	11,18	0,00E+00	14	α	-0,67	-	-	0,09	0,07	0,73	-	-		
				X^*_{final}	147,56	-	-	9,44	7,70	32,44	-	-		
G_C	100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	80	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	40	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	

G_A	100	9,19	0,00E+00	80	α	0,00	-0,13	-0,38	0,05	0,04	0,88	0,00	-0,24
					X*_{final}	249,39	47,10	10,98	9,22	7,55	32,44	225,00	9,12
	80	10,49	0,00E+00	65	α	0,00	-0,20	-0,48	0,07	0,06	0,78	0,00	-0,34
					X*_{final}	249,39	45,02	8,40	9,35	7,64	32,44	225,00	8,59
	60	12,55	0,00E+00	100	α	0,00	-0,28	-0,54	0,09	0,08	0,65	0,00	-0,44
					X*_{final}	249,39	42,03	6,30	9,52	7,75	32,44	225,00	7,81
	40	13,82	0,00E+00	100	α	0,00	-0,27	-0,51	0,09	0,07	0,69	0,00	-0,43
					X*_{final}	249,39	41,30	5,93	9,56	7,78	32,44	225,00	7,62
G₈					X*inicial	-	-	20	-	10,8	2,7	225	10
	100	6,77	6,28E-12	7	α	-	-	-0,16	-	0,15	0,95	-0,16	-0,15
					X*_{final}	-	-	16,37	-	11,34	14,80	207,02	9,60
	80	6,36	1,04E-10	7	α	-	-	-0,16	-	0,16	0,95	-0,15	-0,14
					X*_{final}	-	-	16,69	-	11,34	13,50	209,08	9,64
	60	5,84	2,63E-09	7	α	-	-	-0,15	-	0,17	0,96	-0,14	-0,13
					X*_{final}	-	-	17,07	-	11,34	11,99	211,38	9,69
	40	5,15	1,30E-07	5	α	-	-	-0,13	-	0,19	0,96	-0,13	-0,12
				X*_{final}	-	-	17,54	-	11,33	10,12	214,06	9,74	

Resultados para a viga escorada com $b = 175$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,42	4,88E-06	6	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	80	4,21	1,28E-05	4	X^*_{final}	224,35	-	19,72	7,07	5,04	25,67	175,00	9,87	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,06	
	60	3,94	4,11E-05	5	X^*_{final}	225,33	-	19,72	7,07	5,04	24,26	175,00	9,90	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05	
	40	3,59	1,65E-04	5	X^*_{final}	226,58	-	19,72	7,07	5,04	22,54	175,00	9,92	
					α	-0,36	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,03	
	G_V	100	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	228,12	-	19,72	7,07	5,04	20,46	175,00	9,95
						α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
80		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
60		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
40		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
G_C		100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
						X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-
	80	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	40	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	

G_A	100	6,72	9,31E-12	7	α	0,00	-0,10	-0,33	0,03	0,02	0,92	0,00	-0,20
					X*_{final}	249,39	48,35	13,52	7,07	5,04	43,45	175,00	9,46
	80	7,77	3,94E-15	10	α	0,00	-0,10	-0,34	0,03	0,02	0,91	0,00	-0,21
					X*_{final}	249,39	47,99	12,67	7,07	5,04	53,95	175,00	9,36
	60	9,16	0,00E+00	33	α	0,00	-0,12	-0,37	0,03	0,02	0,89	0,00	-0,24
					X*_{final}	249,39	47,19	11,13	7,08	5,04	67,26	175,00	9,13
40	11,34	0,00E+00	100	α	0,00	-0,22	-0,48	0,04	0,03	0,76	0,00	-0,37	
				X*_{final}	249,39	43,74	7,33	7,16	5,08	67,26	175,00	8,21	
G₈	100	3,41	3,22E-04	4	α	-	-	-0,10	-	0,04	0,99	-0,09	-0,09
					X*_{final}	-	-	18,63	-	5,03	20,59	170,99	9,88
	80	3,17	7,57E-04	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,09	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,75	-	5,03	19,23	171,46	9,90
	60	2,88	2,00E-03	5	α	-	-	-0,09	-	0,05	0,99	-0,08	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,89	-	5,03	17,67	171,99	9,91
	40	2,49	6,39E-03	5	α	-	-	-0,08	-	0,05	0,99	-0,07	-0,07
					X*_{final}	-	-	19,06	-	5,03	15,79	172,61	9,93

Resultados para a viga escorada com $b = 200$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,48	3,82E-06	5	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	80	4,25	1,09E-05	5	X^*_{final}	224,09	-	19,72	7,07	5,04	26,04	200,00	9,87	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,06	
	60	3,96	3,76E-05	5	X^*_{final}	225,16	-	19,72	7,07	5,04	24,51	200,00	9,90	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05	
	40	3,60	1,58E-04	5	X^*_{final}	226,48	-	19,72	7,07	5,04	22,67	200,00	9,92	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,03	
	G_V	100	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	228,07	-	19,72	7,07	5,04	20,53	200,00	9,95
						α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
80		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
60		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
40		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
G_C		100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
						X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-
	80	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	40	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	

G_A	100	6,80	5,09E-12	9	α	0,00	-0,10	-0,33	0,03	0,02	0,92	0,00	-0,20
					X*_{final}	249,39	48,32	13,45	7,07	5,04	44,30	200,00	9,46
	80	7,87	1,83E-15	10	α	0,00	-0,10	-0,34	0,03	0,02	0,91	0,00	-0,21
					X*_{final}	249,39	47,95	12,59	7,07	5,04	55,00	200,00	9,35
	60	9,27	0,00E+00	49	α	0,00	-0,13	-0,39	0,03	0,02	0,88	0,00	-0,25
					X*_{final}	249,39	46,98	10,79	7,09	5,04	67,26	200,00	9,08
40	11,77	0,00E+00	44	α	0,00	-0,25	-0,53	0,04	0,03	0,70	0,00	-0,41	
				X*_{final}	249,39	43,10	6,93	7,18	5,09	67,26	200,00	8,07	
G₈	100	3,57	1,82E-04	4	α	-	-	-0,10	-	0,04	0,99	-0,09	-0,09
					X*_{final}	-	-	18,62	-	5,04	21,53	195,36	9,88
	80	3,32	4,53E-04	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,74	-	5,03	20,07	195,90	9,89
	60	3,02	1,28E-03	4	α	-	-	-0,09	-	0,05	0,99	-0,08	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,88	-	5,03	18,40	196,51	9,91
	40	2,62	4,45E-03	5	α	-	-	-0,08	-	0,05	0,99	-0,07	-0,07
					X*_{final}	-	-	19,05	-	5,03	16,39	197,23	9,93

Resultados para a viga escorada com $b = 250$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,55	2,71E-06	5	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	80	4,30	8,70E-06	5	X^*_{final}	223,72	-	19,72	7,07	5,04	26,55	250,00	9,87	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,06	
	60	3,99	3,31E-05	5	X^*_{final}	224,92	-	19,72	7,07	5,04	24,84	250,00	9,90	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05	
	40	3,62	1,50E-04	5	X^*_{final}	226,34	-	19,72	7,07	5,04	22,86	250,00	9,92	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,03	
	G_V	100	7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	228,01	-	19,72	7,07	5,04	20,61	250,00	9,95
						α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
80		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
60		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
40		7,84	2,22E-15	6	X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
					α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
G_C		100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
						X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-
	80	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	40	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	

G_A	100	6,93	2,17E-12	9	α	0,00	-0,10	-0,33	0,03	0,02	0,92	0,00	-0,20
					X*_{final}	249,39	48,28	13,35	7,07	5,04	45,48	250,00	9,45
	80	8,00	6,11E-16	11	α	0,00	-0,10	-0,34	0,03	0,02	0,91	0,00	-0,21
					X*_{final}	249,39	47,90	12,47	7,07	5,04	56,48	250,00	9,34
	60	9,45	0,00E+00	77	α	0,00	-0,14	-0,41	0,03	0,02	0,86	0,00	-0,26
					X*_{final}	249,39	46,67	10,31	7,09	5,05	67,26	250,00	9,01
40	12,21	0,00E+00	71	α	0,00	-0,27	-0,54	0,04	0,03	0,67	0,00	-0,42	
				X*_{final}	249,39	42,40	6,48	7,19	5,10	67,26	250,00	7,94	
G_δ	100	3,81	6,96E-05	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,09
					X*_{final}	-	-	18,62	-	5,04	23,11	244,19	9,87
	80	3,55	1,92E-04	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,74	-	5,04	21,48	244,86	9,88
	60	3,23	6,11E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,88	-	5,03	19,62	245,61	9,90
40	2,82	2,43E-03	5	α	-	-	-0,07	-	0,05	0,99	-0,07	-0,07	
				X*_{final}	-	-	19,04	-	5,03	17,39	246,51	9,92	

Resultados para a viga escorada com $b = 275$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
G_M	100	4,57	2,39E-06	19	$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,34	-	0,00	0,04	0,03	0,94	0,00	-0,07	
	80	4,31	8,03E-06	5	X^*_{final}	223,60	-	19,72	7,07	5,04	26,73	275,00	9,87	
					α	-0,34	-	0,00	0,05	0,03	0,94	0,00	-0,06	
	60	4,00	3,16E-05	5	X^*_{final}	224,84	-	19,72	7,07	5,04	24,96	275,00	9,90	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,05	
	40	3,62	1,47E-04	5	X^*_{final}	226,29	-	19,72	7,07	5,04	22,93	275,00	9,92	
					α	-0,35	-	0,00	0,05	0,04	0,93	0,00	-0,03	
	G_V	100	7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-
						X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-
80		7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
60		7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
40		7,84	2,22E-15	6	α	-0,36	-	-	0,03	0,02	0,93	-	-	
					X^*_{final}	204,40	-	-	7,07	5,04	56,57	-	-	
G_C		100	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-
						X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-
	80	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	60	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	
	40	1,08	1,40E-01	4	α	0,48	-	-0,88	-	-	-	-	-	
					X^*_{final}	258,66	-	16,81	-	-	-	-	-	

G_A	100	6,97	1,59E-12	9	α	0,00	-0,10	-0,33	0,03	0,02	0,92	0,00	-0,20
					X*_{final}	249,39	48,27	13,31	7,07	5,04	45,92	275,00	9,45
	80	8,05	3,89E-16	12	α	0,00	-0,10	-0,34	0,03	0,02	0,91	0,00	-0,20
					X*_{final}	249,39	47,88	12,43	7,07	5,04	57,02	275,00	9,34
	60	9,52	0,00E+00	58	α	0,00	-0,15	-0,41	0,03	0,02	0,86	0,00	-0,27
					X*_{final}	249,39	46,55	10,13	7,10	5,05	67,26	275,00	8,99
40	12,46	0,00E+00	100	α	0,00	-0,11	-0,25	0,02	0,01	0,94	0,00	-0,18	
				X*_{final}	249,39	43,90	7,36	7,16	5,08	67,26	275,00	8,34	
G₈	100	3,91	4,63E-05	4	α	-	-	-0,09	-	0,04	0,99	-0,08	-0,09
					X*_{final}	-	-	18,62	-	5,04	23,78	268,64	9,87
	80	3,65	1,34E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,74	-	5,04	22,08	269,37	9,88
	60	3,32	4,46E-04	4	α	-	-	-0,08	-	0,04	0,99	-0,07	-0,08
					X*_{final}	-	-	18,88	-	5,03	20,14	270,20	9,90
40	2,90	1,88E-03	5	α	-	-	-0,07	-	0,05	0,99	-0,06	-0,07	
				X*_{final}	-	-	19,04	-	5,03	17,82	271,17	9,92	

