

ESDRAS PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE MODELO DE BIELAS E TIRANTES: VIGAS
CURTAS DE CONCRETO ARMADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor. Área de Concentração: Tecnologia da Construção e Estruturas.

Orientador: Prof. EMIL DE SOUZA SÁNCHEZ FILHO, D. Sc.

Niterói
2016

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

O48 Oliveira, Esdras Pereira de

Análise de confiabilidade de modelo de bielas e tirantes : vigas curtas de concreto armado / Esdras Pereira de Oliveira. – Niterói, RJ: [s.n.], 2016..

191.f.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, 2016.

Orientador: Emil de Souza Sánchez Filho.

1. Concreto armado. 2. Confiabilidade (Engenharia). I. Título.

CDD 624.18341

ESDRAS PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE MODELO DE BIELAS E TIRANTES: VIGAS
CURTAS DE CONCRETO ARMADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor. Área de Concentração: Tecnologia da Construção e Estruturas.

Aprovada em 7 de Julho de 2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho. D. Sc.
Universidade Federal Fluminense

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho. D. Sc.
Pontifícia Universidade Católica - Rio

Prof. Osvaldo Luiz de Carvalho Souza. D. Sc.
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. José Kimio Ando. D. Sc.
Universidade Federal Fluminense

Prof. Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro. D. Sc.
Universidade Federal Fluminense

Prof. Sergio Hampshire de Carvalho Santos. D. Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Deane Mesquita Roehl. D. Sc.
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Niterói
2016

A Deus, pela força.
A Osvaldo, meu pai, pelo incentivo.
A Margareth, minha mãe, pela torcida e orações.
A Jéssica, minha esposa, pelo apoio e
compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre esteve comigo em todos os momentos da minha vida, me direcionando, me guiando e me dando forças, mesmo quando as minhas próprias forças se esvaíram, para vencer os desafios da vida; sem ELE eu não chegaria aqui.

Agradeço aos meus pais (Osvaldo e Margareth) que ao longo de suas trajetórias de vida, tanto se deram e se sacrificaram para que eu tivesse acesso à melhor educação que eles tinham e não tinham condição de me conceder; sem eles eu não seria nem teria o que sou e o que tenho hoje. A eles a minha eterna gratidão...

Também agradeço aos meus avós Osvaldo e Adelaide, pelas intensas orações ao longo de toda minha trajetória de vida.

À minha esposa (Jéssica) agradeço pela compreensão, ajuda, companhia e força; que nos nossos primeiros anos de casamento, suportou um esposo um pouco ausente enquanto se empenhava em concluir este trabalho.

Ao meu primeiro orientador, Luiz Eloy Vaz, falecido em 2014, e ao meu orientador atual, Emil de Souza Sánchez Filho, gostaria de agradecer pela sempre constante ajuda, paciência e prontidão à transmissão dos conhecimentos necessários à execução deste trabalho.

À todos os professores da Universidade Federal Fluminense por me transmitirem os conhecimentos e conceitos primordiais, possibilitando a execução deste trabalho.

“Se devo lamentar alguma coisa sobre a vida, lamento a sua brevidade diante de tanto a aprender, tanto a descobrir...”

Esdras Pereira de Oliveira.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo aplicar a análise de confiabilidade a modelos de bielas e tirantes aplicados à vigas curtas de concreto armado, e estudar o comportamento de modelos de bielas diante das variáveis envolvidas. Primeiramente realizou-se um estudo comparativo dos resultados obtidos com um modelo de bielas e tirantes para vigas curtas de concreto, com e sem armadura transversal, com os resultados dos ensaios realizados por BUSCH (2011). Em seguida, aplicou-se a análise de confiabilidade aos modelos de bielas e tirantes apresentados. A abordagem foi feita a partir de cinco exemplos de análise de confiabilidade de vigas curtas de concreto armado, com e sem estribos, considerando-se como variáveis aleatórias a resistência à compressão do concreto f_c , a tensão de escoamento do aço das armaduras longitudinais f_y e transversais f_{yw} , as solicitações permanentes V_g e acidentais V_q , variando essas duas últimas segundo uma proporção definida. O enfoque semi-probabilístico foi definido de acordo com a NBR 6118 (2014) e as ações consideradas normais. O enfoque baseado na análise de confiabilidade foi conduzido a partir dos modelos probabilísticos das variáveis aleatórias consideradas, definidos a partir de referências bibliográficas referentes ao assunto. Foi implementada uma rotina no programa de análise numérica Mathcad, utilizando o método FORM – First Order Reliability Method. A partir dessa rotina foi possível avaliar os fatores de importância relativa das variáveis aleatórias envolvidas nas análises, os índices de confiabilidade e probabilidades de falha inerentes às funções de falha e ao sistema de falha em série, os coeficientes parciais de segurança referentes ao ponto de projeto, calcular as áreas de aço das armaduras longitudinais e transversais com base em análise de confiabilidade, para obter um índice de confiabilidade de referência. Também foi realizada a calibração dos coeficientes parciais de segurança das solicitações permanentes e variáveis. Esta pesquisa contribui com a sistematização de um modelo de bielas e tirantes para aferir resultados experimentais de vigas de concreto armado, aplicando-se a as peças estudadas conceitos da teoria da confiabilidade.

Palavras Chave: Análise de Confiabilidade; Modelo de Bielas e Tirantes; Concreto Armado; Força Cortante; Vigas Curtas.

ABSTRACT

This work aims to apply the reliability analysis to strut and tie models, applied to short reinforced concrete beams, and study the behavior of the strut and tie models with respect to the variables involved. First was carried out a comparative study of the results obtained with a strut and tie model for short concrete beams, with and without transverse reinforcement, and the results of tests performed by BUSCH (2011). After the reliability analysis was applied to the strut and tie models presented. The approach was taken from five reliability analysis examples of short reinforced concrete beams, with and without stirrups, considering as random variables the concrete compression resistance f_c , the steel yield stress of the longitudinal f_y and transverse f_{yw} reinforcement, the permanent loads V_g and the live V_q ranging according to a defined proportion. The semi-probabilistic approach was defined according to the NBR 6118 (2014) and the actions considered as normal. The approach based on reliability analysis was conducted from the probabilistic models of random variables considered, defined from references on the topic. A routine in numerical analysis program Math cad was implemented using the FORM method - First Order Reliability Method. From this routine it was possible to evaluate the relative importance factors of the random variables involved in the analysis, the reliability indices and failure probabilities inherent to the failure functions and system failure in series, the partial safety factors for the design point, obtain steel areas of the longitudinal and transverse reinforcement based on reliability analysis to obtain a reliability index reference. The calibration of partial safety factors was also performed for permanent and variable forces. This research contributes to the systematization of a strut and tie model to measure experimental results of reinforced concrete beams, applying the beams studied concepts of reliability theory.

Keywords: Reliability Analysis, Strut ant Tie Model, Reinforced Concrete, Shear Force, Short Beams.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
2 COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SOLICITADAS À FORÇA CORTANTE	27
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	27
2.1.1 LEONHARDT e WALTHER (1962).....	27
2.2 MECANISMOS INTERNOS RESISTENTES.....	30
2.3 MODOS DE RUPTURA À FORÇA CORTANTE DE VIGAS SEM ARMADURA TRANSVERSAL	31
2.4 MODOS DE RUPTURA À FORÇA CORTANTE DE VIGAS COM ARMADURA TRANSVERSAL	32
3 MODELOS TEÓRICOS PARA VIGAS CURTAS	33
3.1 FATOR DE EFETIVIDADE DO CONCRETO	33
3.2 MODELO DE BIELAS E TIRANTES	34
3.2.1 Tirantes.....	37
3.2.2 Bielas de Concreto	37
3.2.3 Nós	39
3.3 MODELO TEÓRICO ESTUDADO	40
4 VALIDAÇÃO DO MODELO TEÓRICO ADOTADO	43
4.1 ENSAIOS REALIZADOS POR BUSCH (2011)	43
4.1.1 Armaduras, Bitolas e Dimensões.....	43
4.1.2 Propriedades dos Materiais	45
4.1.3 Resultados dos Ensaios.....	46
4.1.4 Análise das Deformações Específicas nas Bielas – Séries V0 e VS.....	47
4.1.5 Análise das Tensões Principais nas Bielas – Séries V0 e VS.....	49
4.1.6 Análise das Tensões nas Armaduras – Séries V0 e VS.....	52
4.1.6 Inclinação das Fissuras – Séries V0 e VS	54
4.2 APLICAÇÃO DO MODELO TEÓRICO AOS ENSAIOS REALIZADOS POR BUSCH (2011)	55
4.2.1 Geometria do Modelo.....	55
4.2.2 Forças nas Bielas e Tirantes	57
4.2.3 Tensões nas Bielas e Tirantes	58
4.3 COMPARAÇÃO MODELO TEÓRICO <i>VERSUS</i> ENSAIOS	59
4.3.1 Comparação das Tensões.....	59
4.3.2 Comparação entre os Ângulos das Fissuras.....	63
5 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL	73
5.1 NOTAS INICIAIS	73
5.2 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	75
5.3 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE.....	77
5.3.1 Distribuição Normal e Normal Padrão.....	77
5.3.2 Distribuição Lognormal.....	78
5.3.3 Distribuição de Valores Extremos	78
5.3.3.1 Distribuição de Gumbel (Máximos e Mínimos).....	79
5.3.3.2 Distribuição Weibull (Máximos e Mínimos).....	79
5.4 TESTE DE ADERÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO À AMOSTRA	80
5.5 CONCEITO DE FUNÇÃO DE FALHA	80
5.5.1 Função de Falha com Várias Variáveis Aleatórias	82
5.5.2 Covariância e Coeficiente de Correlação	82

5.6 MÉTODOS DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	85
5.6.1 Método FOSM	85
5.6.2 Método AFOSM.....	87
5.6.2 Método FORM.....	90
5.6.3 Método SORM	93
5.6.4 Método de Simulação Monte Carlo	95
5.6.5 Medidas de Sensibilidade.....	96
5.7 SISTEMAS DE FALHA	97
5.8 SUPERFÍCIES DE RESPOSTA	101
5.8.1 Polinômios de Lagrange.....	102
5.8.2 Método de Newton-Cotes	103
5.8.3 Método de Gauss.....	103
5.9 CALIBRAÇÃO DE COEFICIENTES DE SEGURANÇA	104
6 FUNÇÕES DE FALHA E VARIÁVEIS ALEATÓRIAS.....	105
6.1 VARIÁVEIS CONSIDERADAS DETERMINÍSTICAS	105
6.2 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	106
6.2.1 Concreto	106
6.2.2 Aço	108
6.2.3 Cargas.....	109
6.2.4 Fatores de Modelagem	111
6.3 FUNÇÕES DE FALHA	112
6.4 ABORDAGEM DAS ANÁLISES	114
6.4.1 Cálculo dos Valores Médios das Solicitações	114
6.4.2 Problemas Encontrados nas Análises e Soluções Adotadas	117
6.4.3 Exemplo I	118
6.4.4 Exemplo II.....	133
6.4.5 Exemplo III	137
6.4.6 Exemplo IV.....	139
6.4.7 Exemplo V	149
4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	165
4.1 CONCLUSÕES.....	165
4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	169
5 REFERÊNCIAS.....	171
ANEXOS	174

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modos de ruptura de vigas sem armadura transversal	28
Figura 2.2 – Vale da força cortante	29
Figura 2.3 – Vale da força cortante em função de a/d e ρ	30
Figura 2.4 – Mecanismos internos resistentes.	31
Figura 3.1 – Princípio de Saint-Venant – região “D”	35
Figura 3.2 – Divisão da estrutura em regiões “B” e “D”	36
Figura 3.3 – Regiões “D1”, “D2” e “D3”	36
Figura 3.4 – Tipos de bielas: a) prismática, b) em forma de leque, c) em forma de garrafa.	38
Figura 3.5 – Tipos de bielas e condições para sua formação	39
Figura 3.6 – Tipos de nós: a) CCC, b) CCT, c) CTT, d) TTT	39
Figura 3.7 – Modelo teórico para vigas curtas proposto por JENNEWEIN e SCHÄFER (1992).	41
Figura 3.8 – Fluxograma do modelo teórico para regiões D2.	42
Figura 4.1 – Parâmetros das vigas da série V0.	43
Figura 4.2 – Parâmetros das vigas da série VS.	44
Figura 4.3 – Posição dos extensômetros, vigas da série V0	45
Figura 4.4 – Posição dos extensômetros nos estribos, vigas da série VS;	45
Figura 4.5 – Geometria dos nós.	57
Figura 4.6 – Razão de tensão para as armaduras longitudinais, vigas série V0.	61
Figura 4.7 – Razão de tensão para as bielas, vigas série V0.	61
Figura 4.8 – Razão de tensão para as armaduras longitudinais, vigas série VS.	62
Figura 4.9 – Razão de tensão para as armaduras transversais, vigas série VS.	62
Figura 4.10 – Razão de tensão para as bielas, vigas série VS.	63
Figura 4.11 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{cr} , vigas série V0.	66
Figura 4.12 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{cr} , vigas série V0.	66
Figura 4.13 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta_{mín}/\theta_{cr}$, vigas série V0.	67
Figura 4.14 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta_{mín}/\theta_{cr}$, vigas série V0.	67
Figura 4.15 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta/\theta_{mín}$, vigas série V0.	68
Figura 4.16 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta/\theta_{mín}$, vigas série V0.	69
Figura 4.17 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{cr} , vigas série VS.	69
Figura 4.18 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{cr} , vigas série VS.	70
Figura 4.19 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta_{mín}/\theta_{cr}$, vigas série VS.	70
Figura 4.20 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta_{mín}/\theta_{cr}$, vigas série VS.	71
Figura 4.21 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta/\theta_{mín}$, vigas série VS.	71
Figura 4.22 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta/\theta_{mín}$, vigas série VS.	72
Figura 5.1 – PDF e CDF, respectivamente.	76
Figura 5.2 – Representação da função de falha.	81
Figura 5.3 – Interpretação gráfica do coeficiente de correlação.	84
Figura 5.4 – Função de falha não linear aproximada por uma função linear em torno da média	85
Figura 5.5 – Função de densidade de probabilidade da função de falha, admitida como variável aleatória com distribuição normal.	86
Figura 5.6 – Função de falha não linear aproximada por uma função linear em torno do ponto de projeto;	87
Figura 5.7 – Transformação do espaço normal para o espaço normal padrão reduzido;	88
Figura 5.8 – Busca pelo ponto de projeto y^* ;	89
Figura 5.9 – Transformação de uma distribuição qualquer em normal equivalente em um determinado ponto.	91