Resultados para a viga escorada considerando $\rho_{q,fy} = 0,15$.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável							
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10
G_M	100	4,743	1,05E-06	6	α	-0,341	-	0,000	0,043	0,031	0,936	0,000	-0,070
					X^*_{final}	232,891	-	19,717	7,075	5,038	27,740	225,000	9,861
G_V	100	8,290	5,55E-17	11	α	-0,369	-	-	0,025	0,018	0,929	-	-
					X^*_{final}	217,267	-	-	7,078	5,040	60,884	-	-
G_C	100	1,079	1,40E-01	4	α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-
					X^*_{final}	258,655	-	16,811	-	-	-	-	-
G_A	100	6,834	6,83E+00	9	α	0,000	-0,097	-0,333	0,030	0,022	0,916	0,000	-0,199
					X^*_{final}	266,845	48,310	13,427	7,072	5,037	44,587	225,000	9,456
G_{δ}	100	3,696	1,09E-04	4	α	-	-	-0,092	-	0,038	0,988	-0,084	-0,086
					X^*_{final}	-	-	18,615	-	5,035	22,361	219,763	9,873

Resultados para a viga escorada considerando $\rho_{q,fy} = 0,4$.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável							
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10
G_M	100	5,206	9,63E-08	7	α	-0,340	-	0,000	0,039	0,028	0,937	0,000	-0,070
					X^*_{final}	254,192	-	19,717	7,084	5,043	31,052	225,000	9,830
G_V	100	9,322	0,00E+00	25	α	-0,437	-	-	0,028	0,020	0,899	-	-
					X^*_{final}	236,393	-	-	7,109	5,056	67,263	-	-
G_C	100	1,079	1,40E-01	4	α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-
					X^*_{final}	258,655	-	16,811	-	-	-	-	-
G_A	100	6,766	6,62E-12	9	α	0,000	-0,097	-0,333	0,030	0,022	0,916	0,000	-0,200
					X^*_{final}	297,994	48,331	13,483	7,072	5,037	43,932	225,000	9,459
G_δ	100	3,696	1,09E-04	4	α	-	-	-0,092	-	0,038	0,988	-0,084	-0,086
					X^*_{final}	-	-	18,615	-	5,035	22,361	219,763	9,873

Resultados para a viga escorada considerando os fatores de segurança.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Variável								
					Parâmetros	f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					X^* inicial	250	50	20	7	5	8,5	225	10
G_M	100	1,9210489	0,0273628	5	α	-0,418071581	-	0	0,0812778	0,0580556	0,8986967	0	-0,0870852
					X^* final	235,7786701	-	19,717117	7,0546084	5,0278614	12,75594	225	9,933114
	80	1,662245	0,0482318	5	α	-0,436809783	-	0	0,088073	0,0629093	0,8897877	0	-0,0758992
					X^* final	237,048367	-	19,717117	7,0512225	5,0261339	11,900914	225	9,9495456
	60	1,3113247	0,094874	4	α	-0,46437439	-	0	0,0980213	0,0700152	0,8750805	0	-0,0638767
					X^* final	239,0029918	-	19,717117	7,0449617	5,0229397	10,872099	225	9,9665211
40	0,8365727	0,2014164	4	α	-0,503737842	-	0	0,1123627	0,080259	0,8513138	0	-0,0494577	
				X^* final	242,1495433	-	19,717117	7,032901	5,0167862	9,7005824	225	9,9834509	
G_V	100	5,4256051	2,888E-08	5	α	-0,335707735	-	-	0,0350804	0,0250574	0,9409792	-	-
					X^* final	219,573163	-	-	7,0667467	5,0340544	33,418996	-	-
	80	5,4256051	2,888E-08	5	α	-0,335707735	-	-	0,0350804	0,0250574	0,9409792	-	-
					X^* final	219,573163	-	-	7,0667467	5,0340544	33,418996	-	-
	60	5,4256051	2,888E-08	5	α	-0,335707735	-	-	0,0350804	0,0250574	0,9409792	-	-
					X^* final	219,573163	-	-	7,0667467	5,0340544	33,418996	-	-
40	5,4256051	2,888E-08	5	α	-0,335707735	-	-	0,0350804	0,0250574	0,9409792	-	-	
				X^* final	219,573163	-	-	7,0667467	5,0340544	33,418996	-	-	
G_C	100	0,1953073	0,4225762	3	α	0,483457066	-	-0,8753681	-	-	-	-	-
					X^* final	251,0408789	-	19,156196	-	-	-	-	-
	80	0,1953073	0,4225762	3	α	0,483457066	-	-0,8753681	-	-	-	-	-
					X^* final	251,0408789	-	19,156196	-	-	-	-	-
60	0,1953073	0,4225762	3	α	0,483457066	-	-0,8753681	-	-	-	-	-	

					\mathbf{X}^*_{final}	251,0408789	-	19,156196	-	-	-	-	-
	40	0,1953073	0,4225762	3	α	0,483457066	-	-0,8753681	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	251,0408789	-	19,156196	-	-	-	-	-
\mathbf{G}_A	100	3,7599918	8,496E-05	8	α	0	-0,1000466	-0,3223096	0,0488437	0,0348884	0,9198997	0	-0,1904964
					\mathbf{X}^*_{final}	249,3897418	49,007744	16,07075	7,0642806	5,0327962	21,151121	225	9,713535
	80	4,796936	8,056E-07	9	α	0	-0,099233	-0,309295	0,0392765	0,0280547	0,9262083	0	-0,1851969
					\mathbf{X}^*_{final}	249,3897418	48,763773	15,348136	7,0659419	5,0336438	27,964326	225	9,644609
	60	6,117387	4,756E-10	7	α	1,63087E-12	-0,1033215	-0,3070152	0,0313096	0,022364	0,9265198	0	-0,1874751
					\mathbf{X}^*_{final}	249,3897418	48,384734	14,358454	7,0670518	5,0342101	38,5985	225	9,5411654
	40	8,0319726	4,996E-16	14	α	-1,22808E-12	-0,115017	-0,3157209	0,0241374	0,017241	0,919968	0	-0,1996758
					\mathbf{X}^*_{final}	249,3897418	47,685051	12,851209	7,0678417	5,0346131	57,639516	225	9,3585069
\mathbf{G}_δ	100	7,2113476	2,77E-13	6	α	-	-	-0,1225156	-	0,0513205	0,9778834	-0,1161916	-0,1122487
					\mathbf{X}^*_{final}	-	-	16,98489	-	5,0925026	53,529448	210,84835	9,6762007
	80	6,8932453	2,727E-12	6	α	-	-	-0,1146571	-	0,0535964	0,98043	-0,1079216	-0,1053139
					\mathbf{X}^*_{final}	-	-	17,254627	-	5,0923646	50,105065	212,44469	9,7096251
	60	6,5096792	3,766E-11	6	α	-	-	-0,1051177	-	0,056626	0,9832291	-0,0981224	-0,096831
					\mathbf{X}^*_{final}	-	-	17,566343	-	5,0921558	46,117851	214,21996	9,7478684
	40	6,0178964	8,835E-10	6	α	-	-	-0,0927152	-	0,0610376	0,9864005	-0,0857149	-0,0857048
					\mathbf{X}^*_{final}	-	-	17,944964	-	5,0918297	41,252276	216,29479	9,7936983

APÊNDICE II - VIGA NÃO ESCORADA

A seguir são apresentadas as tabelas com os dados referentes aos resultados apresentados para a viga não escorada.

Resultados para a viga não escorada com os dados originais.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					$X^*_{inicial}$	290	50	20	6,8	1,5	4,5	6,3	225	12
G_M	100	5,5785	1,21E-08	15	α	-0,360985	-	0	0,0479481	-	0,0317304	0,9264144	0	-0,090223
					X^*_{final}	251,30778	-	19,717117	6,890844	-	4,5397835	25,179863	225	11,758465
	80	5,239	8,07E-08	30	α	-0,361966	-	0	0,0508427	-	0,0336459	0,9269892	0	-0,077167
					X^*_{final}	253,37867	-	19,717117	6,8904817	-	4,5396249	23,190754	225	11,805991
	60	4,8311	6,79E-07	5	α	-0,364555	-	0	0,0547947	-	0,0362612	0,9267243	0	-0,062967
					X^*_{final}	255,78747	-	19,717117	6,889884	-	4,5393631	20,924446	225	11,854036
	40	4,3356	7,27E-06	5	α	-0,370412	-	0	0,060463	-	0,0400123	0,9248489	0	-0,046823
					X^*_{final}	258,56676	-	19,717117	6,889147	-	4,5390404	18,364445	225	11,902553
G_V	100	7,7615	4,22E-15	7	α	-0,376446	-	-	0,0350176	-	0,0231734	0,9254866	-	-
					X^*_{final}	235,84556	-	-	6,8923441	-	4,5404405	40,84606	-	-
	80	7,7615	4,22E-15	7	α	-0,376446	-	-	0,0350176	-	0,0231734	0,9254866	-	-
					X^*_{final}	235,84556	-	-	6,8923441	-	4,5404405	40,84606	-	-
	60	7,7615	4,22E-15	7	α	-0,376446	-	-	0,0350176	-	0,0231734	0,9254866	-	-
					X^*_{final}	235,84556	-	-	6,8923441	-	4,5404405	40,84606	-	-
	40	7,7615	4,22E-15	7	α	-0,376446	-	-	0,0350176	-	0,0231734	0,9254866	-	-
					X^*_{final}	235,84556	-	-	6,8923441	-	4,5404405	40,84606	-	-

					\mathbf{X}^*_{final}	235,84556	-	-	6,8923441	-	4,5404405	40,84606	-	-
\mathbf{G}_C	100	1,0491	1,47E-01	4	α	0,4834582	-	-0,875367	-	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	299,73449	-	16,885941	-	-	-	-	-	
	80	1,0491	1,47E-01	4	α	0,4834582	-	-0,875367	-	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	299,73449	-	16,885941	-	-	-	-	-	
	60	1,0491	1,47E-01	4	α	0,4834582	-	-0,875367	-	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	299,73449	-	16,885941	-	-	-	-	-	
	40	1,0491	1,47E-01	4	α	0,4834582	-	-0,875367	-	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	299,73449	-	16,885941	-	-	-	-	-	
\mathbf{G}_A	100	8,4794	0,00E+00	100	α	0	-0,100302	-0,366873	0,0320458	-	0,0212068	0,8917014	0	-0,242355
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	47,859256	11,662009	6,8924205	-	4,5404739	44,327715	225	11,013409
	80	9,6013	0,00E+00	76	α	0	-0,128783	-0,418965	0,0348656	-	0,0230728	0,8488803	0	-0,292469
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	46,946245	9,9995359	6,9137855	-	4,5498304	49,853582	225	10,652353
	60	11,228	0,00E+00	100	α	0	-0,193379	-0,500873	0,0453784	-	0,0300298	0,7426993	0	-0,396443
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	44,714785	7,4616295	6,9757222	-	4,5769545	49,853582	225	9,82865
	40	12,996	0,00E+00	98	α	0	-0,246647	-0,536744	0,0535888	-	0,0354632	0,6388091	0	-0,488738
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	42,599184	6,1296581	7,034968	-	4,6029001	49,853582	225	8,9747087
\mathbf{G}_{MC}	100	8,2483	5,55E-17	8	α	-0,479173	-	-	0,1383692	0,8667451	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	219,45167	-	-	7,1880399	9,6528117	-	-	-	-
	80	8,2483	5,55E-17	8	α	-0,479173	-	-	0,1383692	0,8667451	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	219,45167	-	-	7,1880399	9,6528117	-	-	-	-
	60	8,2483	5,55E-17	8	α	-0,479173	-	-	0,1383692	0,8667451	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	219,45167	-	-	7,1880399	9,6528117	-	-	-	-
	40	8,2483	5,55E-17	8	α	-0,479173	-	-	0,1383692	0,8667451	-	-	-	-

					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	219,45167	-	-	7,1880399	9,6528117	-	-	-	-
\mathbf{G}_0	100	4,582	2,30E-06	5	α	-	-	-0,080004	-	-	0,0382715	0,9889896	-0,07293	-0,093357
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	-	-	18,534062	-	-	4,5394564	21,238039	219,36049	11,794675
	80	4,3317	7,40E-06	4	α	-	-	-0,075395	-	-	0,040298	0,9900656	-0,068533	-0,08812
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	-	-	18,659261	-	-	4,539206	19,860185	219,98506	11,81678
	60	4,0289	2,80E-05	4	α	-	-	-0,069788	-	-	0,0430412	0,9912624	-0,063231	-0,081718
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	-	-	18,803104	-	-	4,5390146	18,281005	220,69885	11,841975
	40	3,6385	1,37E-04	4	α	-	-	-0,062475	-	-	0,0471512	0,9926322	-0,056391	-0,073315
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	-	-	18,974816	-	-	4,5385772	16,386752	221,5361	11,871955

Resultados para a viga não escorada com $h_c = 8$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					\mathbf{X}^* inicial	290	50	20	6,8	1,5	4,5	6,3	225	8
G_M	100	4,7715	9,14E-07	6	α	-0,364876	-	0	0,0554226	-	0,0366767	0,9259737	0	-0,070861
					\mathbf{X}^* final	256,13392	-	19,717117	6,8899052	-	4,5393724	20,586438	225	7,8917903
G_V	100	7,7615	4,22E-15	7	α	-0,376446	-	-	0,0350176	-	0,0231734	0,9254866	-	-
					\mathbf{X}^* final	235,84556	-	-	6,8923441	-	4,5404405	40,84606	-	-
G_C	100	1,0491	1,47E-01	4	α	0,4834582	-	-0,875367	-	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^* final	299,73449	-	16,885941	-	-	-	-	-	-
G_A	100	6,5376	3,13E-11	8	α	0	-0,11486	-0,32273	0,0412619	-	0,0273057	0,9177255	0	-0,194896
					\mathbf{X}^* final	289,2921	48,09848	13,807822	6,8917152	-	4,5401651	31,052218	225	7,5922093
G_{MC}	100	8,2483	5,55E-17	8	α	-0,479173	-	-	0,1383692	0,8667451	-	-	-	-
					\mathbf{X}^* final	219,45167	-	-	7,1880399	9,6528117	-	-	-	-
G_δ	100	3,7854	7,67E-05	4	α	-	-	-0,077645	-	-	0,0455159	0,9910895	-0,070414	-0,068432
					\mathbf{X}^* final	-	-	18,762655	-	-	4,5387646	17,060721	220,49962	7,9171031

Resultados para a viga não escorada com $h_c = 9$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					$X^*_{inicial}$	290	50	20	6,8	1,5	4,5	6,3	225	9
G_M	100	4,9867988	3,07E-07	20	α	0,3631654	-	0	0,0532194	-	0,0352187	0,92641	0	0,0761757
					X^*_{final}	254,88448	-	19,717117	6,890231	-	4,5395151	21,755309	225	8,8632355
G_V	100	7,7614801	4,22E-15	7	α	0,3764457	-	-	0,0350176	-	0,0231734	0,9254866	-	-
					X^*_{final}	235,84556	-	-	6,8923441	-	4,5404405	40,84606	-	-
G_C	100	1,0490845	1,47E-01	4	α	0,4834582	-	-	-	-	-	-	-	-
					X^*_{final}	299,73449	-	16,885941	-	-	-	-	-	-
G_A	100	7,0666553	7,94E-13	9	α	1,014E-12	0,1100514	0,3355122	0,0382939	-	0,0253415	0,9111228	0	0,2075255
					X^*_{final}	289,2921	48,034237	13,21586	6,8920143	-	4,5402961	34,491257	225	8,4721219
G_{MC}	100	8,2482575	5,55E-17	8	α	-	-	-	0,1383692	0,8667451	-	-	-	-
					X^*_{final}	0,4791731	-	-	7,1880399	9,6528117	-	-	-	-
G_δ	100	3,9928502	3,26E-05	4	α	-	-	0,0780435	-	-	0,0433892	0,990704	0,0708639	0,0742329
					X^*_{final}	-	-	18,706682	-	-	4,5389823	18,084932	220,22231	8,8932965

Resultados para a viga não escorada com $h_c = 10$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	N° de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					X^* inicial	290	50	20	6,8	1,5	4,5	6,3	225	10
G_M	100	5,1921154	1,04E-07	24	α	0,3620351	-	0	0,0512659	-	0,0339259	0,9265887	0	-0,081147
					X^* final	253,67871	-	19,717117	6,8903845	-	4,5395823	22,910513	225	9,8315335
G_V	100	7,7614801	4,22E-15	7	α	0,3764457	-	-	0,0350176	-	0,0231734	0,9254866	-	-
					X^* final	235,84556	-	-	6,8923441	-	4,5404405	40,84606	-	-
G_C	100	1,0490845	1,47E-01	4	α	0,4834582	-	0,8753675	-	-	-	-	-	-
					X^* final	299,73449	-	16,885941	-	-	-	-	-	-
G_A	100	7,564307	1,95E-14	10	α	0	-0,106218	0,3470746	0,0358681	-	0,0237362	0,904516	0	0,2196766
					X^* final	289,2921	47,972499	12,657085	6,8922373	-	4,5403937	37,847325	225	9,335256
G_{MC}	100	8,2482575	5,55E-17	8	α	0,4791731	-	-	0,1383692	0,8667451	-	-	-	-
					X^* final	219,45167	-	-	7,1880399	9,6528117	-	-	-	-
G_δ	100	4,1936151	1,37E-05	4	α	-	-	-0,078531	-	-	0,0415047	0,9902337	0,0713971	0,0803114
					X^* final	-	-	18,650747	-	-	4,539134	19,119316	219,94312	9,8652852

Resultados para a viga não escorada com $h_c = 11$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
G_M	100	5,39	3,53E-08	7	X^* inicial	290	50	20	6,8	1,5	4,5	6,3	225	11
					α	-0,361	-	0,000	0,050	-	0,033	0,927	0,000	-0,086
					X^* final	252,468	-	19,717	6,891	-	4,540	24,052	225,000	10,796
G_V	100	7,76	4,22E-15	7	α	-0,376	-	-	0,035	-	0,023	0,925	-	-
					X^* final	235,846	-	-	6,892	-	4,540	40,846	-	-
					α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
G_C	100	1,05	1,47E-01	4	X^* final	299,734	-	16,886	-	-	-	-	-	-
					α	0,000	-0,103	-0,358	0,034	-	0,022	0,898	0,000	-0,231
					X^* final	289,292	47,914	12,141	6,892	-	4,540	41,121	225,000	10,182
G_{MC}	100	8,25	5,55E-17	8	α	-0,479	-	-	0,138	0,867	-	-	-	-
					X^* final	219,452	-	-	7,188	9,653	-	-	-	-
					α	-	-	-0,079	-	-	0,040	0,990	-0,072	-0,087
G_δ	100	4,39	5,68E-06	4	X^* final	-	-	18,593	-	-	4,539	20,169	219,654	10,833

Resultados para a viga não escorada com $f_c = 25$ MPa.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					\mathbf{X}^* inicial	290	50	25	6,8	1,5	4,5	6,3	225	12
G_M	100	5,646	8,21E-09	19	α	-0,361016	-	0	0,0474128	-	0,0313761	0,9265545	0	-0,089062
					\mathbf{X}^* final	250,87377	-	24,646396	6,8909465	-	4,5398284	25,597087	225	11,758669
G_V	100	7,7615	4,22E-15	7	α	-0,376446	-	-	0,0350176	-	0,0231734	0,9254866	-	-
					\mathbf{X}^* final	235,84556	-	-	6,8923441	-	4,5404405	40,84606	-	-
G_C	100	2,2063	1,37E-02	4	α	0,4834598	-	-0,875367	-	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^* final	311,69363	-	17,790182	-	-	-	-	-	-
G_A	100	9,0919	0,00E+00	30	α	0	-0,090064	-0,369544	0,0281421	-	0,0186234	0,8929045	0	-0,238555
					\mathbf{X}^* final	289,2921	47,934491	13,977983	6,8870786	-	4,5381345	49,853582	225	10,958917
G_{MC}	100	8,2483	5,55E-17	8	α	-0,479173	-	-	0,1383692	0,8667451	-	-	-	-
					\mathbf{X}^* final	219,45167	-	-	7,1880399	9,6528117	-	-	-	-
G_δ	100	4,6862	1,39E-06	5	α	-	-	-0,077505	-	-	0,0374878	0,9893228	-0,070635	-0,094014
					\mathbf{X}^* final	-	-	23,180781	-	-	4,5395265	21,852362	219,41368	11,78853