Figura 5.10 – Aproximação do método FORM, superfícies côncavas e convexas;.....	92
Figura 5.11 – FORM x SORM: comparação da aproximação feita em torno do ponto de projeto;.....	93
Figura 5.12 – Rotação das variáveis normais padrão reduzidas.....	94
Figura 5.13 – Exemplo de aplicação do método de simulação de Monte Carlo.	96
Figura 5.14 – Tipos de sistemas, esquematicamente.....	97
Figura 5.15 – Domínio de falha do sistema em série e em paralelo;.....	98
Figura 5.16 – Variação do β_{serie} versus $\rho_{i,j}$; SORENSEN (2004).....	100
Figura 5.17 – Relação entre $\rho_{i,j}$ e β_{serie} ; SORENSEN (2004).	101
Figura 6.1 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável kq , vigas série V0 – $ad = 0,74$	120
Figura 6.2 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável kq , vigas série V0 – $ad = 0,96$	120
Figura 6.3 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável kq , vigas série V0 – $ad = 1,38$	121
Figura 6.4 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável kq , vigas série V0 – $ad = 1,60$	121
Figura 6.5 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável kq , vigas série VS – $ad = 0,74$	122
Figura 6.6 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável kq , vigas série VS – $ad = 0,96$	122
Figura 6.7 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável kq , vigas série VS – $ad = 1,38$	123
Figura 6.8 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável kq , vigas série VS – $ad = 1,60$	123
Figura 6.9 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação à razão ad , vigas série V0 – $kq = 0,4$	125
Figura 6.10 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação à razão ad , vigas série VS – $kq = 0,4$	126
Figura 6.11 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δq , série V0 – $ad = 0,74$	129
Figura 6.12 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δq , série V0 – $ad = 0,96$	130
Figura 6.13 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δq , série V0 – $ad = 1,38$	130
Figura 6.14 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δq , série V0 – $ad = 1,60$	131
Figura 6.15 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δq , série VS – $ad = 0,74$	131
Figura 6.16 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δq , série VS – $ad = 0,96$	132
Figura 6.17 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δq , série VS – $ad = 1,38$	132
Figura 6.18 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δq , série VS – $ad = 1,60$	133
Figura 6.19 – Variação do índice de confiabilidade do sistema (C.F.M.) e (S.F.M.) em relação ao percentual de carga variável e razões ad , séries V0 e VS.....	135
Figura 6.20 – Variação da área de aço da armadura longitudinal com a razão ad e com o percentual de carga variável kq , para $\beta_{sist} = 3,8$, série V0.....	145

Figura 6.21 – Variação da área de aço da armadura longitudinal com a razão ad e com o percentual de carga variável kq , para $\beta_{sist} = 3,8$, série VS.....	145
Figura 6.22 – Variação da área de aço da armadura transversal com a razão ad e com o percentual de carga variável kq , para $\beta_{sist} = 3,8$, série VS.....	146
Figura 6.23 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série V0 – $ad = 0,74$	153
Figura 6.24 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série V0 – $ad = 0,96$	154
Figura 6.25 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série V0 – $ad = 1,38$	155
Figura 6.26 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série V0 – $ad = 1,60$	156
Figura 6.27 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série VS – $ad = 0,74$	157
Figura 6.28 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série VS – $ad = 0,96$	158
Figura 6.29 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série VS – $ad = 1,38$	159
Figura 6.30 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série VS – $ad = 1,60$	160
Figura 6.31 – Função de densidade de probabilidade da frequência de carregamento variável.	161
Figura 6.32 – Superfícies de erros, série – V0.....	163
Figura 6.33 – Superfícies de erros, série – VS.	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Mecanismos resistentes e modos de ruptura – trabalhos de referência.	31
Tabela 3.1 – Características das análises das regiões “B” e “D”.	35
Tabela 4.1 – Propriedades dos materiais,	46
Tabela 4.2 – Força última e deformações específicas,	46
Tabela 4.3 – Deformações específicas principais, Série V0,.....	49
Tabela 4.4 – Deformações específicas principais, Série VS,	49
Tabela 4.5 – Módulos de elasticidade, deformações específicas e número de plasticidade, FIB Model Code 2010.	50
Tabela 4.6 – Tensões principais atuantes nas bielas, Séries V0 e VS.	52
Tabela 4.7 – Tensões nas armaduras.	54
Tabela 4.8 – Inclinações médias das fissuras	54
Tabela 4.9 – Parâmetros geométricos.	57
Tabela 4.10 – Forças no modelo de bielas e tirantes proposto por JENNEWEIN e SCHÄFER (1992).	58
Tabela 4.11 – Tensões nas armaduras e bielas, modelo de bielas e tirantes.	59
Tabela 4.12 – Razão de tensão, experimental/modelo.	60
Tabela 4.13 – Razão entre ângulos de fissuras.	65
Tabela 5.1 – Classes de consequência de falha, grau de impacto e exemplo;.....	74
Tabela 5.2 – Classes de consequências; EUROCODE EN 1990 (2002).	74
Tabela 5.3 – Índices de confiabilidade de referência β_r ; EUROCODE EN 1990 (2002).	75
Tabela 5.4 – Grau de dependência entre as variáveis; MELCHERS (2002).	84
Tabela 5.5 – Relação entre β e P_f	86
Tabela 6.1 – Desvio padrão de dosagem do concreto; NBR 12655 (2006).	108
Tabela 6.2 – Modelo probabilístico do concreto.	108
Tabela 6.3 – Modelo probabilístico do aço.	109
Tabela 6.4 – Proporções de carga permanente e acidental em relação à carga total.	111
Tabela 6.5 – Modelo probabilístico das cargas.	111
Tabela 6.6 – Modelo probabilístico dos fatores de modelagem.	112
Tabela 6.7 – Valores médios para as solicitações.	117
Tabela 6.8 – Valores para os modelos probabilísticos das resistências do concreto, do aço e das ações, exemplo I.	119
Tabela 6.9 – Valores para os modelos probabilísticos das resistências do concreto, do aço e das ações, exemplo II.	134
Tabela 6.10 – Valores para os modelos probabilísticos das resistências do concreto, do aço e das ações, exemplo III.	138
Tabela 6.11 – Valores para os modelos probabilísticos das resistências do concreto, do aço e das ações, exemplo IV.	141
Tabela 6.12 – Resultados do dimensionamento segundo a análise de confiabilidade.	144
Tabela 6.13 – Coeficientes parciais de segurança para as funções de falha que governaram o sistema de falha.	148
Tabela 6.14 – Coeficientes parciais de segurança.	150
Tabela 6.15 – Valores para os modelos probabilísticos das resistências do concreto, do aço e das ações, exemplo V.	151
Tabela 6.16 – Frequência relativa do carregamento variável.	161
Tabela 6.17 – Coeficientes parciais de segurança calibrados e erro mínimo.	162
Tabela 7.1 – Comparação entre os ensaios realizados por BUSCH (2011) e o modelo de bielas e tirantes adotado.	165

SÍMBOLOS

a) Letras romanas maiúsculas

A_{sl}	área de aço das armaduras longitudinais
A_{sw}	área da armadura transversal por unidade de comprimento
E	módulo de elasticidade
E_{c1}	módulo de elasticidade secante
E_{ci}	módulo de elasticidade tangente
E_m	módulo de elasticidade médio
F	carga pontual aplicada
F_b	força de compressão atuante na biela comprimida de concreto
F_{bg}	parcela da carga permanente atuante na biela comprimida de concreto
F_{bq}	parcela da carga acidental atuante na biela comprimida de concreto
F_d	ações de cálculo
F_g	parcela da carga permanente da carga pontual aplicada
F_k	ações características
F_q	parcela da carga acidental da carga pontual aplicada
G	função de falha
G_i	função de falha i
H_0	largura da biela na interface biela – nó superior
H_2	largura da biela na interface biela – nó inferior
I_i	fator de importância relativa associado à variável aleatória i
$L_i(\gamma_g)$	polinômio de Lagrange definido a partir dos coeficientes parciais de segurança aplicados às ações permanentes γ_g
$L_j(\gamma_q)$	polinômio de Lagrange definido a partir dos coeficientes parciais de segurança aplicados às ações permanentes γ_q
M_{FL}	momento de flexão teórico resistente
M_{cr}	momento de flexão crítico resistente obtido no ensaio
P	carga pontual aplicada
R	resistência estrutural
R_d	resistência de cálculo
S	solicitações
S_d	solicitação de cálculo

T	força na armadura longitudinal de flexão por unidade de comprimento
T_1	força de ancoragem no nó 1
T_{1g}	parcela da carga permanente da força de ancoragem no nó 1
T_{1q}	parcela da carga acidental da força de ancoragem no nó 1
T_{1R}	força de ancoragem resistente no nó 1
T_{1Rd}	força de ancoragem resistente relacionado ao escoamento da armadura longitudinal na ancoragem;
T_{1S}	força de ancoragem solicitante no nó 1
T_2	força de ancoragem no nó 2
T_{2Rd}	força de ancoragem resistente relacionado à aderência do concreto à armadura longitudinal
T_R	força de tração resistente da armadura longitudinal
T_{Rd}	força de tração resistente da armadura longitudinal
T_T	força acumulada na armadura longitudinal até o meio do vão da viga
T_{Tg}	parcela da carga permanente da força acumulada na armadura longitudinal até o meio do vão da viga
T_{Tq}	parcela da carga acidental da força acumulada na armadura longitudinal até o meio do vão da viga
T_{Ts}	força solicitante acumulada na armadura longitudinal até o meio do vão da viga
V	força no estribo por unidade de comprimento
V_a	parcela do atrito proveniente do engrenamento dos agregados do concreto
V_c	parcela da contribuição do concreto não fissurado do banzo comprimido
V_d	parcela do efeito de pino proveniente da armadura longitudinal de tração
V_R	força cortante resistente quando do escoamento da armadura transversal
V_{Rd}	força cortante resistente quando do escoamento da armadura transversal
V_T	força cortante total acumulada ao longo do comprimento a_L
V_{Tg}	parcela da carga permanente da força cortante total acumulada ao longo do comprimento a_L
V_{Tq}	parcela da carga acidental da força cortante total acumulada ao longo do comprimento a_L
V_{Ts}	força solicitante cortante total acumulada ao longo do comprimento a_L
$W(\gamma_g, \gamma_q)$	superfície de erro obtida em função dos fatores parciais de segurança
X_d	variáveis de resistência de cálculo

X_k	variáveis de resistência característica
Y_d	variáveis de solicitação de cálculo
Y_k	variáveis de solicitação característica

b) Letras romanas minúsculas

a	distância da carga pontual ao centro do apoio
a_1	largura do apoio
a_2	largura da placa de aplicação de carga
a_L	distância entre a face interna do apoio à face do console de aplicação da carga
b	largura da viga
c	cobrimento
d	altura útil da viga
f_b	resistência de aderência média
f_c	resistência à compressão
f'_c	resistência à compressão efetiva do concreto fissurado
f_{cd}	resistência à compressão de cálculo do concreto
f_{cj}	resistência à compressão média do concreto à compressão prevista para a idade j dias
f_{ck}	resistência à compressão característica do concreto
f_{cm}	resistência à compressão média do concreto
f_{ct}	resistência média do concreto à tração
f_y	resistência à tração média do concreto
f_{yd}	tensão de escoamento de cálculo do aço
f_{yk}	tensão de escoamento característica do aço da armadura longitudinal
f_{ym}	tensão de escoamento média do aço
f_{ywd}	tensão de escoamento de cálculo do aço da armadura transversal
f_{ywk}	tensão de escoamento característica do aço da armadura transversal
f_{sm}	resistência à tração média do aço
f_{sw}	resistência à tração do aço da armadura transversal
f_{tm}	resistência à tração média do concreto
h	altura da viga
h_0	altura do prisma triangular que compõem o nó 2
h_1	altura do paralelepípedo que compõem o nó 2

h_2	altura do nó no apoio
k	número de plasticidade
k_g	proporção de carga permanente
k_q	proporção de carga acidental
l_b	comprimento de ancoragem reta da armadura longitudinal sobre o apoio, da face do apoio até a curva do gancho
n	número de barras ancoradas no nó
n_l	número de barras da armadura longitudinal
n_w	número de barras da armadura transversal
p_f	probabilidade de falha
p_{fi}	probabilidade de falha associada à função de falha i
p_{fr}	probabilidade de falha de referência
$p_{f\text{sist}}$	probabilidade de falha do sistema em série
w_{k_q}	frequência relativa do carregamento variável
x	profundidade da linha neutra
y^*	ponto de projeto
z	braço de alavanca

c) Letras gregas

α_b	coeficiente aplicável ao comprimento de ancoragem para considerar o efeito favorável da presença de gancho
β	índice de confiabilidade
β_i	índice de confiabilidade associado à função de falha i
β_r	índice de confiabilidade de referência
β_{sist}	índice de confiabilidade do sistema em série
β_{sist}^n	índice de confiabilidade do sistema em série com n funções de falha
$\beta_{\text{sist}_{k_q}}(\gamma_g, \gamma_q)$	índice de confiabilidade do sistema obtida a partir dos coeficientes parciais de segurança γ_g e γ_q , referente a um determinado percentual de carga variável k_q
γ_c	coeficiente de minoração da resistência do concreto
γ_f	coeficiente de majoração das solicitações
γ_g	coeficiente parcial de segurança aplicado às solicitações permanentes
γ_i	coeficiente parcial de segurança aplicado à variável aleatória i