Resultados para a viga não escorada com $f_c = 30$ MPa.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					X^* inicial	290	50	30	6,8	1,5	4,5	6,3	225	12
G_M	100	5,69	6,34E-09	22	α	-0,361	-	0,000	0,047	-	0,031	0,927	0,000	-0,088
					X^* final	250,587	-	29,576	6,891	-	4,540	25,874	225,000	11,759
G_V	100	7,76	4,22E-15	7	α	-0,376	-	-	0,035	-	0,023	0,925	-	-
					X^* final	235,846	-	-	6,892	-	4,540	40,846	-	-
G_C	100	3,15	8,11E-04	4	α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
					X^* final	321,820	-	18,565	-	-	-	-	-	-
G_A	100	9,58	0,00E+00	45	α	0,000	-0,103	-0,431	0,033	-	0,022	0,850	0,000	-0,282
					X^* final	0,000	-0,103	-4,312	3,260	-	2,157	84,996	0,000	-0,282
G_{MC}	100	8,25	5,55E-17	8	α	-0,479	-	-	0,138	0,867	-	-	-	-
					X^* final	219,452	-	-	7,188	9,653	-	-	-	-
G_δ	100	4,77	9,27E-07	5	α	-	-	-0,075	-	-	0,037	0,990	-0,069	-0,095
					X^* final	-	-	27,833	-	-	4,540	22,349	219,467	11,784

Resultados para a viga não escorada com $f_c = 35$ MPa.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					X^* inicial	290	50	35	6,8	1,5	4,5	6,3	225	12
G_M	100	5,72	5,28E-09	25	α	-0,361	-	0,000	0,047	-	0,031	0,927	0,000	-0,088
					X^* final	250,384	-	34,505	6,891	-	4,540	26,071	225,000	11,759
G_V	100	7,76	4,22E-15	7	α	-0,376	-	-	0,035	-	0,023	0,925	-	-
					X^* final	235,846	-	-	6,892	-	4,540	40,846	-	-
G_C	100	3,95	3,89E-05	4	α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
					X^* final	330,624	-	19,245	-	-	-	-	-	-
G_A	100	10,04	0,00E+00	28	α	0,000	-0,112	-0,475	0,036	-	0,024	0,813	0,000	-0,315
					X^* final	289,292	47,216	15,417	6,922	-	4,553	49,854	225,000	10,484
G_{MC}	100	8,25	5,55E-17	8	α	-0,479	-	-	0,138	0,867	-	-	-	-
					X^* final	219,452	-	-	7,188	9,653	-	-	-	-
G_δ	100	4,84	6,59E-07	4	α	-	-	-0,074	-	-	0,036	0,990	-0,067	-0,095
					X^* final	-	-	32,489	-	-	4,540	22,765	219,518	11,779

Resultados para a viga não escorada com $f_c = 40$ MPa.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					X^* inicial	290	50	40	6,8	1,5	4,5	6,3	225	12
G_M	100	5,74	4,60E-09	25	α	-0,361	-	0,000	0,047	-	0,031	0,927	0,000	-0,087
					X^* final	250,233	-	39,434	6,891	-	4,540	26,218	225,000	11,759
G_V	100	7,76	4,22E-15	7	α	-0,376	-	-	0,035	-	0,023	0,925	-	-
					X^* final	235,846	-	-	6,892	-	4,540	40,846	-	-
G_C	100	4,64	1,71E-06	5	α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
					X^* final	338,460	-	19,856	-	-	-	-	-	-
G_A	100	10,22	0,00E+00	100	α	0,000	-0,093	-0,398	0,030	-	0,020	0,872	0,000	-0,266
					X^* final	289,292	46,941	15,772	6,935	-	4,559	48,504	225,000	10,279
G_{MC}	100	8,25	5,55E-17	8	α	-0,479	-	-	0,138	0,867	-	-	-	-
					X^* final	219,452	-	-	7,188	9,653	-	-	-	-
G_δ	100	4,89	4,92E-07	6	α	-	-	-0,072	-	-	0,036	0,990	-0,066	-0,096
					X^* final	-	-	37,149	-	-	4,540	23,122	219,564	11,776

Resultados para a viga não escorada com $b = 175$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					$X^*_{inicial}$	290	50	20	6,8	1,5	4,5	6,3	175	12
G_M	100	5,4807	2,12E-08	13	α	-0,361	-	0,000	0,049	-	0,032	0,926	0,000	-0,092
					X^*_{final}	251,918	-	19,717	6,891	-	4,540	24,580	175,000	11,758
G_V	100	7,7615	4,22E-15	7	α	-0,376	-	-	0,035	-	0,023	0,925	-	-
					X^*_{final}	235,846	-	-	6,892	-	4,540	40,846	-	-
G_C	100	1,0491	1,47E-01	4	α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
					X^*_{final}	299,734	-	16,886	-	-	-	-	-	-
G_A	100	8,2802	5,55E-17	19	α	0,000	-0,099	-0,366	0,033	-	0,022	0,891	0,000	-0,245
					X^*_{final}	289,292	47,930	11,823	6,892	-	4,541	42,649	175,000	11,026
G_{MC}	100	8,2483	5,55E-17	8	α	-0,479	-	-	0,138	0,867	-	-	-	-
					X^*_{final}	219,452	-	-	7,188	9,653	-	-	-	-
G_δ	100	4,3358	7,26E-06	4	α	-	-	-0,085	-	-	0,040	0,988	-0,078	-0,092
					X^*_{final}	-	-	18,524	-	-	4,539	19,839	170,570	11,809

Resultados para a viga não escorada com $b = 200$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
G_M	100	5,54	1,55E-08	14	\mathbf{X}^* inicial	290	50	20	6,8	1,5	4,5	6,3	200	12
					α	-0,361	-	0,000	0,048	-	0,032	0,926	0,000	-0,091
G_V	100	7,76	4,22E-15	7	\mathbf{X}^* final	251,581	-	19,717	6,891	-	4,540	24,918	200,000	11,758
					α	-0,376	-	-	0,035	-	0,023	0,925	-	-
G_C	100	1,05	1,47E-01	4	\mathbf{X}^* final	235,846	-	-	6,892	-	4,540	40,846	-	-
					α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
G_A	100	8,39	0,00E+00	33	\mathbf{X}^* final	299,734	-	16,886	-	-	-	-	-	-
					α	0,000	-0,100	-0,367	0,033	-	0,022	0,891	0,000	-0,244
G_{MC}	100	8,25	5,55E-17	8	\mathbf{X}^* final	289,292	47,885	11,719	6,893	-	4,541	43,540	200,000	11,016
					α	-0,479	-	-	0,138	0,867	-	-	-	-
G_δ	100	4,47	3,94E-06	4	\mathbf{X}^* final	219,452	-	-	7,188	9,653	-	-	-	-
					α	-	-	-0,083	-	-	0,039	0,989	-0,075	-0,093
					\mathbf{X}^* final	-	-	18,526	-	-	4,539	20,584	194,946	11,801

Resultados para a viga não escorada com $b = 250$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
G_M	100	5,61	9,98E-09	17	\mathbf{X}^* inicial	290	50	20	6,8	1,5	4,5	6,3	250	12
					α	-0,361	-	0,000	0,048	-	0,032	0,926	0,000	-0,090
G_V	100	7,76	4,22E-15	7	\mathbf{X}^* final	251,090	-	19,717	6,891	-	4,540	25,389	250,000	11,759
					α	-0,376	-	-	0,035	-	0,023	0,925	-	-
G_C	100	1,05	1,47E-01	4	\mathbf{X}^* final	235,846	-	-	6,892	-	4,540	40,846	-	-
					α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
G_A	100	8,55	0,00E+00	18	\mathbf{X}^* final	299,734	-	16,886	-	-	-	-	-	-
					α	0,000	-0,100	-0,367	0,032	-	0,021	0,892	0,000	-0,241
G_{MC}	100	8,25	5,55E-17	8	\mathbf{X}^* final	289,292	47,838	11,617	6,892	-	4,540	44,955	250,000	11,011
					α	-0,479	-	-	0,138	0,867	-	-	-	-
G_δ	100	4,68	1,43E-06	5	\mathbf{X}^* final	219,452	-	-	7,188	9,653	-	-	-	-
					α	-	-	-0,078	-	-	0,038	0,989	-0,071	-0,094
					\mathbf{X}^* final	-	-	18,544	-	-	4,540	21,818	243,789	11,789

Resultados para a viga não escorada com $b = 275$ cm.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
G_M	100	5,64	8,51E-09	19	X^* inicial	290	50	20	6,8	1,5	4,5	6,3	275	12
					α	-0,361	-	0,000	0,047	-	0,031	0,927	0,000	-0,089
G_V	100	7,76	4,22E-15	7	X^* final	250,913	-	19,717	6,891	-	4,540	25,559	275,000	11,759
					α	-0,376	-	-	0,035	-	0,023	0,925	-	-
G_C	100	1,05	1,47E-01	4	X^* final	235,846	-	-	6,892	-	4,540	40,846	-	-
					α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
G_A	100	8,61	0,00E+00	34	X^* final	299,734	-	16,886	-	-	-	-	-	-
					α	0,000	-0,101	-0,367	0,031	-	0,021	0,892	0,000	-0,240
G_{MC}	100	8,25	5,55E-17	8	X^* final	289,292	47,818	11,572	6,892	-	4,540	45,453	275,000	11,007
					α	-0,479	-	-	0,138	0,867	-	-	-	-
G_δ	100	4,77	9,35E-07	5	X^* final	219,452	-	-	7,188	9,653	-	-	-	-
					α	-	-	-0,075	-	-	0,037	0,990	-0,069	-0,095
					X^* final	-	-	18,555	-	-	4,540	22,338	268,236	11,784

Resultados para a viga não escorada com 20% de carga permanente.

Função de falha	η (%)	β	P_f	N° de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
G_M	100	3,6755	1,19E-04	6	X^* inicial	290	50	20	2	-	1,52	14,08	225	12
					α	-0,255482	-	0	0,0092622	-	0,0070393	0,964631	0	-0,063879
					X^* final	27,090951	-	1,9717117	0,020034	-	0,0152197	0,3592767	225	11,887301
G_V	100	5,2449	7,82E-08	6	α	-0,271932	-	-	0,0067014	-	0,005093	0,9622797	-	-
					X^* final	26,183612	-	-	2,0035146	-	1,52203	54,514796	-	-
					α	0,4834582	-	-0,875367	-	-	-	-	-	-
G_C	100	1,0491	1,47E-01	4	X^* inicial	29,973449	-	1,6885941	-	-	-	-	-	-
					α	0	-0,067226	-0,2923	0,0058991	-	0,0044833	0,9367596	0	-0,180188
G_A	100	5,9973	1,00E-09	7	X^* final	28,92921	48,941588	1,4665298	0,0200354	-	0,0152204	0,6314318	225	11,481214
					α	-0,258339	-	-	0,01487	0,96594	-	-	-	-
G_{MC}	100	4,0758	2,29E-05	5	X^* inicial	290	50	20	1,66	6,64	-	-	225	12
					α	-0,258339	-	-	0,01487	0,96594	-	-	-	-
					X^* final	26,875913	-	-	1,6650372	18,959742	-	-	-	-
G_δ	100	3,8356	6,26E-05	4	X^* inicial	290	50	20	-	-	2,16	8,64	225	12
					α	-	-	-0,068687	-	-	0,0157463	0,9923168	-0,062155	-0,080487
					X^* final	-	-	18,859479	-	-	0,0216652	0,2376598	220,97605	11,851818

Resultados para a viga não escorada com 40% de carga permanente.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
G_M	100	4,30	8,72E-06	6	X^* inicial	290	50	20	4	-	3,04	10,56	225	12
					α	-0,290	-	0,000	0,021	-	0,016	0,954	0,000	-0,072
					X^* final	26,518	-	1,972	0,040	-	0,031	0,316	225,000	11,851
G_V	100	6,07	6,52E-10	6	α	-0,307	-	-	0,016	-	0,012	0,952	-	-
					X^* final	25,402	-	-	4,019	-	3,051	49,238	-	-
G_C	100	1,05	1,47E-01	4	α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
					X^* final	29,973	-	1,689	-	-	-	-	-	-
G_A	100	6,83	4,14E-12	8	α	0,000	-0,078	-0,319	0,014	-	0,011	0,923	0,000	-0,201
					X^* final	28,929	48,632	1,364	0,040	-	0,031	0,560	225,000	11,341
G_{MC}	100	4,74	1,04E-06	5	X^* inicial	290,000	50,000	20,000	3,320	4,980	-	-	225,000	12,000
					α	-0,293	-	-	0,034	0,956	-	-	-	-
					X^* final	26,253	-	-	3,347	16,799	-	-	-	-
G_δ	100	4,51	3,22E-06	4	X^* inicial	290,000	50,000	20,000	-	-	4,320	6,480	225,000	12,000
					α	-	-	-0,079	-	-	0,036	0,989	-0,072	-0,092
					X^* final	-	-	18,566	-	-	0,044	0,214	219,516	11,800

Resultados para a viga não escorada com 60% de carga permanente.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
G_M	100	5,42	3,04E-08	5	X^* inicial	290	50	20	5,56	-	4	7,04	225	12
					α	-0,337	-	0,000	0,036	-	0,026	0,937	0,000	-0,084
G_V	100	7,47	3,99E-14	6	X^* final	25,467	-	1,972	0,056	-	0,040	0,275	225,000	11,781
					α	-0,356	-	-	0,027	-	0,019	0,934	-	-
G_C	100	1,05	1,47E-01	4	X^* final	24,019	-	-	5,615	-	4,029	43,599	-	-
					α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
G_A	100	8,20	1,11E-16	16	X^* final	29,973	-	1,689	-	-	-	-	-	-
					α	0,000	-0,094	-0,353	0,024	-	0,017	0,901	0,000	-0,231
G_{MC}	100	5,81	3,18E-09	5	X^* inicial	290,000	50,000	20,000	4,980	3,320	-	-	225,000	12,000
					α	-0,348	-	-	0,064	0,935	-	-	-	-
					X^* final	25,122	-	-	5,073	14,206	-	-	-	-
G_δ	100	5,62	9,59E-09	6	X^* inicial	290,000	50,000	20,000	-	-	6,480	4,320	225,000	12,000
					α	-	-	-0,096	-	-	0,066	0,983	-0,089	-0,111
					X^* final	-	-	17,998	-	-	0,066	0,189	216,581	11,700

Resultados para a viga não escorada com 80% de carga permanente.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
G_M	100	7,27	1,80E-13	7	X^* inicial	290	50	20	8	-	6,08	3,52	225	12
					α	-0,457	-	0,000	0,078	-	0,060	0,876	0,000	-0,114
					X^* final	22,928	-	1,972	0,082	-	0,062	0,190	225,000	11,601
G_V	100	10,13	0,00E+00	29	α	-0,583	-	-	0,079	-	0,060	0,806	-	-
					X^* final	19,145	-	-	8,318	-	6,264	27,855	-	-
G_C	100	1,05	1,47E-01	4	α	0,483	-	-0,875	-	-	-	-	-	-
					X^* final	29,973	-	1,689	-	-	-	-	-	-
G_A	100	10,44	0,00E+00	54	α	0,000	-0,166	-0,477	0,071	-	0,054	0,781	0,000	-0,356
					X^* final	28,929	45,792	0,851	0,083	-	0,063	0,279	225,000	10,214
G_{MC}	100	7,92	1,22E-15	7	X^* inicial	290,000	50,000	20,000	6,640	1,660	-	-	225,000	12,000
					α	-0,460	-	-	0,127	0,879	-	-	-	-
					X^* final	22,420	-	-	6,974	10,231	-	-	-	-
G_δ	100	8,00	6,11E-16	9	X^* inicial	290,000	50,000	20,000	-	-	8,640	2,160	225,000	12,000
					α	-	-	-0,137	-	-	0,127	0,961	-0,132	-0,155
					X^* final	-	-	16,397	-	-	0,091	0,156	207,206	11,406

Resultados para a viga não escorada considerando os fatores de segurança.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	q_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					X^* inicial	290	50	20	6,8	1,5	4,5	6,3	225	12
G_M	100	2,943	1,63E-03	6	α	-0,3994	-	0,0000	0,0786	-	0,0520	0,9062	0,00	-0,1018
					X^* final	266,4711	-	19,7171	6,8786	-	4,5344	12,4240	225,00	11,8562
	80	2,599	4,67E-03	5	α	-0,4173	-	0,0000	0,0864	-	0,0572	0,8983	0,00	-0,0901
					X^* final	268,1756	-	19,7171	6,8763	-	4,5334	11,2698	225,00	11,8876
	60	2,15	1,58E-02	4	α	-0,4464	-	0,0000	0,0985	-	0,0652	0,8836	0,00	-0,0777
					X^* final	270,5222	-	19,7171	6,8721	-	4,5316	9,9333	225,00	11,9198
	40	1,546	6,11E-02	4	α	-0,4944	-	0,0000	0,1176	-	0,0778	0,8554	0,00	-0,0627
					X^* final	274,2287	-	19,7171	6,8619	-	4,5271	8,4474	225,00	11,9534
G_V	100	5,25	7,59E-08	5	α	-0,3560	-	-	0,0474	-	0,0314	0,9328	-	-
					X^* final	253,8534	-	-	6,8846	-	4,5370	23,4433	-	-
	80	5,25	7,59E-08	5	α	-0,3560	-	-	0,0474	-	0,0314	0,9328	-	-
					X^* final	253,8534	-	-	6,8846	-	4,5370	23,4433	-	-
	60	5,25	7,59E-08	5	α	-0,3560	-	-	0,0474	-	0,0314	0,9328	-	-
					X^* final	253,8534	-	-	6,8846	-	4,5370	23,4433	-	-
	40	5,25	7,59E-08	5	α	-0,3560	-	-	0,0474	-	0,0314	0,9328	-	-
					X^* final	253,8534	-	-	6,8846	-	4,5370	23,4433	-	-
G_C	100	0,165	4,34E-01	3	α	0,4835	-	-0,8754	-	-	-	-	-	-

					\mathbf{X}^*_{final}	290,9108	-	19,2418	-	-	-	-	-	-
	80	0,165	4,34E-01	3	α	0,4835	-	-0,8754	-	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	290,9108	-	19,2418	-	-	-	-	-	-
	60	0,165	4,34E-01	3	α	0,4835	-	-0,8754	-	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	290,9108	-	19,2418	-	-	-	-	-	-
	40	0,165	4,34E-01	3	α	0,4835	-	-0,8754	-	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	290,9108	-	19,2418	-	-	-	-	-	-
\mathbf{G}_A	100	5,186	1,07E-07	10	α	0,0000	-0,0961	-0,3428	0,0478	-	0,0316	0,9062	0,00	-0,2208
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,7098	14,6058	6,8843	-	4,5369	22,2336	225,00	11,4502
	80	6,252	2,03E-10	9	α	0,0000	-0,0989	-0,3385	0,0402	-	0,0266	0,9077	0,00	-0,2221
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,4178	13,7970	6,8854	-	4,5374	28,6625	225,00	11,3336
	60	7,638	1,10E-14	9	α	0,0000	-0,1058	-0,3405	0,0332	-	0,0219	0,9047	0,00	-0,2298
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	47,9614	12,7132	6,8861	-	4,5377	38,4369	225,00	11,1574
	40	9,639	0,00E+00	100	α	0,0000	-0,1509	-0,4093	0,0348	-	0,0230	0,8463	0,00	-0,3028
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	46,4395	10,1337	6,9140	-	4,5499	49,8536	225,00	10,6000
\mathbf{G}_B	100	8,439	0,00E+00	56	α	-	-	-0,1387	-	-	0,0673	0,9662	-0,1347	-0,1566
					\mathbf{X}^*_{final}	-	-	16,1824	-	-	4,6278	49,8536	205,81	11,3654
	80	8,068	3,33E-16	8	α	-	-	-0,1005	-	-	0,0541	0,9822	-0,0947	-0,1152
					\mathbf{X}^*_{final}	-	-	17,1946	-	-	4,5983	47,8772	212,10	11,5538
	60	7,678	8,10E-15	7	α	-	-	-0,0948	-	-	0,0589	0,9838	-0,0887	-0,1090
					\mathbf{X}^*_{final}	-	-	17,4395	-	-	4,6016	44,2485	213,51	11,5986
	40	7,175	3,62E-13	5	α	-	-	-0,0825	-	-	0,0626	0,9871	-0,0765	-0,0954
					\mathbf{X}^*_{final}	-	-	17,8411	-	-	4,6010	39,9439	215,73	11,6714

G_{MC}	100	5,207	9,61E-08	8	α	-0,5218	-	-	0,2128	0,8261	-	-	-	-
					X[*]_{final}	239,2451	-	-	7,1768	4,7452	-	-	-	-
	80	5,207	9,61E-08	8	α	-0,5218	-	-	0,2128	0,8261	-	-	-	-
					X[*]_{final}	239,2451	-	-	7,1768	4,7452	-	-	-	-
	60	5,207	9,61E-08	8	α	-0,5218	-	-	0,2128	0,8261	-	-	-	-
					X[*]_{final}	239,2451	-	-	7,1768	4,7452	-	-	-	-
	40	5,207	9,61E-08	8	α	-0,5218	-	-	0,2128	0,8261	-	-	-	-
					X[*]_{final}	239,2451	-	-	7,1768	4,7452	-	-	-	-

Resultados para calibração dos coeficientes, viga não escorada função de falha G_M .