γ_q	coeficiente parcial de segurança aplicado às solicitações variáveis
γ_s	coeficiente de minoração da resistência do aço
γ_x	coeficiente parcial de segurança aplicado à resistência
γ_{xy}	distorção no plano xy
γ_y	coeficiente parcial de segurança aplicado à solicitação
ε_1	deformação específica principal máxima
ε_2	deformação específica principal mínima
ε_{45°	deformação específica à 45°
ε_c	deformação específica de compressão atuante
ε_{c1}	deformação específica lida para a máxima tensão de compressão
$\varepsilon_{c,lim}$	deformação específica limite (trecho de abrandamento de tensões)
ε_{ct}	deformação específica de tração atuante
ε_{SGi}	deformação específica lida no extensômetro i
ε_x	deformação específica à 0°
ε_y	deformação específica à 90°
$\theta_{máx}$	inclinação das deformações específicas principais máximas
$\theta_{mín}$	inclinação das deformações específicas principais mínimas
σ	tensão solicitante; desvio padrão
σ_1	tensão principal máxima no concreto
σ_{1d}	tensão principal máxima no concreto, biela direita
σ_{1e}	tensão principal máxima no concreto, biela esquerda
σ_2	tensão principal mínima no concreto
σ_{2d}	tensão principal mínima no concreto, biela direita
σ_{2e}	tensão principal mínima no concreto, biela esquerda
σ_{adm}	tensão admissível
$\sigma_{b,m}$	tensões na metade do comprimento da biela
$\sigma_{b,ni}$	tensões nas interfaces biela – nó inferior
$\sigma_{b,ns}$	tensões nas interfaces biela – nó superior
σ_c	tensão de compressão atuante no concreto
σ_{ce}	máxima tensão de compressão na biela obtida nos resultados experimentais, considerando a biela esquerda e direita
σ_{ct}	tensão de tração atuante no concreto
σ_{est}	tensão nos estribos

σ_{fcm}	desvio padrão de dosagem do concreto
σ_{lim}	tensão limite para o material (valor médio obtido em ensaios)
σ_{long}	tensão nas armaduras longitudinais
σ_s	desvio padrão da tensão de escoamento do aço
$\sigma_{s,ap}$	tensão de compressão atuante sobre o apoio
σ_{sd}	tensão de cálculo no tirante
$\sigma_{s,pc}$	tensão de compressão sob a placa de aplicação de carga
σ_{SGi}	tensão calculada a partir das deformação específica lida no extensômetro i
σ_t	tensão solicitante de cálculo no tirante
σ_{te}	máxima tensão de tração na biela obtida nos resultados experimentais, considerando a biela esquerda e direita
ϕ_l	diâmetro das barras da armadura longitudinal
ϕ_R	fator de modelagem para efeito das resistências
ϕ_s	fator de modelagem para efeito das solicitações
ϕ_w	diâmetro das barras da armadura transversal
$\phi\beta_{sist_{k_q}}(\gamma_g, \gamma_q)$	superfície de resposta em termo de índice de confiabilidade do sistema obtida a partir dos coeficientes parciais de segurança γ_g e γ_q , referente a um determinado percentual de carga variável k_q
δ	coeficiente de variação
δ_g	coeficiente de variação para a carga permanente
δ_q	coeficiente de variação para a carga acidental
δ_s	coeficiente de variação para o aço
θ	inclinação da biela
θ_{cr}	inclinação média das fissuras principais
μ	média
μF	valor médio da solicitação
ν	fator de efetividade do concreto
ρ	taxa de armadura longitudinal
η_1	coeficiente relacionado à ancoragem função do tipo de barra (lisa, nervurada ou entalhada)
η_2	coeficiente relacionado à ancoragem função da posição da barra (região de boa ou má aderência)
η_3	coeficiente relacionado à ancoragem função do diâmetro da barra

d) Siglas

E.L.U.	Estado limite último
E.L.S.	Estado limite de serviço
LRFD	Load and Resistance Factor Design
SPDO	Semi-Probabilistic Design Optimization
PDF	Probability Density Function
CDF	Cumulative Density Function
FOSM	First Order Second Moment
AFOSM	Advanced First Order Second Moment
FORM	First Order Reliability Method
SORM	Second Order Reliability Method
FS	Fator de segurança
JCSS	Joint Committee on Structural Safety
C.F.M.	Com os fatores de modelagem
S.F.M.	Sem os fatores de modelagem
V0	Série de vigas sem armadura transversal
VS	Série de vigas com armadura transversal

1. INTRODUÇÃO

Toda a estrutura deve ser concebida e projetada de modo a garantir o bom desempenho de suas funções, durabilidade e segurança sob as diversas solicitações as quais estará submetida ao longo de sua vida útil.

Entretanto, as variáveis envolvidas no desenvolvimento do projeto estrutural têm aleatoriedades presentes durante toda a sua vida útil.

Dentre as diversas incertezas a considerar, citam-se os parâmetros geométricos, as propriedades mecânicas, a distribuição e a intensidade das solicitações permanentes e variáveis, os modelos de cálculo dos elementos estruturais e etc.

O primeiro método que abordou a segurança das estruturas foi o método das tensões admissíveis. Esse método foi desenvolvido de modo a garantir que as seções críticas dos elementos estruturais não fossem submetidas a tensões superiores a uma tensão admissível. As tensões e deformações, nos casos mais simples, eram analisadas segundo os métodos consagrados da Resistência dos Materiais e, nos demais casos, segundo a Teoria da Elasticidade.

No método das tensões admissíveis, as incertezas são consideradas com um único fator de segurança global aplicado à tensão limite, sendo o critério de projeto definido como:

$$\sigma \leq \sigma_{adm} = \frac{\sigma_{lim}}{FS} \quad (1.1)$$

onde

σ – tensão solicitante;

σ_{adm} – tensão admissível;

σ_{lim} – tensão limite para o material (valor médio obtido em ensaios);

FS – fator de segurança.

Durante um longo período, a evolução do conhecimento acerca do comportamento estrutural, do comportamento dos materiais e da distribuição dos carregamentos foram computados a partir da diversificação e redução dos fatores de segurança.

Devido à limitação do método das tensões admissíveis e à necessidade de um conhecimento apurado dos riscos envolvidos no processo de dimensionamento, surgiu a ideia de estados limites, que representou o desenvolvimento da segurança estrutural sob um enfoque semi-probabilístico.

Os estados limites, Estado Limite Último – E.L.U. e Estado Limite de Serviço – E.L.S., podem ser entendidos como as condições a partir das quais a estrutura como um todo, ou um elemento estrutural, apresentam comportamentos inadequados às suas funções.

O método dos estados limites é o principal método de dimensionamento utilizado atualmente em normas nacionais e internacionais, sendo o critério de projeto para o E.L.U. definido como:

$$R_d(X_d) \geq \sum S_d(Y_d) \quad (1.2)$$

sendo

$$X_d = \gamma_x X_k \quad (1.3)$$

$$Y_d = \gamma_y Y_k \quad (1.4)$$

O método dos estados limites é um método semi-probabilístico. Em estruturas de concreto armado o método dos estados limite utiliza coeficientes parciais de segurança γ_f , γ_c e γ_s aplicados, respectivamente, às ações características F_k , à resistência à compressão característica do concreto f_{ck} e à tensão de escoamento do aço f_{yk} , obtendo-se os seus respectivos valores de dimensionamento F_d , f_{cd} e f_{yd} .

As aproximações de projeto, a variabilidade e a simultaneidade das ações são computadas a partir dos coeficientes γ_f , que consideram o tipo de ação (permanente, variável ou deformação imposta), o tipo de carregamento e o efeito favorável ou desfavorável do carregamento para a estrutura.

Os coeficientes parciais de segurança γ_f constantes em normas são definidos (calibrados) de modo a se obter uma uniformidade no índice de confiabilidade β , adequado ao tipo de projeto. Esses coeficientes possibilitam considerar simplificada o comportamento real dos materiais e as incertezas das variáveis aleatórias envolvidas no processo de dimensionamento, possibilitando uma resposta mais próxima da realidade tanto para as ações, como para o comportamento estrutural.

Os valores característicos são obtidos a partir de seus parâmetros estatísticos: média μ , desvio padrão σ ou coeficiente de variação δ , e a função de distribuição de probabilidade.

Notadamente nos últimos anos a teoria da confiabilidade vem se apresentando como o próximo método a ser utilizado para o dimensionamento das estruturas, em substituição ao método semi-probabilístico. A teoria da confiabilidade aplicada às estruturas proporciona

maior segurança, pois adota métodos probabilísticos que possibilitam a caracterização realista da resistência estrutural R e das solicitações S .

As variáveis são classificadas em variáveis aleatórias e variáveis determinísticas. As variáveis aleatórias são aquelas que apresentam incertezas em relação à estrutura. As variáveis determinísticas são aquelas cujos valores são considerados previsíveis ou com pequena variabilidade.

As variáveis aleatórias são definidas a partir da média, desvio padrão ou coeficiente de variação, uma medida de correlação entre as variáveis aleatórias e uma função de densidade de probabilidade.

A teoria da confiabilidade verifica a probabilidade de ser violado o estado limite, sendo essa probabilidade nomeada como probabilidade de falha p_f . Também é possível quantificar a segurança da estrutura a partir do índice de confiabilidade β , sendo esse associado à probabilidade de falha p_f .

Dada uma determinada resistência R e uma solicitação S , a violação de um estado limite pode ser escrita de duas formas:

$$G(R, S) = R - S < 0 \quad (1.5)$$

$$G(R, S) = \frac{R}{S} < 1 \quad (1.6)$$

No método dos estados limites é conferida à estrutura uma margem de segurança, associada a um índice de confiabilidade β . Essa segurança é garantida por meio dos coeficientes parciais de segurança que consideram a aleatoriedade da intensidade e distribuição das ações, das propriedades mecânicas e de outras incertezas envolvidas no processo de dimensionamento das estruturas. Um determinado índice de confiabilidade β_a é garantido à estrutura mediante a definição (calibração) dos coeficientes parciais de segurança.

O dimensionamento baseado na teoria da confiabilidade é superior, pois considera as variáveis aleatórias individualmente a partir de suas propriedades estatísticas, visando um índice de confiabilidade compatível com a consequência de falha da estrutura.

Além de possibilitar o dimensionamento da estrutura, a teoria da confiabilidade permite:

- calibrar os coeficientes parciais de segurança;
- quantificar a segurança de uma seção, elemento estrutural ou da estrutura como um todo;

- compatibilizar consumo e segurança de uma estrutura a partir do controle e utilização dos materiais;
- definir planos de inspeção mais eficientes e direcionados.

Este trabalho tem como objetivo estudar os ensaios de BUSCH (2011), que testou oito vigas curtas armadas longitudinalmente, sendo quatro dessas vigas sem armadura transversal e as outras quatro vigas com armadura transversal. Cada uma das quatro vigas de cada grupo tem razão a/d igual a 0,74, 0,96, 1,38 e 1,6, onde a é a distância da força aplicada ao centro do apoio, e d a altura útil da viga.

Esses resultados experimentais são confrontados com o modelo de bielas e tirantes proposto por JENNEWEIN e SCHÄFER (1992), com vistas à calibração do modelo teórico estudado.

Também são realizadas análises de confiabilidade do modelo de bielas e tirantes, proposto por JENNEWEIN e SCHÄFER (1992), aplicado a vigas curtas de concreto armado com e sem estribos transversais, solicitadas à força cortante, cujos objetivos são:

- quantificar a segurança das vigas curtas a partir do modelo de bielas e tirantes;
- definir a importância relativa das variáveis envolvidas;
- avaliar a importância dos modelos probabilísticos adotados para as variáveis aleatórias;
- definir valores de coeficientes parciais de segurança para solicitações permanentes γ_g e variáveis γ_q , que minimizem o erro entre o índice de confiabilidade do sistema em série β_{sist}^n e um índice de referência β_r .

Este capítulo apresenta uma breve introdução do tema a ser abordado, as justificativas para o tema, os objetivos a serem alcançados e como o trabalho se encontra organizado.

O capítulo 0 apresenta uma breve descrição do comportamento das vigas de concreto armado, com e sem armadura transversal, solicitadas à força cortante, os mecanismos internos resistentes e os modos de ruptura.