γ_g	γ_q	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável							
						f_y (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
1	1	5,5785481	1,213E-08	15	X^* inicial	250	20	7	5	8,5	225	10	
					α	-0,3609851	0	0,0479481	0,0317304	0,9264144	0	-0,0902233	
	1,2	4,935688	3,993E-07	6	X^* final	251,30778	19,717117	6,890844	4,5397835	25,179863	225	11,758465	
					α	-0,3446826	0	0,0447984	0,029646	0,9332124	0	-0,0861551	
	1,4	4,4093174	5,185E-06	5	X^* final	256,84864	19,717117	6,8751778	4,5329228	21,673931	225	11,795873	
					α	-0,3330498	0	0,0425922	0,028186	0,9378369	0	-0,0832538	
	1,6	3,9642	3,682E-05	5	X^* final	261,05523	19,717117	6,8638719	4,5279716	19,024984	225	11,823737	
					α	-0,3248466	0	0,0410254	0,0271492	0,9409886	0	-0,081209	
	1,8	3,5779529	0,0001731	5	X^* final	264,36841	19,717117	6,8553417	4,5242359	16,954789	225	11,845371	
					α	-0,3193294	0	0,0399238	0,0264201	0,9430605	0	-0,079835	
	2	3,2359625	0,0006062	5	X^* final	267,06684	19,717117	6,8486037	4,5212852	15,293042	225	11,862791	
					α	-0,3159946	0	0,0391786	0,025927	0,9442978	0	-0,0790059	
						X^* final	269,3204	19,717117	6,8431252	4,5188859	13,930363	225	11,877207
						α	-0,3821752	0	0,0608774	0,0402865	0,9162364	0	-0,0955197
1,2	1	5,2465234	7,75E-08	23	X^* final	251,46441	19,717117	6,9084892	4,547511	22,886631	225	11,759534	
					α	-0,365747	0	0,057006	0,0377246	0,9236875	0	-0,0914205	
	1,2	4,6256954	1,867E-06	6	X^* final	257,01754	19,717117	6,8896469	4,5392593	19,771979	225	11,797001	
					α	-0,3543841	0	0,0543415	0,0359613	0,9286108	0	-0,0885872	
	1,4	4,1144598	1,94E-05	5	X^* final	261,26336	19,717117	6,8759479	4,5332601	17,403182	225	11,825104	
					α	-0,3467548	0	0,0525056	0,0347463	0,9318167	0	-0,0866863	
	1,6	3,680123	0,0001166	5	X^* final								
					α								

					X^*_{final}	264,59701	19,717117	6,865689	4,5287674	15,541163	225	11,846853	
	1,8	3,3013104	0,0004812	5	α	-0,3420658	0	0,0512704	0,033929	0,9337545	0	-0,0855198	
					X^*_{final}	267,32481	19,717117	6,8575497	4,5252029	14,041473	225	11,864447	
	2	2,964192	0,0015174	5	α	-0,3397641	0	0,0504953	0,033416	0,9347072	0	-0,0849495	
					X^*_{final}	269,61847	19,717117	6,8508871	4,5222851	12,808814	225	11,879104	
1,4	1	4,8932323	4,96E-07	32	α	-0,4074218	0	0,0756546	0,0500655	0,9029994	0	-0,1018299	
					X^*_{final}	-3,9097774	0	7,1028583	4,7004209	91,122516	0	-0,0977275	
	1,2	4,2950828	8,731E-06	19	α	25,725871	1,9717117	0,0690364	0,0454539	0,178724	225	11,798609	
					X^*_{final}	257,25871	19,717117	6,90364	4,5453873	17,872404	225	11,798609	
	1,4	3,7996125	7,246E-05	6	α	-0,3800906	0	0,0679339	0,0449563	0,9164428	0	-0,0950136	
					X^*_{final}	261,50836	19,717117	6,8877523	4,5384296	15,782582	225	11,826712	
	1,6	3,3754733	0,0003684	5	α	-0,3733325	0	0,0658753	0,0435939	0,9196043	0	-0,0933312	
					X^*_{final}	264,90557	19,717117	6,8755329	4,5330783	14,132045	225	11,848852	
	1,8	3,0035442	0,0013343	5	α	-0,369802	0	0,0645799	0,0427367	0,92125	0	-0,092455	
					X^*_{final}	267,682	19,717117	6,8659103	4,5288642	12,795885	225	11,866738	
	2	2,6705502	0,0037864	5	α	-0,3688598	0	0,0638564	0,0422579	0,9217231	0	-0,0922253	
					X^*_{final}	270,04225	19,717117	6,8579513	4,5253788	11,694952	225	11,881799	
	1,6	1	4,5144581	3,174E-06	8	α	-0,4381095	0	0,0928771	0,0614628	0,8852491	0	-0,1095003
						X^*_{final}	251,93296	19,717117	6,9425429	4,5624242	18,295239	225	11,762728
1,2		3,9399326	4,075E-05	39	α	-0,4218239	0	0,0874784	0,0578901	0,8943957	0	-0,1054382	
					X^*_{final}	257,55829	19,717117	6,917172	4,5513135	15,975151	225	11,800606	
1,4		3,4598136	0,0002703	6	α	-0,4117291	0	0,0839857	0,0555788	0,8998574	0	-0,1029233	
					X^*_{final}	261,87054	19,717117	6,8987735	4,5432561	14,169562	225	11,829086	
1,6	3,0458816	0,00116	6	α	-0,4062015	0	0,081787	0,0541238	0,902812	0	-0,1015493		

					X^*_{final}	265,32064	19,717117	6,8846886	4,5370879	12,730971	225	11,851538	
	1,8	2,6798963	0,0036822	5	α	-0,404175	0	0,0805095	0,0532783	0,903942	0	-0,10105	
					X^*_{final}	268,20559	19,717117	6,8732918	4,5320969	11,562519	225	11,870091	
	2	2,3500787	0,0093847	5	α	-0,4048719	0	0,079916	0,0528856	0,9036855	0	-0,1012311	
					X^*_{final}	270,68171	19,717117	6,8638101	4,5279445	10,596192	225	11,885857	
1,8	1	4,1042478	2,028E-05	6	α	-0,4762246	0	0,1133886	0,0750366	0,8605552	0	-0,1190273	
					X^*_{final}	252,35263	19,717117	6,958132	4,5692512	16,014314	225	11,765583	
	1,2	3,5542296	0,0001895	15	α	-0,4603268	0	0,1071977	0,0709396	0,8708248	0	-0,1150633	
					X^*_{final}	258,03717	19,717117	6,9295021	4,5567132	14,095521	225	11,803792	
	1,4	3,0894011	0,0010028	7	α	-0,45141	0	0,103374	0,0684092	0,8764298	0	-0,1128439	
					X^*_{final}	262,42067	19,717117	6,908555	4,5475398	12,573879	225	11,832686	
	1,6	2,6848527	0,0036281	6	α	-0,4474429	0	0,1010991	0,0669038	0,878968	0	-0,1118614	
					X^*_{final}	265,98897	19,717117	6,8922733	4,5404095	11,351439	225	11,855854	
	1,8	2,3241471	0,0100588	5	α	-0,4470899	0	0,0998842	0,0660999	0,8793574	0	-0,1117819	
					X^*_{final}	269,03288	19,717117	6,8788728	4,534541	10,353997	225	11,875374	
	2	1,9965388	0,0229377	5	α	-0,4493772	0	0,0994133	0,0657882	0,8781935	0	-0,1123622	
					X^*_{final}	271,7107	19,717117	6,8674464	4,529537	9,5268691	225	11,892367	
	2	1	3,6554161	0,0001284	6	α	-0,5245897	0	0,1384305	0,0916084	0,8246569	0	-0,1311166
						X^*_{final}	252,99649	19,717117	6,97207	4,575355	13,763426	225	11,769954
1,2		3,1303116	0,0008731	27	α	-0,5093071	0	0,1314078	0,0869611	0,8364022	0	-0,127308	
					X^*_{final}	258,77541	19,717117	6,9399252	4,5612778	12,245806	225	11,808692	
1,4		2,6807549	0,0036728	28	α	-0,5015906	0	0,127187	0,0841679	0,8422727	0	-0,1253906	
					X^*_{final}	263,33625	19,717117	6,915964	4,5507844	11,017742	225	11,838661	
1,6	2,2849214	0,0111587	5	α	-0,4989923	0	0,1247403	0,0825487	0,8444342	0	-0,1247523		

				\mathbf{X}_{final}^*	267,13477	19,717117	6,8968991	4,5424353	10,018264	225	11,863228
1,8	1,9287422	0,0268814	5	α	-0,4998357	0	0,1234341	0,0816843	0,8441785	0	-0,1249743
				\mathbf{X}_{final}^*	270,44198	19,717117	6,8809266	4,5354404	9,1960265	225	11,884337
2	1,6039328	0,0543644	4	α	-0,5026986	0	0,1227913	0,0812589	0,8425038	0	-0,1257012
				\mathbf{X}_{final}^*	273,43893	19,717117	6,8670794	4,5293763	8,5154308	225	11,903248

Resultados para calibração dos coeficientes, viga não escorada função de falha G_v .

γ_g	γ_q	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável				
						f_y (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	
					X^* inicial	250	7	5	8,5	
1	1	7,7614801	4,219E-15	7	α	-0,3764457	0,0350176	0,0231734	0,9254866	
					X^* final	235,84556	6,8923441	4,5404405	40,84606	
	1,2	7,0119089	1,175E-12	6	α	-0,3563735	0,0321846	0,0212986	0,9335462	
					X^* final	242,92282	6,8767559	4,5336139	35,364599	
	1,4	6,4045895	7,539E-11	5	α	-0,3406222	0,0300889	0,0199118	0,9395077	
					X^* final	248,35777	6,8654133	4,5286466	31,184687	
	1,6	5,8971314	1,849E-09	5	α	-0,3280044	0,0284754	0,018844	0,9440589	
					X^* final	252,70974	6,857214	4,5250559	27,896899	
	1,8	5,4630038	2,341E-08	5	α	-0,3177431	0,0272043	0,0180029	0,9476155	
					X^* final	256,24148	6,8507107	4,5222079	25,237359	
	2	5,0846226	1,842E-07	5	α	-0,3093307	0,0261845	0,0173279	0,950436	
					X^* final	259,17369	6,8454413	4,5199002	23,04241	
	1,2	1	7,5222025	2,692E-14	6	α	-0,387965	0,0432991	0,0286538	0,9202105
						X^* final	235,8881	6,91063	4,5484485	38,537686
1,2		6,7924114	5,514E-12	6	α	-0,3673866	0,0398066	0,0263426	0,9288426	
					X^* final	242,97456	6,8918839	4,5402389	33,450676	
1,4		6,1996696	2,829E-10	5	α	-0,3513128	0,037228	0,0246362	0,9351933	
					X^* final	248,43706	6,8784343	4,5343489	29,553486	
1,6		5,7033582	5,873E-09	5	α	-0,338495	0,035255	0,0233305	0,940018	

				\mathbf{X}^*_{final}	252,76889	6,8684398	4,529972	26,470213	
1,8	5,2779853	6,531E-08	5	α	-0,3281384	0,033705	0,0223048	0,9437646	
				\mathbf{X}^*_{final}	256,30437	6,8606533	4,526562	23,971929	
2	4,9066036	4,633E-07	5	α	-0,3197095	0,032467	0,0214855	0,9467154	
				\mathbf{X}^*_{final}	259,24234	6,8543402	4,5237973	21,905816	
1,4	1	7,2748199	1,734E-13	6	α	-0,400643	0,0521526	0,0345128	0,9140975
					\mathbf{X}^*_{final}	235,95053	6,928795	4,5564035	36,223074
	1,2	6,5655373	2,592E-11	6	α	-0,379482	0,0479568	0,0317361	0,9234102
					\mathbf{X}^*_{final}	243,04134	6,9069726	4,5468468	31,532345
	1,4	5,9878219	1,063E-09	6	α	-0,3630572	0,0448732	0,0296955	0,9302118
					\mathbf{X}^*_{final}	248,50079	6,8913367	4,5399993	27,914622
	1,6	5,502955	1,867E-08	5	α	-0,3500408	0,0425216	0,0281393	0,9353457
					\mathbf{X}^*_{final}	252,84166	6,8795689	4,5348458	25,041492
	1,8	5,0865273	1,823E-07	5	α	-0,3395993	0,0406837	0,026923	0,9393041
					\mathbf{X}^*_{final}	256,38101	6,8705	4,5308742	22,705114
	2	4,7222591	1,166E-06	5	α	-0,3311751	0,0392241	0,0259571	0,9423963
					\mathbf{X}^*_{final}	259,32491	6,8631441	4,5276529	20,768295
1,6	1	7,0185787	1,121E-12	7	α	-0,4146316	0,061662	0,0408058	0,9069803
					\mathbf{X}^*_{final}	236,03479	6,9471494	4,5644415	33,9025
	1,2	6,3305646	1,221E-10	6	α	-0,3928399	0,0567186	0,0375344	0,9170883
					\mathbf{X}^*_{final}	243,12037	6,9219626	4,5534114	29,609234
	1,4	5,7683622	4,002E-09	6	α	-0,3760428	0,0530993	0,0351393	0,924412
					\mathbf{X}^*_{final}	248,58766	6,9042639	4,5456606	26,274079
1,6	5,2952537	5,943E-08	5	α	-0,3628232	0,0503531	0,0333219	0,9298998	

				\mathbf{X}^*_{final}	252,9301	6,8905894	4,539672	23,611095	
1,8	4,8879672	5,094E-07	5	α	-0,3523123	0,0482187	0,0319095	0,9340946	
				\mathbf{X}^*_{final}	256,47399	6,8802337	4,535137	21,437303	
2	4,5309229	2,936E-06	5	α	-0,3439218	0,0465351	0,0307953	0,9373388	
				\mathbf{X}^*_{final}	259,42444	6,8718332	4,5314581	19,630251	
1,8	1	6,7525562	7,263E-12	7	α	-0,4301754	0,0719434	0,0476096	0,8986137
					\mathbf{X}^*_{final}	236,12313	6,9651759	4,5723359	31,573105
	1,2	6,0866488	5,765E-10	6	α	-0,4076865	0,0661944	0,0438051	0,9096654
					\mathbf{X}^*_{final}	243,21419	6,9368363	4,5599251	27,68192
	1,4	5,540485	1,508E-08	6	α	-0,3904919	0,0620077	0,0410345	0,9175986
					\mathbf{X}^*_{final}	248,68549	6,9170838	4,5512748	24,63015
	1,6	5,0794692	1,892E-07	5	α	-0,3770684	0,0588465	0,0389425	0,9234934
					\mathbf{X}^*_{final}	253,03665	6,9014879	4,5444449	22,179443
	1,8	4,6815246	1,424E-06	5	α	-0,3665106	0,0564075	0,0373285	0,9279519
					\mathbf{X}^*_{final}	256,58647	6,8898342	4,5393413	20,168974
	2	4,3318079	7,394E-06	5	α	-0,3581932	0,054499	0,0360655	0,9313575
					\mathbf{X}^*_{final}	259,54481	6,8803819	4,5352019	18,492196
2	1	6,4756697	4,72E-11	7	α	-0,4475724	0,0831324	0,0550141	0,8886739
					\mathbf{X}^*_{final}	236,22973	6,9830385	4,5801585	29,237862
	1,2	5,8327939	2,725E-09	7	α	-0,4243104	0,0765136	0,050634	0,9008566
					\mathbf{X}^*_{final}	243,32485	6,9517381	4,5664511	25,750524
	1,4	5,3032457	5,688E-08	10	α	-0,4066787	0,0717204	0,0474621	0,9095141
					\mathbf{X}^*_{final}	248,79968	6,9293285	4,5566372	22,98476
	1,6	4,8546715	6,029E-07	6	α	-0,3930685	0,0681263	0,0450835	0,9158731

				$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	253,16002	6,912443	4,5492424	20,746105
1,8	4,4662716	3,98E-06	5	α	-0,38249	0,0653729	0,0432614	0,9206282
				$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	256,72256	6,8992751	4,5434758	18,90074
2	4,1239759	1,862E-05	5	α	-0,3742981	0,0632414	0,041851	0,9242023
				$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	259,69117	6,8887568	4,5388695	17,354814

Resultados para calibração dos coeficientes, viga não escorada função de falha G_A .

γ_g	γ_q	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável								
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)	
					X^* inicial	250	50	20	7	5	8,5	225	10	
1	1	8,4794381	0	100	α	-9,279E-13	-0,1003022	-0,3668726	0,0320458	0,0212068	0,8917014	0	-0,2423551	
					X^* final	289,2921	47,859256	11,662009	6,8924205	4,5404739	44,327715	225	11,013409	
	1,2	7,7715773	3,886E-15	12	α	0	-0,0929137	-0,3553877	0,0291142	0,0192668	0,9004471	0	-0,2303102	
					X^* final	289,2921	48,167815	12,37202	6,8769394	4,5336942	39,204416	225	11,140945	
	1,4	7,1901103	3,237E-13	10	α	-7,968E-13	-0,0871069	-0,3452172	0,0269004	0,0178017	0,9075132	0	-0,2204921	
					X^* final	289,2921	48,398997	12,967612	6,8657585	4,5287978	35,191729	225	11,238978	
	1,6	6,6984459	1,053E-11	9	α	0	-0,0824998	-0,3365989	0,025191	0,0166705	0,9131348	0	-0,2125258	
					X^* final	289,2921	48,577496	13,477173	6,8573754	4,5251266	31,947793	225	11,316733	
	1,8	6,2750443	1,748E-10	8	α	0	-0,0787575	-0,3291118	0,0238331	0,0157719	0,9177533	0	-0,2058999	
					X^* final	289,2921	48,719531	13,912035	6,8508431	4,5222658	29,265491	225	11,379719	
	2	5,9035121	1,779E-09	8	α	0	-0,0756608	-0,3226861	0,0227273	0,0150401	0,9215592	0	-0,2003373	
					X^* final	289,2921	48,835397	14,294061	6,8456152	4,5199764	27,010263	225	11,432235	
	1,2	1	8,2606089	5,551E-17	18	α	0	-0,1030089	-0,3767136	0,0394954	0,0261367	0,8850394	0	-0,2488739
						X^* final	289,2921	47,858156	11,659608	6,9109692	4,548597	42,000057	225	11,012942
1,2		7,5738554	1,81E-14	12	α	0	-0,0952331	-0,3643601	0,0358049	0,0236945	0,894755	0	-0,2360982	
					X^* final	289,2921	48,169772	12,376542	6,8922106	4,540382	37,295506	225	11,141747	
1,4		7,0077606	1,211E-12	10	α	0	-0,0892633	-0,3538609	0,0330758	0,0218884	0,902314	0	-0,2259887	
					X^* final	289,2921	48,40088	12,972349	6,8788014	4,5345097	33,561104	225	11,239765	
1,6		6,5277347	3,339E-11	9	α	0	-0,0845374	-0,3450319	0,0309719	0,0204961	0,908285	0	-0,2178195	

				\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,579375	13,483389	6,8687476	4,5301068	30,52537	225	11,317597		
1,8	6,1134332	4,876E-10	9	α	-7,334E-13	-0,080708	-0,3374188	0,0293036	0,0193921	0,9131572	0	-0,2110544		
				\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,721455	13,920666	6,8609129	4,5266757	28,004645	225	11,380719		
2	5,7496066	4,473E-09	9	α	0	-0,0775472	-0,3308742	0,0279489	0,0184956	0,9171711	0	-0,2053843		
				\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,837332	14,302283	6,8546381	4,5239278	25,877539	225	11,433206		
1,4	1	8,0358434	4,441E-16	14	α	0	-0,1057911	-0,3870258	0,047315	0,0313114	0,8777502	0	-0,2556458	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	47,860688	11,665092	6,9292802	4,556616	39,69186	225	11,013968	
	1,2	7,370724	8,488E-14	12	α	0	-0,0977356	-0,3740529	0,0428643	0,0283661	0,8883457	0	-0,2423472	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,171956	12,381725	6,9074282	4,5470463	35,381164	225	11,142652	
	1,4	6,8204822	4,537E-12	11	α	0	-0,0915852	-0,3631872	0,0395869	0,0261972	0,8964763	0	-0,2319137	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,403016	12,978118	6,8917927	4,540199	31,92712	225	11,240681	
	1,6	6,3529028	1,056E-10	11	α	0	-0,0867315	-0,3540703	0,0370677	0,0245301	0,902873	0	-0,2235096	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,581471	13,487558	6,8800627	4,5350621	29,099684	225	11,3184	
	1,8	5,9478659	1,358E-09	9	α	-7,525E-13	-0,0828075	-0,3463289	0,0350721	0,0232095	0,9080291	0	-0,2165955	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,723573	13,92774	6,8709311	4,531063	26,741457	225	11,381687	
	2	5,5918445	1,123E-08	9	α	0	-0,079578	-0,3396718	0,0334563	0,0221402	0,9122709	0	-0,2108142	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,839469	14,309715	6,863611	4,5278573	24,743302	225	11,434192	
	1,6	1	7,8046831	2,998E-15	13	α	1,006E-12	-0,1087944	-0,3981143	0,0556019	0,0367954	0,8695305	0	-0,2629448
						\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	47,863197	11,668972	6,9475337	4,5646098	37,37262	225	11,014886
1,2		7,1617891	3,982E-13	12	α	0	-0,1004415	-0,3845498	0,0503362	0,0333108	0,8810979	0	-0,2491105	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,174463	12,38772	6,9225774	4,5536806	33,46217	225	11,143693	
1,4		6,6279231	1,702E-11	11	α	0	-0,0940939	-0,3732837	0,0464742	0,030755	0,8898889	0	-0,2383224	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,405452	12,984941	6,9047213	4,5458609	30,290135	225	11,24174	
1,6		6,1725801	3,359E-10	10	α	0	-0,0890992	-0,3639253	0,0435119	0,0287946	0,8967412	0	-0,2296791	