O capítulo 0 aborda o fator de efetividade do concreto, os teoremas do limite superior e inferior, a conceituação, características e equações dos modelos de bielas e tirantes.

O capítulo 0 traz um resumo dos ensaios realizados por BUSCH (2011) e realiza uma comparação entre os resultados do modelo teórico de bielas e tirantes adotado com os resultados obtidos nos ensaios realizados por este autor.

No capítulo 0 é apresentado um breve resumo da evolução dos métodos utilizados no dimensionamento de estruturas. Depois é definida a análise de confiabilidade, os conceitos de função de falha; são apresentados os métodos FOSM, AFOSM, FORM, SORM e simulação de Monte Carlo. São abordadas as características relevantes à definição do índice de confiabilidade, as variáveis aleatórias correlacionadas e não correlacionadas e os sistemas de falha. Também é abordado o conceito de superfície de resposta e a calibração dos coeficientes de segurança.

O capítulo 0 traz a aplicação da análise de confiabilidade aos modelos de bielas e tirantes aplicados às vigas curtas de concreto armado com e sem estribos transversais. As variáveis determinísticas e aleatórias envolvidas, as funções de falha empregadas e os resultados obtidos das análises resultantes dos cinco exemplos desenvolvidos.

O capítulo 4 apresenta as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

2 COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SOLICITADAS À FORÇA CORTANTE

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo são descritos os comportamentos das vigas de concreto armado solicitadas à força cortante. É apresentada uma revisão bibliográfica dos modelos teóricos que descrevem os diversos modos de ruptura de vigas solicitadas à força cortante com as parcelas de carga resistidas por cada uma das partes envolvidas. São apresentados os resultados de pesquisas experimentais de vigas solicitadas à força cortante, com e sem estribos de aço, variando-se a razão a/d , onde a é a distância da carga pontual aplicada no meio do vão ao centro do apoio e d é a altura útil da viga.

Dentre os diversos fatores que influenciam a resistência à força cortante nas vigas estudadas destaca-se a razão entre a distância da carga pontual ao centro do apoio e a altura útil, sendo esse parâmetro preponderante no comportamento do elemento estrutural na ruptura. São apresentados, resumidamente, estudos realizados por LEONHARDT e WALTHER (1962), e KANI (1966).

2.1.1 LEONHARDT e WALTHER (1962)

Os mecanismos de ruptura de vigas de concreto solicitadas à força cortante e as variáveis envolvidas nessa análise foram estudados por LEONHARDT e WALTHER (1962). A Figura 0.1 apresenta o resultado de um dos experimentos, onde dez vigas sem armadura transversal foram ensaiadas à força cortante, variando-se a razão a/d . Observa-se que o aspecto da fissuração e o modo de ruptura se modificam em função dessa razão.

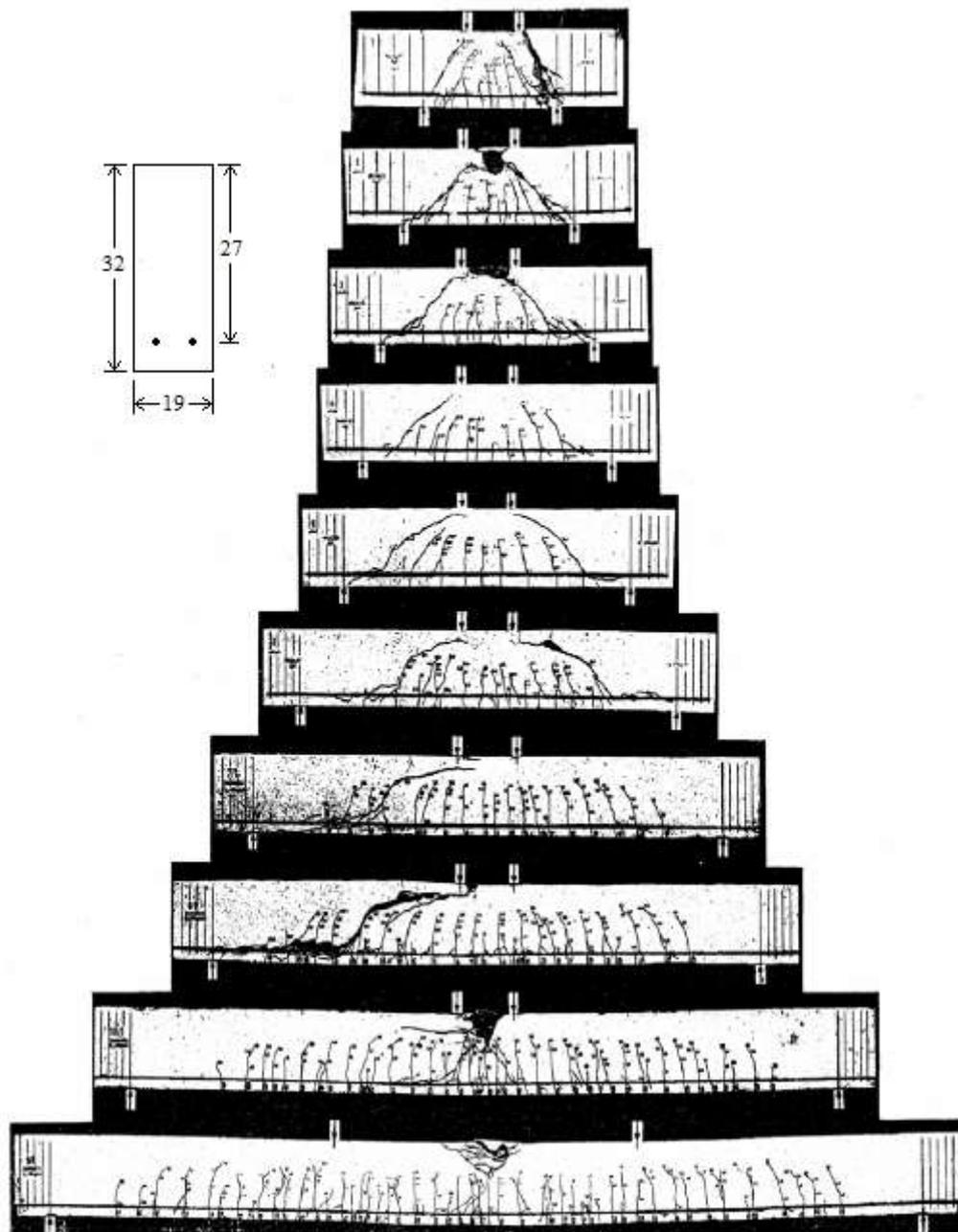


Figura 0.1 – Modos de ruptura de vigas sem armadura transversal

Fonte: LEONHARDT e WALTHER (1962).

- **KANI (1966)**

G. N. Kani realizou na Universidade de Toronto centenas de ensaios de vigas de concreto armado solicitadas à força cortante. O objetivo desses ensaios foi avaliar o comportamento e a resistência das vigas considerando a razão a/d como principal variável.

As vigas eram desprovidas de armadura transversal e foram divididas em séries com as mesmas características físicas e geométricas, com a razão $1,0 \leq a/d \leq 7,0$. Cada série de vigas tinha a mesma seção transversal e foi executada com concreto de mesma resistência.

A Figura 0.2 mostra o resultado da análise de Kani, onde M_u é o momento último obtido no ensaio e M_{FL} é o momento de flexão teórico resistido pela viga.

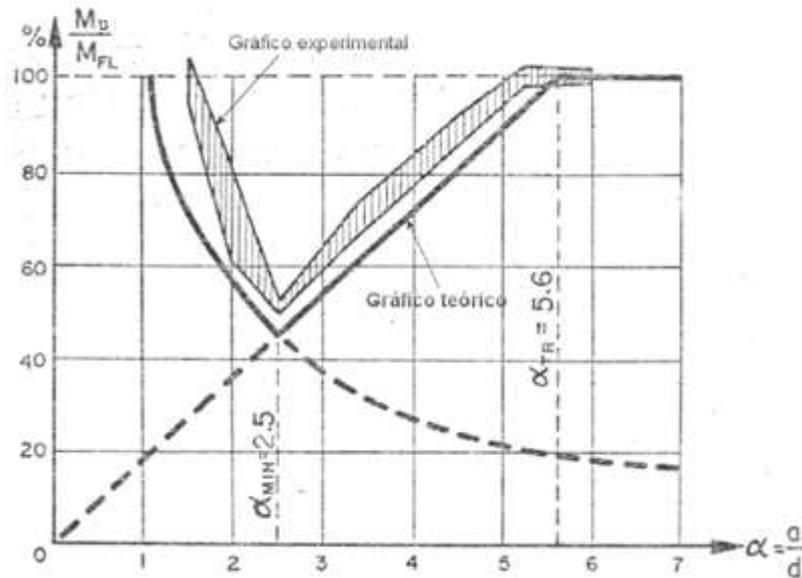


Figura 0.2 – Vale da força cortante

Fonte: KANI (1966).

A Figura 0.2 mostra como o parâmetro a/d afeta o comportamento da viga, onde se observa que para:

- $a/d = 2,5$ tem-se a menor resistência da viga;
- $a/d \geq 5,6$ a ruptura ocorre por flexão;
- $a/d > 2,5$ a ruptura depende da resistência das bielas que se formam entre as fissuras;
- $a/d < 2,5$ predomina o efeito de arco.

KANI (1966) também observou que a resistência do concreto não teve um efeito significativo sobre a resistência da viga. Outro fator importante observado foi que quanto menor é a taxa de armadura longitudinal ρ , mais dúctil é a viga, daí a possível ruptura ocorrer por flexão, conforme se observa na Figura 0.3.

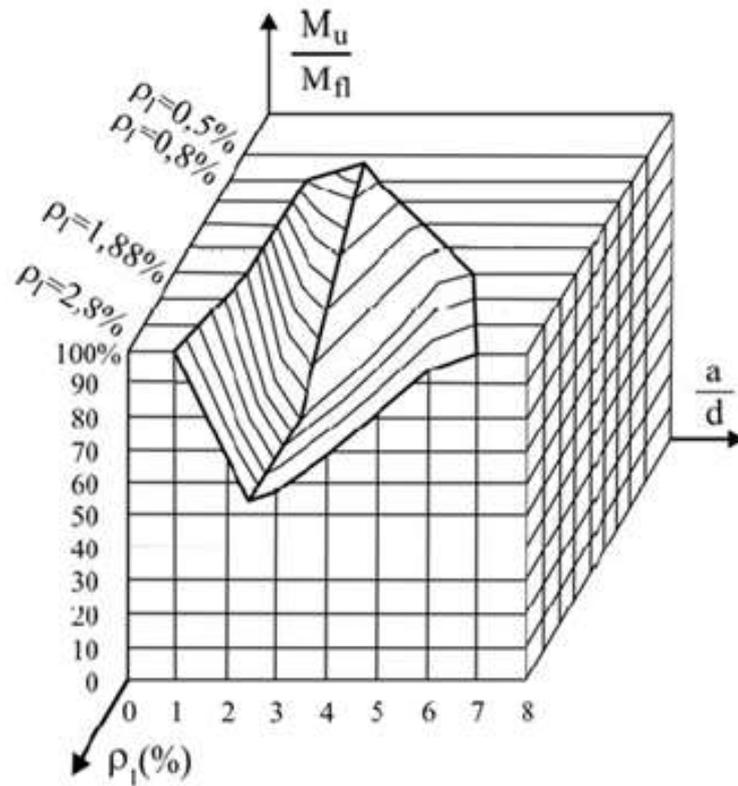


Figura 0.3 – Vale da força cortante em função de a/d e ρ

Fonte: KANI (1966).

2.2 MECANISMOS INTERNOS RESISTENTES

A força cortante solicitante é transferida para a viga por meio de três mecanismos básicos (Figura 0.4), cada um resistindo a uma parcela da força cortante solicitante:

- parcela da contribuição do concreto não fissurado do banzo comprimido V_c ;
- parcela do efeito de pino proveniente da armadura longitudinal de tração V_d ;
- parcela do atrito proveniente do engrenamento dos agregados do concreto V_a .

Há ainda uma parcela de contribuição adicional proveniente do efeito de arco que se dá em regiões de descontinuidade, definidas no capítulo 0.

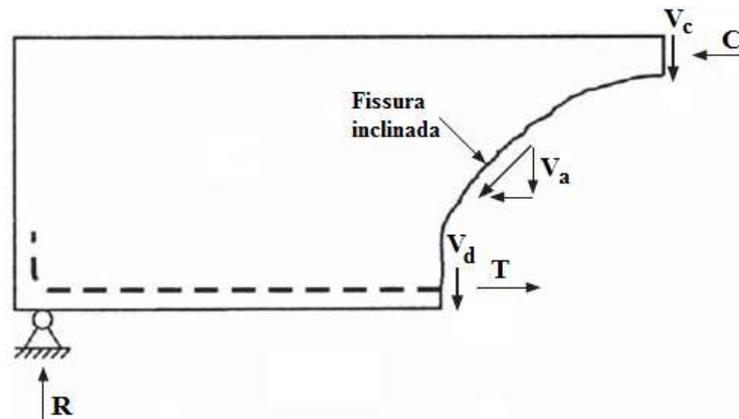


Figura 0.4 – Mecanismos internos resistentes.

Diversos autores têm realizado pesquisas para se determinar a parcela de cada um desses mecanismos nas vigas. Segundo ZIARA (1993), KIM e PARK (1996), após a formação das fissuras inclinadas no concreto a contribuição de cada mecanismo é de:

- 15% a 25% proveniente do efeito de pino V_d ;
- 33% a 50% devido ao engrenamento dos agregados do concreto V_a ;
- 20% a 40% relativa ao concreto não fissurado do banzo comprimido V_c .

A Tabela 0.1 indica os trabalhos onde podem ser encontradas informações detalhadas dos mecanismos resistentes e modos de ruptura.

Tabela 0.1 – Mecanismos resistentes e modos de ruptura – trabalhos de referência.

Mecanismo resistente	Variável	Trabalhos
Concreto não fissurado do banzo comprimido	V_c	KONG e EVANS (1998)
Efeito de pino proveniente da armadura longitudinal de tração	V_d	EL-ARISS (2006), DILEEP KUMAR (2008), KONG e EVANS (1998)
Atrito proveniente do engrenamento dos agregados do concreto	V_a	SHERWOOD, BENTZ e COLLINS (2007), KONG e EVANS (1998)
Efeito de arco	–	KANI (1964), RUSSO <i>et. al.</i> (1991), KONG e EVANS (1998)

2.3 MODOS DE RUPTURA À FORÇA CORTANTE DE VIGAS SEM ARMADURA TRANSVERSAL

Os diversos modos de ruptura por força cortante em vigas sem armadura transversal são:

- por tensão diagonal, ocorre em vigas com $2,5 \leq a/d \leq 6,0$, caracterizado pela ruptura brusca do banzo comprimido;

- por tensão cisalhante, ocorre em vigas curtas com $a/d < 2,5$, caracterizado pela perda da ancoragem da armadura longitudinal ao concreto e ruptura brusca do banzo comprimido;
- por compressão devido à força cortante, ocorre em vigas curtas, $a/d < 2,5$ ruptura por tensão diagonal com predominância do efeito de arco;
- por flexão, as fissuras diminuem a capacidade resistente da viga ocasionando em seguida a ruptura do concreto do banzo comprimido;
- em vigas parede, ruptura por cisalhamento devido à ruptura da ancoragem ou ruptura no ponto de apoio quando a capacidade resistente do concreto é excedida.

Informações mais detalhadas acerca dos modos de ruptura e como ocorrem podem ser encontradas em ZIARA (1993) e KONG e EVANS (1998).

2.4 MODOS DE RUPTURA À FORÇA CORTANTE DE VIGAS COM ARMADURA TRANSVERSAL

As armaduras transversais constituídas por estribos de aço contribuem para a resistência à força cortante apenas após a formação da fissuração diagonal. A partir daí as armaduras transmitem as tensões entre os lados da fissura.

Segundo FUSCO (1981) as vigas armadas com estribos solicitadas à força cortante podem apresentar os seguintes modos de ruptura:

- por compressão devido à força cortante caracterizada pelo esmagamento das bielas inclinadas do concreto comprimido;
- por tração devido à força cortante caracterizada pelo escoamento das armaduras transversais;
- por flexão devido à força cortante caracterizada pela interação entre cortante e momento fletor, ocasionando uma fissura inclinada provocada inicialmente pela força cortante, que se prolonga atingindo o banzo comprimido de concreto, resultando na ruptura do elemento estrutural.

3 MODELOS TEÓRICOS PARA VIGAS CURTAS

Antes da fissuração de vigas curtas de concreto armado, as soluções elásticas descrevem adequadamente o seu comportamento, entretanto, após a fissuração a capacidade da viga deve ser analisada mediante uma análise mais refinada. SCHLAICH (1987, 1991) classificou as vigas curtas como regiões de descontinuidade onde as deformações se distribuem de forma não linear, sendo necessários modelos de bielas e tirantes adequados para representar o comportamento de tais vigas.

A análise limite tem três teoremas: teorema do limite inferior (teorema estático), teorema do limite superior (teorema cinemático) e teorema da unicidade.

Quando da aplicação do teorema do limite inferior (teorema estático) são utilizadas as trajetórias das tensões para se ter uma visualização do comportamento da peça. Depois, aplicam-se os critérios de ruptura para calcular a capacidade resistente inferior do elemento estrutural.

Quando da aplicação do teorema do limite superior (teorema cinemático) considera-se um mecanismo de ruptura cinematicamente admissível e o princípio dos trabalhos virtuais para se determinar a capacidade resistente superior do elemento estrutural.

O teorema da unicidade afirma que se as soluções dos teoremas do limite inferior e superior coincidem, tem-se a solução exata para a sollicitação máxima.

Em vigas curtas a resistência à compressão do concreto das bielas que se formam entre as fissuras apresentam valores diferentes dos registrados em corpos de prova. A resistência efetiva das bielas é obtida admitindo-se um coeficiente de efetividade do concreto à resistência à compressão.

3.1 FATOR DE EFETIVIDADE DO CONCRETO

O concreto compreendido entre as fissuras é modelado como um material rígido plástico, considerando-se a sua resistência à compressão efetiva f'_c :

$$f'_c = \nu f_c \quad (3.1)$$

onde ν é o fator de efetividade e f_c é a resistência do concreto obtida em um ensaio padrão.

O objetivo da introdução do fator de efetividade é adequar os resultados dos ensaios de corpos de prova às reais condições do elemento estrutural. O fator de efetividade do concreto depende da resistência do concreto, das dimensões, da armadura e da força (NIELSEN, 1984).

O fator de efetividade do concreto proposto por NIELSEN e HOANG (1999) para vigas solicitadas à força cortante é dado por:

$$v = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}}\right) \left(1 + 26 \frac{A_{sl}}{bd}\right) \leq 1 \quad (3.2)$$

onde

A_{sl} – área da armadura longitudinal;

b – largura da viga;

d – altura útil da viga;

h – altura da viga (m);

f_c – resistência à compressão do concreto (MPa).

Vários autores propuseram diferentes expressões considerando-se diferentes parâmetros para a determinação do fator de efetividade do concreto, que podem ser encontradas em NIELSEN (1978, 1984), ASHOUR e MORLEY (1996), VECCHIO e COLLINS (1993), OESTERLE *et al.* (1984), ROGOWSKY e MACGREGOR (1986), ASHOUR (1999), FOSTER e MALIK (2002). Também, SÁNCHEZ (2002) faz uma reavaliação do conceito de fator de efetividade conforme as prescrições normativas mais recentes.

3.2 MODELO DE BIELAS E TIRANTES

A elaboração de um modelo de bielas e tirantes requer, primeiramente, a divisão da estrutura em regiões “B”, onde é válida a teoria da flexão, e “D” (descontínuas) por meio do Princípio de Saint-Venant.

O Princípio de Saint-Venant enuncia que a substituição de um sistema de forças que atua sobre uma zona reduzida da superfície de um sólido elástico, por outro sistema estaticamente equivalente atuando na mesma zona, origina uma modificação substancial do estado de tensões locais. Entretanto, não influi nos estados de tensões situados a uma distância que comparada com as dimensões da zona de aplicação das forças seja grande (Figura 3.1).

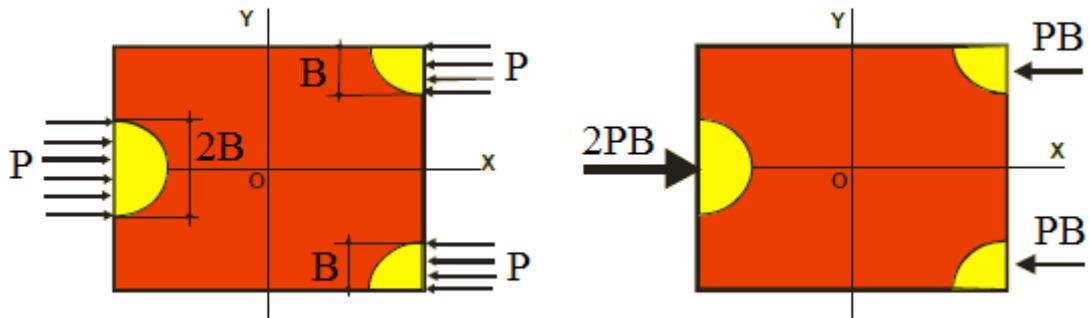


Figura 3.1 – Princípio de Saint-Venant – região “D”.

Nas regiões denominadas de “B” é válida a hipótese das seções planas (Bernoulli-Navier). Região “B” provém de bending (flexão) ou de Bernoulli. Nas regiões “D” não se admite a hipótese das seções planas, sendo caracterizadas por descontinuidades geométricas (mudanças de dimensões e vazados) e regiões de introdução de forças (uma força concentrada ou forças concentradas opostas). A Tabela 3.1 resume as características das análises das regiões “B” e “D”.

Tabela 3.1 – Características das análises das regiões “B” e “D”.

	Região “B”	Região “D”
Análise	Análise por seção	Análise direta
Comportamento do Material	Linear e não linear	Não linear
Estádio I (não fissurado)	Análise por seção	Análise elástica das tensões
Estádio II e III (fissurado)	Teoria da flexão e modelo da treliça para o cortante	Modelos de bielas e tirantes ou análise não linear (computacional)

A modelagem das regiões “D” é obtida a partir do seguinte roteiro:

- delimita-se a região “D” considerando-se a maior dimensão do elemento estrutural;
- obtém-se as tensões no contorno da região “D” por meio de teorias elásticas;
- divide-se o contorno da região “D” e calcula-se a força resultante em cada trecho da divisão;
- define-se uma treliça que interligue e transmita as forças entre os trechos do contorno da região “D”.

A filosofia dessa modelagem é manter o equilíbrio entre ações externas e solicitações internas, satisfazendo as condições de contorno e atendendo aos critérios de plastificação ou ruptura dos materiais, aço e concreto, respectivamente. As condições cinemáticas não são necessariamente satisfeitas, daí as críticas ao método, pois a modelagem pode não garantir condições adequadas de serviço. Essa deficiência é contornada, pois a elaboração da treliça do modelo de bielas e tirantes deve ser fundamentada na análise elástica das trajetórias de tensões.

As regiões “D” se subdividem em três tipos: “D1”, “D2” e “D3”, em função da sua geometria e das solicitações (Figura 3.3). A Figura 3.2 apresenta a divisão da estrutura em regiões “B” e “D” por meio do princípio de Saint-Venant, e a Figura 3.3 mostra a classificação das regiões “D” de acordo com a geometria e as solicitações ao qual a estrutura está submetida.

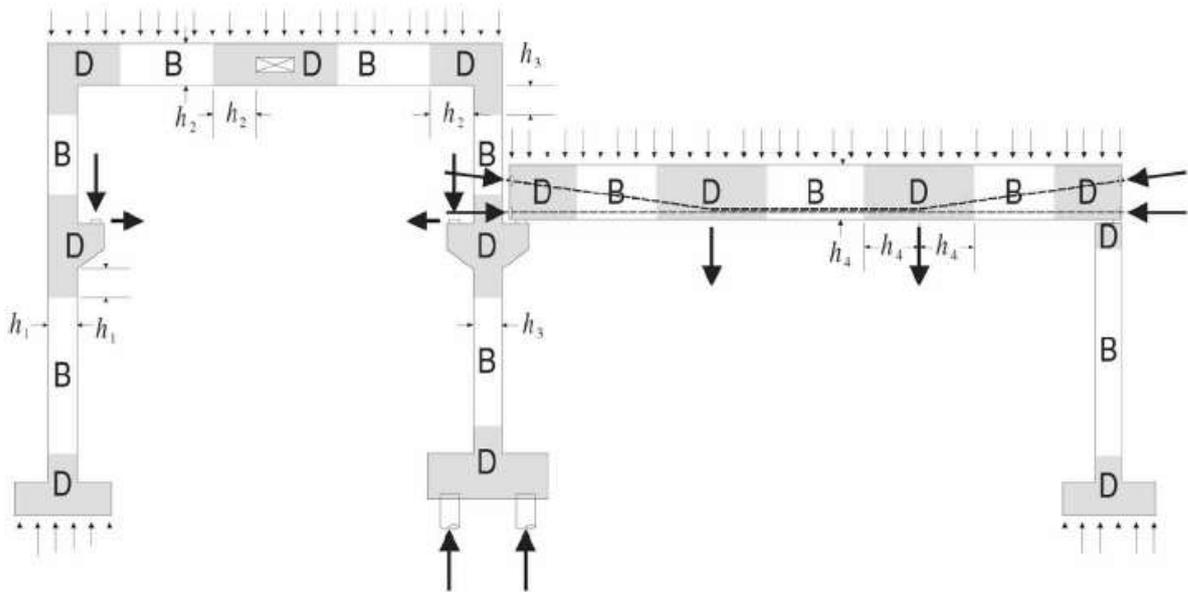


Figura 3.2 – Divisão da estrutura em regiões “B” e “D”.

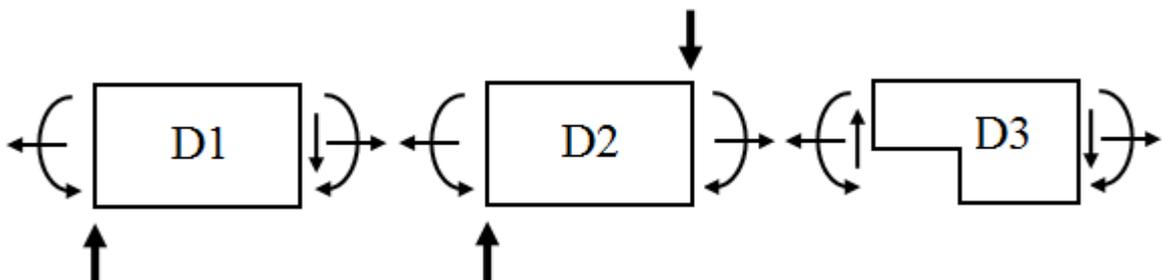


Figura 3.3 – Regiões “D1”, “D2” e “D3”.