				\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,583882	13,496906	6,8913294	4,5399961	27,6732	225	11,319588		
1,8	5,7778059	3,784E-09	10	α	0	-0,0850747	-0,3559538	0,0411736	0,0272472	0,9022632	0	-0,2225816		
				\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,725968	13,935162	6,880889	4,5354239	25,476791	225	11,38275		
2	5,4300966	2,816E-08	9	α	0	-0,081772	-0,3491419	0,039285	0,0259974	0,9067783	0	-0,216673		
				\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,841836	14,315385	6,8725217	4,5317596	23,607625	225	11,435151		
1,8	1	7,5660564	1,926E-14	13	α	0	-0,1120545	-0,4102274	0,0644137	0,0426267	0,8601215	0	-0,2708913	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	47,866287	11,675874	6,9656922	4,572562	35,049093	225	11,016162	
	1,2	6,9465892	1,871E-12	12	α	0	-0,1033802	-0,395969	0,0582745	0,038564	0,8728487	0	-0,2564627	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,177359	12,394693	6,937643	4,5602783	31,539099	225	11,144898	
	1,4	6,4297047	6,393E-11	11	α	1,771E-12	-0,0968146	-0,3842513	0,0537856	0,0355934	0,8824149	0	-0,2452796	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,408252	12,992764	6,9175728	4,551489	28,650583	225	11,242956	
	1,6	5,9873806	1,066E-09	10	α	8,353E-13	-0,0916663	-0,3745772	0,0503525	0,0333215	0,8898185	0	-0,2363613	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,586628	13,504883	6,9025155	4,5448949	26,244435	225	11,320785	
	1,8	5,6027949	1,055E-08	10	α	0	-0,0875312	-0,366404	0,0476495	0,0315328	0,8957376	0	-0,2290757	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,728707	13,943848	6,8907757	4,5397536	24,211246	225	11,383976	
	2	5,2631536	7,08E-08	8	α	0	-0,0841485	-0,3594855	0,0454715	0,0300914	0,9005372	0	-0,2230445	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,844618	14,325828	6,8813663	4,535633	22,472335	225	11,436474	
	2	1	7,3193029	1,246E-13	12	α	0	-0,1156161	-0,4235361	0,0738266	0,0488559	0,8492579	0	-0,279596
						\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	47,869915	11,685751	6,9837451	4,580468	32,721038	225	11,017776
1,2		6,7249634	8,782E-12	11	α	-9,794E-13	-0,1065863	-0,4084027	0,0667452	0,0441696	0,8634183	0	-0,2644798	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,18074	12,400821	6,9525927	4,5668253	29,61187	225	11,146181	
1,4		6,2253641	2,402E-10	11	α	9,125E-13	-0,0997765	-0,3962151	0,0615774	0,0407497	0,8738801	0	-0,2528627	
					\mathbf{X}^*_{final}	289,2921	48,4115	13,001821	6,9303288	4,5570752	27,009167	225	11,244364	
1,6		5,796521	3,385E-09	10	α	0	-0,094459	-0,3861889	0,0576403	0,0381443	0,8819285	0	-0,2436399	

				$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	289,2921	48,589802	13,514151	6,9136109	4,5497539	24,814692	225	11,322172
1,8	5,4224536	2,939E-08	10	α	0	-0,0902032	-0,3777935	0,0545492	0,0360987	0,8883078	0	-0,2361481
				$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	289,2921	48,731864	13,953887	6,9005746	4,5440449	22,945328	225	11,38539
2	5,091226	1,779E-07	8	α	-7,861E-13	-0,086734	-0,3707466	0,0520656	0,0344552	0,8934399	0	-0,2299813
				$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	289,2921	48,847794	14,336903	6,890124	4,5394682	21,336901	225	11,43794

APÊNDICE III - VIGA COM DIFERENTES CONECTORES

A seguir são apresentadas as tabelas com os dados referentes aos resultados apresentados para a viga com diferentes conectores.

Resultados para a viga com diferentes conectores com conectores do tipo pino com cabeça.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável							
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					$X^*_{inicial}$	250	50	20	7	5	8,5	225	10
G_M	100	4,3527722	6,72E-06	5	α	-0,3428249	-	0	0,0460139	0,032867	0,9346418	0	-0,075619
					X^*_{final}	224,683	-	19,717117	7,0700647	5,0357473	25,190716	225	9,8683408
	80	4,0947831	2,11E-05	5	α	-0,3458419	-	0	0,0486142	0,0347244	0,9341819	0	-0,0642529
					X^*_{final}	225,87484	-	19,717117	7,0697006	5,0355616	23,508529	225	9,8947311
	60	3,769815	8,17E-05	5	α	-0,3511353	-	0	0,0523058	0,0373613	0,932657	0	-0,0521848
					X^*_{final}	227,33753	-	19,717117	7,0690713	5,0352405	21,502857	225	9,9212804
40	3,3600518	3,90E-04	5	α	-0,3607666	-	0	0,0577612	0,041258	0,9291446	0	-0,0387193	
				X^*_{final}	229,11808	-	19,717117	7,067985	5,0346862	19,164888	225	9,9479424	
G_V	100	7,9882516	6,66E-16	7	α	-0,3650736	-	-	0,0260003	0,0185716	0,9304302	-	-
					X^*_{final}	203,38992	-	-	7,0724793	5,0369792	58,182142	-	-
	80	7,9882516	6,66E-16	7	α	-0,3650736	-	-	0,0260003	0,0185716	0,9304302	-	-
					X^*_{final}	203,38992	-	-	7,0724793	5,0369792	58,182142	-	-
	60	7,9882516	6,66E-16	7	α	-0,3650736	-	-	0,0260003	0,0185716	0,9304302	-	-

					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	203,38992	-	-	7,0724793	5,0369792	58,182142	-	-
	40	7,9882516	6,66E-16	7	α	-0,3650736	-	-	0,0260003	0,0185716	0,9304302	-	-
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	203,38992	-	-	7,0724793	5,0369792	58,182142	-	-
\mathbf{G}_C	100	1,068269	1,43E-01	4	α	0,4834582	-	-0,8753675	-	-	-	-	-
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	258,55942	-	16,838145	-	-	-	-	-
	80	1,068269	1,43E-01	4	α	0,4834582	-	-0,8753675	-	-	-	-	-
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	258,55942	-	16,838145	-	-	-	-	-
	60	1,068269	1,43E-01	4	α	0,4834582	-	-0,8753675	-	-	-	-	-
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	258,55942	-	16,838145	-	-	-	-	-
	40	1,068269	1,43E-01	4	α	0,4834582	-	-0,8753675	-	-	-	-	-
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	258,55942	-	16,838145	-	-	-	-	-
\mathbf{G}_A	100	6,4808373	4,56E-11	9	α	0	-0,095148	-0,3318657	0,0317378	0,0226699	0,9154471	0	-0,2030944
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	249,38974	48,422365	13,715383	7,0719936	5,0367314	41,22158	225	9,4735472
	80	7,5344982	2,45E-14	9	α	0	-0,1009344	-0,3358602	0,0274766	0,0196262	0,9121206	0	-0,2095377
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	249,38974	48,075557	12,863753	7,0724601	5,0369694	51,42111	225	9,3685311
	60	8,9287077	0,00E+00	27	α	0	-0,119696	-0,3642078	0,0254921	0,0182086	0,8922754	0	-0,236408
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	249,38974	47,341609	11,388849	7,0796314	5,0406282	64,96588	225	9,1558838
	40	10,789417	0,00E+00	100	α	0	-0,1593816	-0,3584309	0,0275656	0,0196897	0,8773007	0	-0,2744463
					$\mathbf{X}^*_{\text{final}}$	249,38974	44,022596	7,5929873	7,1530363	5,0780798	67,26277	225	8,2629142

Resultados para a viga com diferentes conectores com conectores do tipo perfil U.

Função de falha	η (%)	β	P_f	Nº de iterações	Parâmetros	Variável							
						f_y (MPa)	f_s (MPa)	f_c (MPa)	g_1 (kN/m)	g_2 (kN/m)	q_2 (kN/m)	b (cm)	h_c (cm)
					X^* inicial	250	50	20	7	5	8,5	225	10
G_M	100	4,3528	6,72E-06	5	α	-0,342825	-	0	0,0460139	0,032867	0,9346418	0	-0,075619
					X^* final	224,683	-	19,717117	7,0700647	5,0357473	25,190716	225	9,8683408
	80	4,0948	2,11E-05	5	α	-0,345842	-	0	0,0486142	0,0347244	0,9341819	0	-0,064253
					X^* final	225,87484	-	19,717117	7,0697006	5,0355616	23,508529	225	9,8947311
	60	3,7698	8,17E-05	5	α	-0,351135	-	0	0,0523058	0,0373613	0,932657	0	-0,052185
					X^* final	227,33753	-	19,717117	7,0690713	5,0352405	21,502857	225	9,9212804
	40	3,3601	3,90E-04	5	α	-0,360767	-	0	0,0577612	0,041258	0,9291446	0	-0,038719
					X^* final	229,11808	-	19,717117	7,067985	5,0346862	19,164888	225	9,9479424
G_V	100	7,9883	6,66E-16	7	α	-0,365074	-	-	0,0260003	0,0185716	0,9304302	-	-
					X^* final	203,38992	-	-	7,0724793	5,0369792	58,182142	-	-
	80	7,9883	6,66E-16	7	α	-0,365074	-	-	0,0260003	0,0185716	0,9304302	-	-
					X^* final	203,38992	-	-	7,0724793	5,0369792	58,182142	-	-
	60	7,9883	6,66E-16	7	α	-0,365074	-	-	0,0260003	0,0185716	0,9304302	-	-
					X^* final	203,38992	-	-	7,0724793	5,0369792	58,182142	-	-
	40	7,9883	6,66E-16	7	α	-0,365074	-	-	0,0260003	0,0185716	0,9304302	-	-
					X^* final	203,38992	-	-	7,0724793	5,0369792	58,182142	-	-
G_C	100	1,1308	1,29E-01	4	α	0,4834583	-	-0,875367	-	-	-	-	-
					X^* final	259,10672	-	16,683236	-	-	-	-	-
	80	1,1308	1,29E-01	4	α	0,4834583	-	-0,875367	-	-	-	-	-

				\mathbf{X}^*_{final}	259,10672	-	16,683236	-	-	-	-	-	-
	60	1,1308	1,29E-01	4	α	0,4834583	-	-0,875367	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	259,10672	-	16,683236	-	-	-	-	-
	40	1,1308	1,29E-01	4	α	0,4834583	-	-0,875367	-	-	-	-	-
					\mathbf{X}^*_{final}	259,10672	-	16,683236	-	-	-	-	-
\mathbf{G}_A	100	6,4808	4,56E-11	9	α	0	-0,095148	-0,331866	0,0317378	0,0226699	0,9154471	0	-0,203094
					\mathbf{X}^*_{final}	249,38974	48,422365	13,715383	7,0719936	5,0367314	41,22158	225	9,4735472
	80	7,5345	2,45E-14	9	α	0	-0,100934	-0,33586	0,0274766	0,0196262	0,9121206	0	-0,209538
					\mathbf{X}^*_{final}	249,38974	48,075557	12,863753	7,0724601	5,0369694	51,42111	225	9,3685311
	60	8,9287	0,00E+00	27	α	0	-0,119696	-0,364208	0,0254921	0,0182086	0,8922754	0	-0,236408
					\mathbf{X}^*_{final}	249,38974	47,341609	11,388849	7,0796314	5,0406282	64,96588	225	9,1558838
	40	10,789	0,00E+00	100	α	0	-0,159382	-0,358431	0,0275656	0,0196897	0,8773007	0	-0,274446
					\mathbf{X}^*_{final}	249,38974	44,022596	7,5929873	7,1530363	5,0780798	67,26277	225	8,2629142