O modelo de bielas e tirantes é baseado no teorema do limite inferior da plasticidade. O comportamento da treliça depende se o modelo de treliça escolhido representa

razoavelmente o mecanismo de distribuição de tensões no interior do elemento estrutural. Portanto, se a treliça escolhida necessitar de grandes deformações para atingir o estado plástico completo admitido, o elemento estrutural romperá prematuramente sob a ação de uma carga inferior à carga prevista pelo modelo de treliça.

Após a fissuração, entre as fissuras diagonais formam-se montantes (bielas) inclinadas de concreto, submetidas a tensões de compressão. As armaduras longitudinais constituem os tirantes tracionados e os pontos de interseção entre os elementos de bielas e tirantes sujeitos a tensões axiais são denominados nós. Esses três elementos (bielas, tirantes e nós) constituem a treliça, estrutura básica do modelo.

O cálculo da treliça permite dimensionar a armadura longitudinal de tração (tirante), verificar a tensão de compressão no concreto (biela), e determinar o comprimento de ancoragem na armadura (nó).

As hipóteses básicas do modelo de bielas e tirantes são:

- a ruptura por compressão do concreto ocorre após o escoamento das armaduras;
- as forças do sistema estático (treliça) são uniaxiais;
- as forças externas são aplicadas nos nós;
- não ocorre a ruptura por perda de aderência das armaduras.

3.2.1 Tirantes

Os tirantes são dimensionados de modo a garantir ruptura dúctil. Considera-se que as camadas de armadura tenham deformações específicas da mesma ordem de grandeza, de modo que possam ser representadas por uma única barra (tirante) solicitada axialmente. O dimensionamento é satisfatório quando $\sigma_{sd} < f_{yd}$, onde σ_{sd} é a tensão solicitante de cálculo no tirante e f_{yd} é a tensão de escoamento de cálculo do aço da armadura. A ancoragem das armaduras é realizada utilizando-se placas de ancoragem, ganchos com 90° ou 180°, laços ou barras retas.

3.2.2 Bielas de Concreto

As bielas são definidas e representadas pelo campo de tensões no concreto. São dimensionadas de modo a se obter tensões em qualquer ponto da biela inferiores à resistência à compressão efetiva do concreto. De acordo com a trajetória de tensões são classificadas em: biela prismática, biela em forma de leque e biela em forma de garrafa.

A biela prismática é caracterizada por um campo de tensões de compressão axial, uniforme, com trajetória de tensões paralelas devido a limitações geométricas ou mecânicas na configuração do fluxo das tensões (Figura 3.4 a).

A biela em forma de leque é utilizada para modelar os locais de aplicação de forças concentradas e regiões de apoio (Figura 3.4 b). Um exemplo desse tipo de biela corresponde ao fluxo de tensões de compressão no concreto em direção ao apoio externo, composto por uma série de bielas em forma trapezoidal.

A biela em forma de garrafa corresponde a uma generalização da biela em forma de leque, considerando-se a dispersão bidimensional das tensões de compressão (Figura 3.4 c). Possibilitam representar as tensões de tração ortogonais às tensões de compressão. São utilizadas para modelar o campo de tensões junto a forças concentradas ou regiões de reações de apoio, nas quais se tem tensões de tração perpendiculares à direção da ação da força de compressão da biela. Um exemplo desse tipo de biela corresponde ao fluxo de tensões de compressão originário em blocos de fundação com várias estacas.

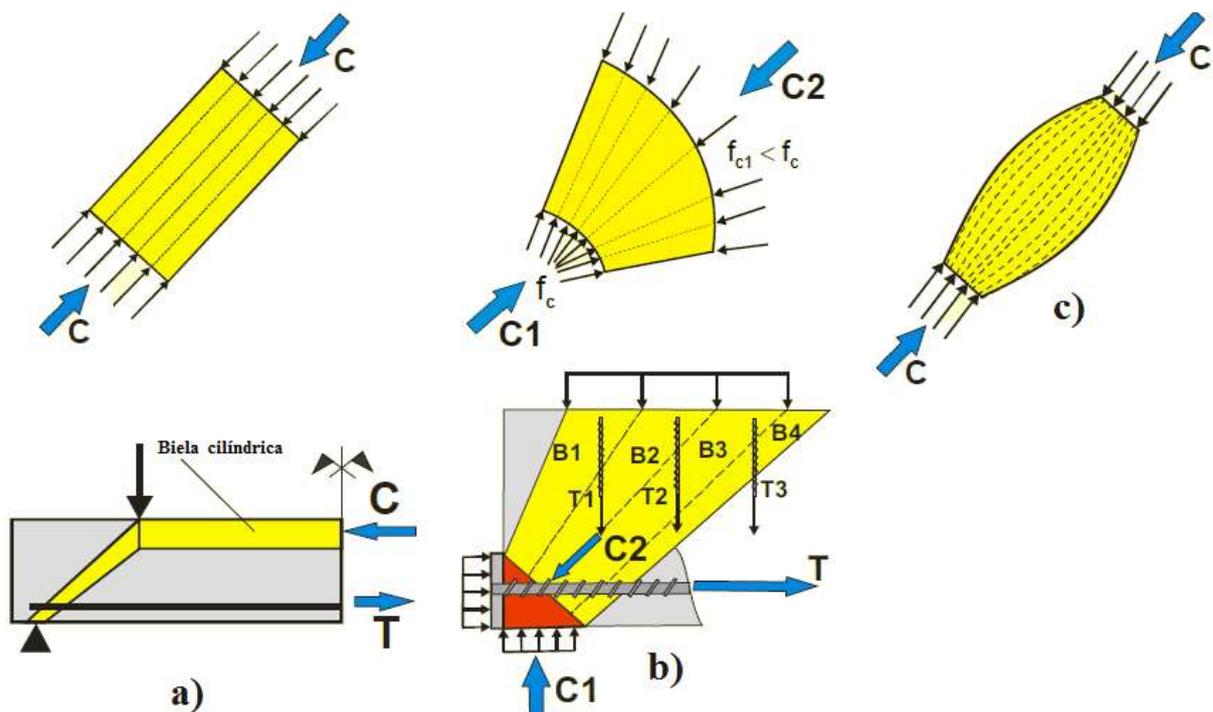


Figura 3.4 – Tipos de bielas: a) prismática, b) em forma de leque, c) em forma de garrafa.

A Figura 3.5 ilustra os diversos tipos de biela e as condições nas quais foram formadas:

- biela prismática em concreto não fissurado (Figura 3.5 a);
- biela prismática em concreto fissurado onde as bielas são paralelas às fissuras (Figura 3.5 b);

- biela prismática em concreto fissurado onde as bielas não são paralelas às fissuras (Figura 3.5 c);
- biela em forma de garrafa com malha de armadura para conter a fissuração (Figura 3.5 d);
- biela em forma de garrafa sem armadura para contenção da fissuração (Figura 3.5 e);
- biela em forma de leque em concreto fissurado (Figura 3.5 f);

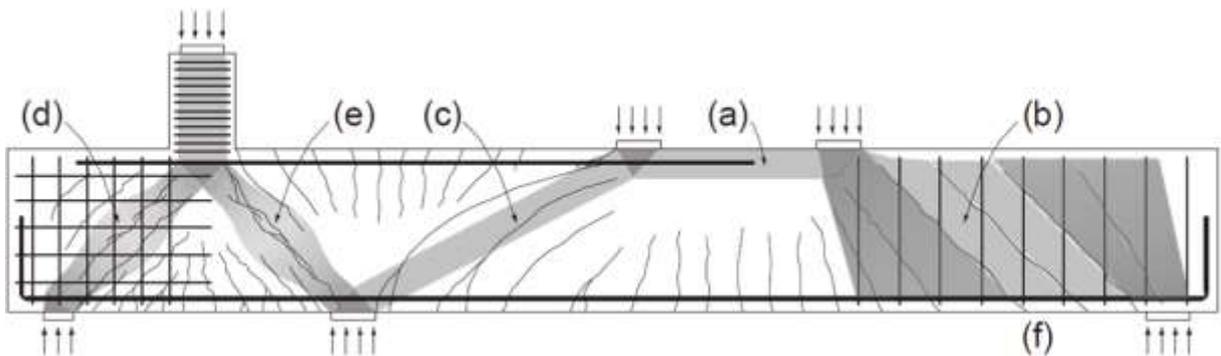


Figura 3.5 – Tipos de bielas e condições para sua formação

Fonte: adaptado de TJHIN e KUCHMA (2002).

3.2.3 Nós

De acordo com a configuração das forças que convergem para o nó, tem-se a seguinte classificação:

- CCC composto por três forças de compressão (Figura 3.6 a);
- CCT composto por duas forças de compressão e uma força de tração (Figura 3.6 b);
- CTT composto por uma força de compressão e duas forças de tração (Figura 3.6 c);
- TTT composto por três forças de tração (Figura 3.6 d).

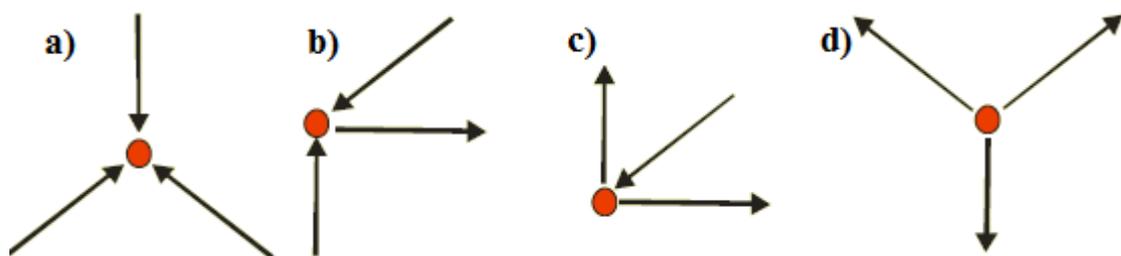


Figura 3.6 – Tipos de nós: a) CCC, b) CCT, c) CTT, d) TTT.

A análise dos nós destina-se a verificar as tensões de compressão no concreto mediante a adoção de um fator de efetividade ν adequado, de modo a garantir a transferência segura das forças aplicadas, e permitir o dimensionamento das condições de ancoragem das armaduras.

A geometria dos nós é definida de acordo com as larguras e inclinações das bielas e tirantes. Entretanto, essa geometria pode ser modificada de modo a se obter tensões inferiores à tensão efetiva no concreto.

3.3 MODELO TEÓRICO ESTUDADO

Neste trabalho são estudadas vigas curtas, classificadas como regiões D2, com bielas prismáticas e em forma de leque, nó do tipo CCT no apoio e nó tipo CCC abaixo do console de aplicação da força concentrada.

Uma questão importante é a definição do ângulo de inclinação da biela. A adoção de ângulos inadequados pode conduzir a uma necessidade de redistribuição plástica e problemas de compatibilidade de deformações específicas entre regiões carregadas e não carregadas; e inclinações muito baixas podem conduzir a problemas de compatibilidade das deformações específicas.

A biela deve ter uma inclinação de modo a representar as tensões de compressão inclinadas. Diversos autores e prescrições normativas definem valores limites para os ângulos de inclinação das bielas. O (ACI 318, 2014), por exemplo, define como valor limite inferior para o ângulo de inclinação da biela $\theta = 25^\circ$.

Para as vigas armadas com estribos transversais, são adotadas as considerações propostas por JENNEWEIN e SCHÄFER (1992). Segundo esses autores o ângulo de inclinação da biela θ pode ser escolhido ou calculado por:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{z}{a_L} \right) \quad (3.3)$$

onde z é braço de alavanca e a_L é a distância entre a face do apoio e a face da placa de aplicação da carga pontual, conforme a Figura 3.7.

A Figura 3.8 apresenta o fluxograma da formulação teórica para cálculos de regiões D2, armadas com estribos transversais, proposta por JENNEWEIN e SCHÄFER (1992), onde:

- V – força no estribo por unidade de comprimento;
- T – força na armadura longitudinal de flexão por unidade de comprimento;
- T_1 – força de ancoragem no nó 1;

- T_2 – força de ancoragem no nó 2;
 x – profundidade da linha neutra;
 A_{sl} – área de aço da armadura longitudinal;
 b – largura da viga;
 f_c – resistência à compressão média do concreto;
 f_s – resistência à tração média do aço da armadura longitudinal;
 ϕ_l – diâmetro das barras da armadura longitudinal;
 ϕ_w – diâmetro das barras da armadura transversal;
 c – cobrimento.

O fluxograma apresenta basicamente dois modelos de cálculo em função do ângulo θ adotado. Quando $\theta \leq \arccot\left(\frac{a_L}{z}\right)$ o esquema estrutural para o fluxo de tensões é o exibido na Figura 3.7 b), caso contrário adota-se o esquema estrutural mostrado na Figura 3.7 a).

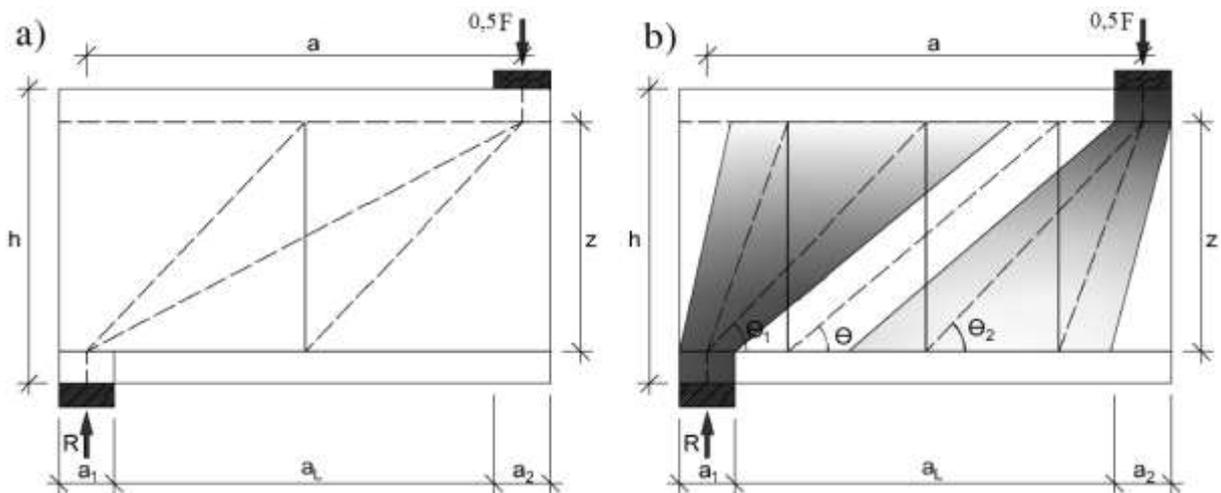


Figura 3.7 – Modelo teórico para vigas curtas proposto por JENNEWEIN e SCHÄFER (1992).

Considerando os dados de entrada, as etapas de cálculo do fluxograma são:

- 1) Verifica-se se a razão a/h está dentro o intervalo $[0,5;2,0]$, o que caracteriza a região tipo D2;
- 2) Calcula-se a profundidade da linha neutra x e o braço de alavanca z ;
- 3) Verifica-se se a razão a_L/z está dentro o intervalo $[0,5;2,0]$, o que caracteriza viga curta;
- 4) Verifica-se a desigualdade $a_L \geq z \cot \theta$, se for verdadeira, calcula-se os parâmetros V , T , θ_1 , θ_2 , T_1 e T_2 , nesta sequência.

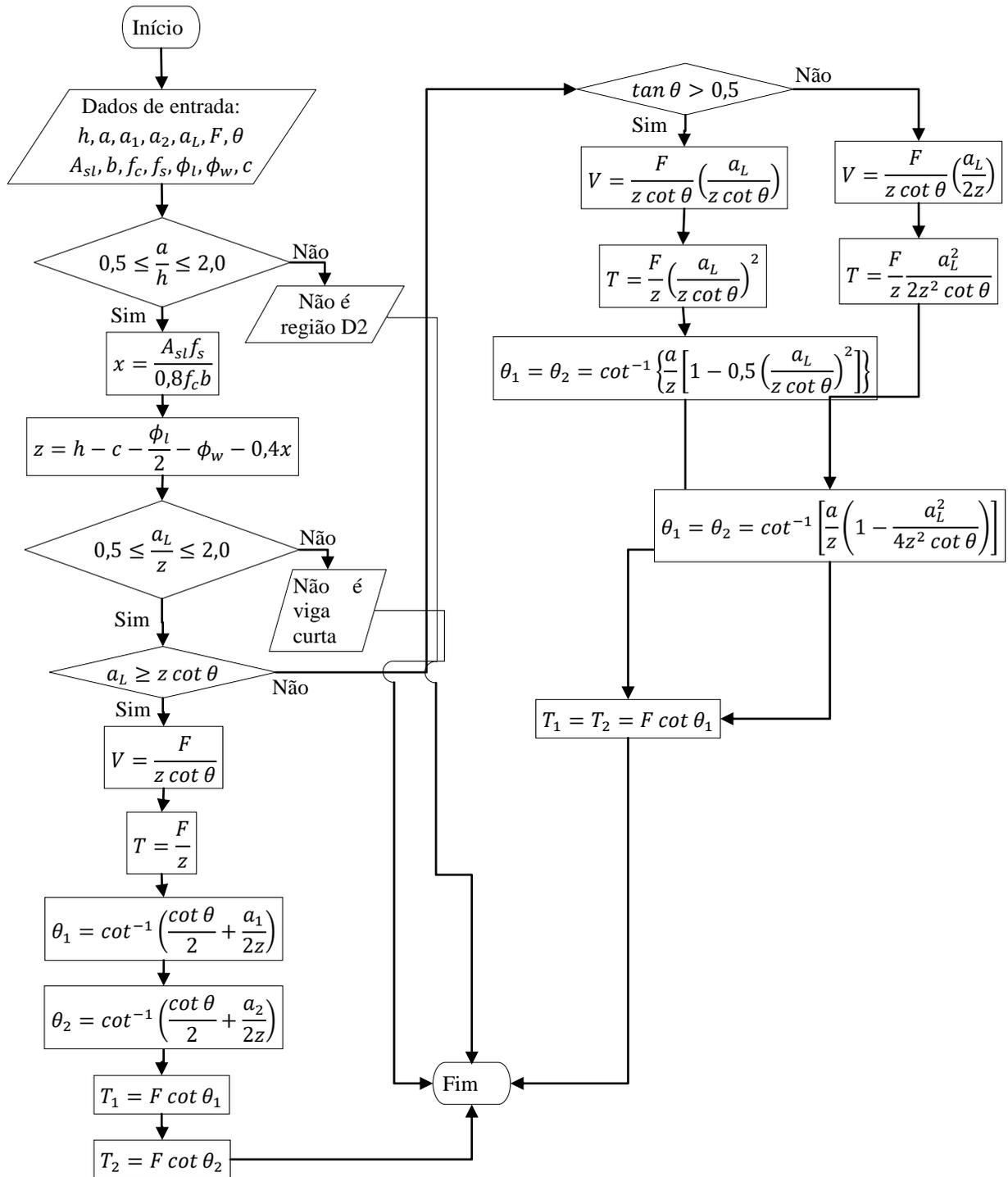


Figura 3.8 – Fluxograma do modelo teórico para regiões D2.

4 VALIDAÇÃO DO MODELO TEÓRICO ADOTADO

Os modelos teóricos descritos no item 0 foram comparados com os resultados experimentais apresentados em BUSCH (2011).

4.1 ENSAIOS REALIZADOS POR BUSCH (2011)

4.1.1 Armaduras, Bitolas e Dimensões

BUSCH (2011) ensaiou oito vigas curtas armadas longitudinalmente, separadas em dois grupos de quatro vigas conforme a seguinte nomenclatura:

- série V0 – vigas de concreto armado sem armadura transversal;
- série VS – vigas de concreto com armadura transversal.

Cada uma das quatro vigas de cada grupo tem razão a/d igual a 0,74, 0,96, 1,38 e 1,6, onde a é a distância da força ao centro do apoio, e d a altura útil da viga. A Figura 0.1 apresenta as dimensões, espaçamentos, posições e bitolas utilizadas nas vigas ensaiadas da série V0, e a Figura 0.2 os parâmetros das vigas da série VS. Na Figura 0.2 os estribos são dispostos ao longo dos comprimentos a_L .

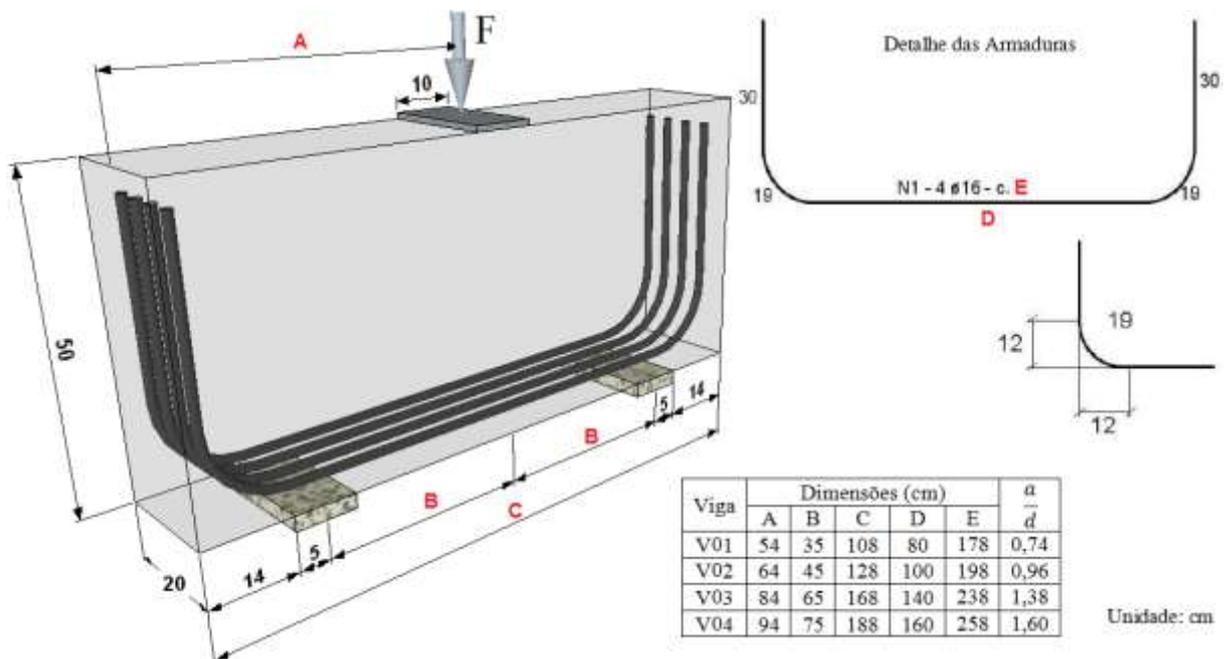


Figura 0.1 – Parâmetros das vigas da série V0.

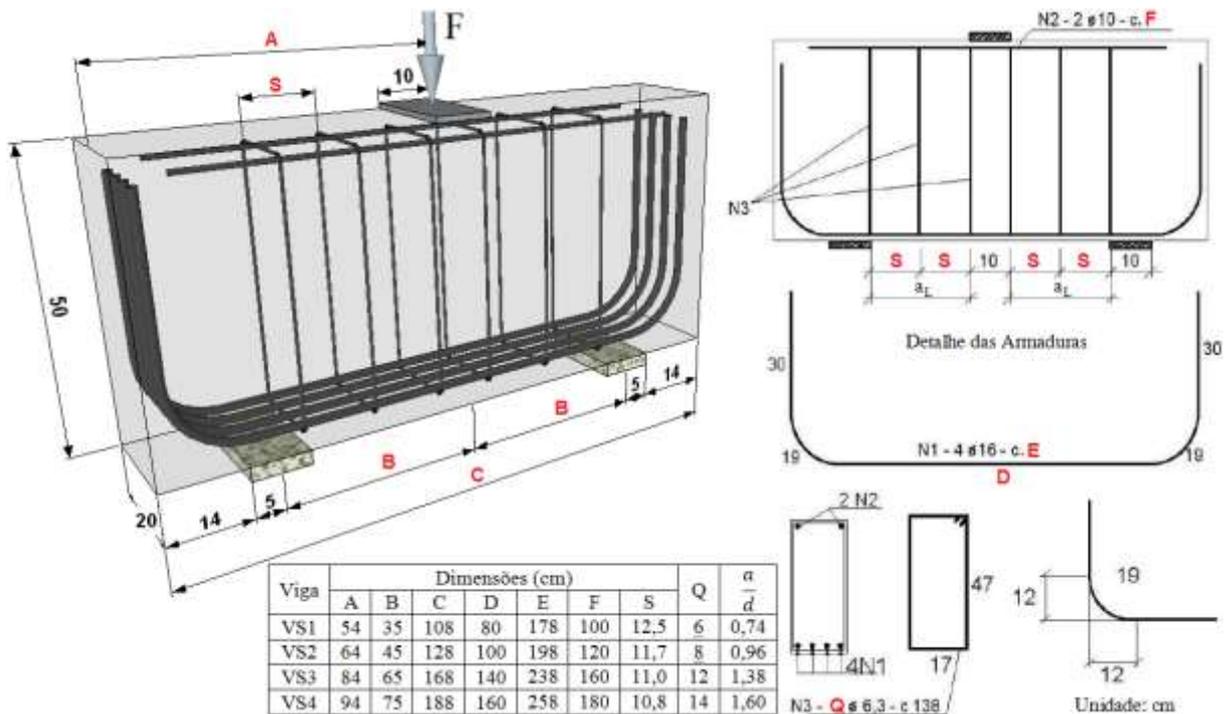


Figura 0.2 – Parâmetros das vigas da série VS.

Todas as vigas foram executadas com cobrimento das armaduras igual a 2,0 cm.

As vigas foram armadas de modo que a ruptura ocorresse devido à força cortante e não devido à flexão (ruptura da armadura longitudinal). As ancoragens foram executadas de modo que não houvesse a ruptura por deslizamento das barras da armadura longitudinal.

Foram colocados extensômetros elétricos de resistência (“strain gage” – “SG”) em alguns pontos da viga para a medição das deformações específicas durante o processo de carga. A Figura 0.3 apresenta as posições dos extensômetros para as vigas da série V0. Nas vigas da série VS, além do posicionamento dos extensômetros das vigas da série V0, foram adicionados extensômetros em alguns pontos nos estribos (Figura 0.4).

A nomenclatura usada para os extensômetros foi:

- SG1 e SG2, armaduras longitudinais no meio do vão;
- SG3 ao SG8, no concreto nos pontos indicados na Figura 0.3;
- SG9 ao SG12, nos estribos nos pontos indicados na Figura 0.4.

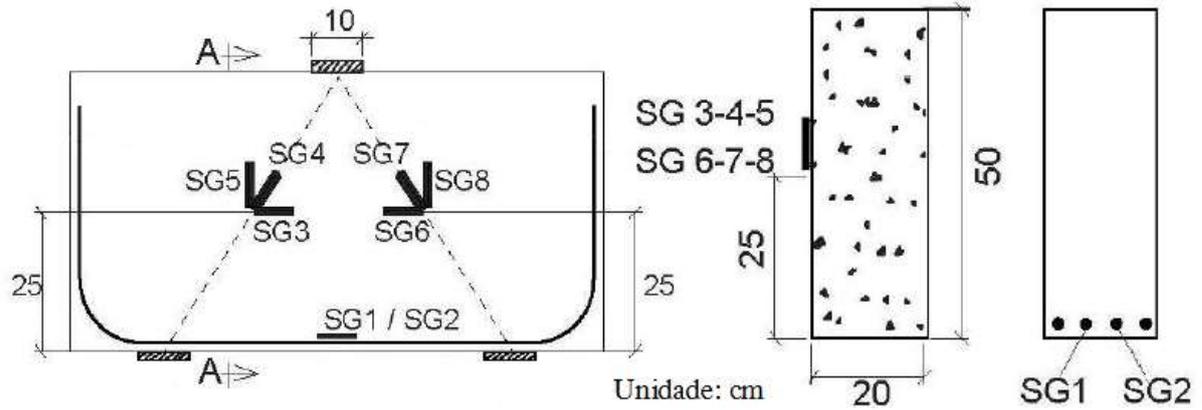


Figura 0.3 – Posição dos extensômetros, vigas da série V0

Fonte: BUSCH (2011).

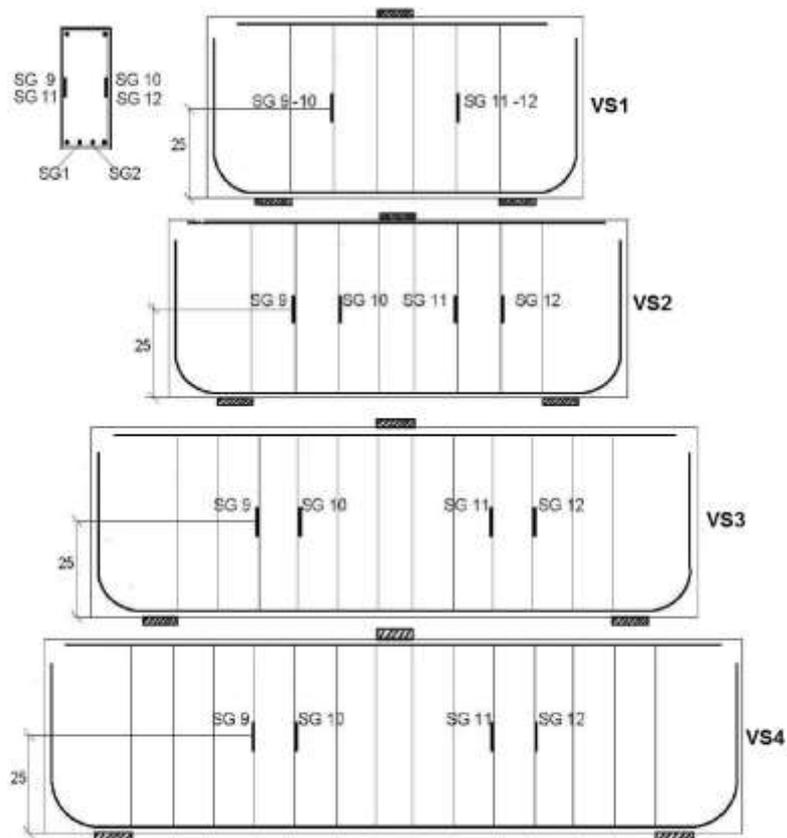


Figura 0.4 – Posição dos extensômetros nos estribos, vigas da série VS;

Fonte: BUSCH (2011).

4.1.2 Propriedades dos Materiais

A Tabela 0.1 apresenta um resumo das propriedades dos materiais empregados nos ensaios realizados por BUSCH (2011). Devido a problemas com a instrumentação a viga V04

foi descartada e posteriormente concretada com moldagem de corpos-de-prova exclusivos para determinação das características e controle estatístico do concreto.

Tabela 0.1 – Propriedades dos materiais,

Material	f_{sm} (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{tm} (MPa)	E_m (GPa)
Concreto (exceção viga V04)	–	32,27	3,11	20,9
Concreto (viga V04)	–	37,82	3,63	31,7
Aço armadura longitudinal	548,66	674,26	674,26	189
Aço armadura transversal	670,88	790,61	790,61	173

Fonte: BUSCH (2011).

4.1.3 Resultados dos Ensaios

Todas as vigas ensaiadas apresentaram ruptura por tração diagonal. A Tabela 0.2 apresenta as forças últimas F e as deformações específicas ε_{SGi} registradas nos extensômetros, onde i é o número do extensômetro. Os dados inconsistentes são assinalados como “IN”. Mais informações sobre os valores lidos nos extensômetros podem ser encontradas em BUSCH (2011).

Tabela 0.2 – Força última e deformações específicas,

Série	Viga	F (kN)	Deformações Específicas (‰)											
			ε_{SG1}	ε_{SG2}	ε_{SG3}	ε_{SG4}	ε_{SG5}	ε_{SG6}	ε_{SG7}	ε_{SG8}	ε_{SG9}	ε_{SG10}	ε_{SG11}	ε_{SG12}
V0	V01	521,86	1,27	1,42	-0,003	-2,200	-0,248	-0,039	-0,257	-0,117	–	–	–	–
	V02	600,79	1,99	2,12	-0,297	-0,355	-0,126	-1,365	-0,769	-0,600	–	–	–	–
	V03	564,49	2,28	1,24	-0,195	-0,458	-0,099	-0,010	-0,143	-0,130	–	–	–	–
	V04	490,07	2,34	2,22	-0,092	-0,158	-0,070	0,014	-0,024	0,020	–	–	–	–
VS	VS1	933,05	IN	2,228	-0,61	-1,367	2,873	-0,393	-0,412	-0,147	1,862	IN	1,022	1,073
	VS2	626,71	1,843	2,207	-0,375	-0,769	-0,075	-0,122	-0,398	-0,077	2,686	4,116	IN	1,501
	VS3	693,62	0,205	0,486	-0,359	-0,279	-0,142	-0,082	-0,275	-0,056	IN	IN	1,641	0,937
	VS4	560,45	IN	47,143	-0,181	-1,113	2,006	-0,09	-0,317	0,025	IN	IN	0,748	IN

Fonte: BUSCH (2011).

A deformação específica ε_{SG2} para a viga VS4 apresentou um valor muito superior aos demais, sendo inconsistente. Entretanto, para efeito de cálculo foi considerado, admitindo-se que o aço das armaduras escoou.

4.1.4 Análise das Deformações Específicas nas Bielas – Séries V0 e VS

Com a disposição dos extensômetros SG3 ao SG5 e SG6 ao SG8 em forma de roseta a 45°, tem-se as deformações específicas a 0° – ε_x , a 90° – ε_y , e a distorção no plano xy – γ_{xy} , dadas por:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{0^\circ} \quad (0.1)$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{90^\circ} \quad (0.2)$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{45^\circ} - (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (0.3)$$

Com essas deformações específicas, determinam-se os ângulos de inclinação das deformações específicas máximas $\theta_{máx}$ e mínimas $\theta_{mín}$, em relação ao eixo longitudinal da viga:

$$\theta_{mín} = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \right) \quad (0.4)$$

$$\theta_{máx} = 90^\circ + \theta_{mín} \quad (0.5)$$

As deformações específicas principais, máxima ε_1 e mínima ε_2 , são obtidas com o emprego das seguintes expressões:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (0.6)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (0.7)$$

As

Tabela 0.3 e 4.4 resumem as deformações específicas principais e o ângulo de inclinação das deformações específicas principais mínimas, obtidas a partir das expressões (0.4) à (0.7), e as deformações específicas que constam da Tabela 0.2.

Tabela 0.3 – Deformações específicas principais, Série V0,

Vigas	Extensômetros SG3 ao SG5 (biela esquerda)					
	ε_x (‰)	ε_y (‰)	γ_{xy} (‰)	θ_{\min} (°)	ε_1 (‰)	ε_2 (‰)
V01	-0,003	-0,248	-4,149	46,69	1,953	-2,204
V02	-0,297	-0,126	-0,287	29,61	-0,044	-0,379
V03	-0,195	-0,099	-0,622	40,61	0,168	-0,462
V04	-0,092	-0,07	-0,154	40,93	-0,003	-0,159
Vigas	Extensômetros SG6 ao SG8 (biela direita)					
	ε_x (‰)	ε_y (‰)	γ_{xy} (‰)	θ_{\min} (°)	ε_1 (‰)	ε_2 (‰)
V01	-0,039	-0,177	-0,298	57,42	0,056	-0,272
V02	-1,365	-0,6	0,427	75,42	-0,544	-1,421
V03	-0,01	-0,13	-0,146	64,71	0,024	-0,164
V04	0,014	0,02	-0,082	42,91	0,058	-0,024

Fonte: BUSCH (2011).

Tabela 0.4 – Deformações específicas principais, Série VS,

Vigas	Extensômetros SG3 ao SG5 (biela esquerda)					
	ε_x (‰)	ε_y (‰)	γ_{xy} (‰)	θ_{\min} (°)	ε_1 (‰)	ε_2 (‰)
VS1	-0,61	2,873	-4,997	27,56	4,177	-1,914
VS2	-0,375	-0,075	-1,088	37,29	0,339	-0,789
VS3	-0,359	-0,142	-0,057	7,36	-0,138	-0,363
VS4	-0,181	2,006	-4,051	30,82	3,214	-1,389
Vigas	Extensômetros SG6 ao SG8 (biela direita)					
	ε_x (‰)	ε_y (‰)	γ_{xy} (‰)	θ_{\min} (°)	ε_1 (‰)	ε_2 (‰)
VS1	-0,393	-0,147	-0,284	24,55	-0,082	-0,458
VS2	-0,122	-0,077	-0,597	42,84	0,200	-0,399
VS3	-0,082	-0,056	-0,412	43,19	0,137	-0,275
VS4	-0,09	0,025	-0,569	39,29	0,258	-0,323

Fonte: BUSCH (2011).

4.1.5 Análise das Tensões Principais nas Bielas – Séries V0 e VS

BUSCH (2011) não realizou ensaios que forneçam os dados necessários para a determinação da curva tensão x deformação específica do concreto. Para calcular as tensões de compressão nas bielas utilizou-se a formulação proposta pelo FIB Model Code 2010 vol.1, item 5.1.8.1:

$$\sigma_c = -f_{cm} \left(\frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \right) \text{ se } |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{c,lim}| \quad (0.8)$$

$$\sigma_c = 0 \text{ se } |\varepsilon_c| \geq |\varepsilon_{c,lim}|$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (0.9)$$

$$k = \frac{E_{ci}}{E_{c1}} \quad (0.10)$$

onde

$\varepsilon_{c,lim}$ – deformação específica limite (trecho de abrandamento de tensões);

ε_c – deformação específica de compressão atuante;

ε_{c1} – deformação específica lida para a máxima tensão de compressão;

f_{cm} – resistência à compressão média do concreto;

E_{ci} – módulo de elasticidade tangente;

E_{c1} – módulo de elasticidade secante;

η – razão entre a deformação específica de compressão atuante e a deformação específica lida para a máxima tensão de compressão;

k – número de plasticidade (razão entre o módulo de elasticidade tangente e o módulo de elasticidade secante).

Os valores de $\varepsilon_{c,lim}$, ε_{c1} e E_{ci} não foram determinados por BUSCH (2011), sendo obtidos por interpolação linear, com a resistência à compressão média f_{cm} , dos valores que constam na tabela proposta pelo FIB Model Code 2010 vol.1, item 5.1.8.1.

Tabela 0.5 – Módulos de elasticidade, deformações específicas e número de plasticidade, FIB Model Code 2010.

Classe do concreto	C12	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
f_{ck} (MPa)	12	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
E_{ci} (GPa)	27,1	30,3	33,6	36,3	38,6	40,7	42,6	44,4	46,0	47,5	48,9	50,3
E_{c1} (GPa)	11,1	13,3	16,5	20,0	23,2	26,2	28,9	31,4	33,8	36	39,3	42,7
ε_{c1} (‰)	-1,8	-2,1	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6	-2,7	-2,8	-2,9	-3,0	-3,0	-3,0
$\varepsilon_{c,lim}$ (‰)	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,4	-3,3	-3,2	-3,1	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0
k	2,44	2,28	2,04	1,82	1,66	1,55	1,47	1,41	1,36	1,32	1,24	1,18

A interpolação linear forneceu os valores $\varepsilon_{c,lim} = -3,5\%$, $\varepsilon_{c1} = -2,323\%$ e $E_{ci} = 34,21$ GPa. Para a viga V04 a interpolação forneceu os valores $\varepsilon_{c,lim} = -3,5\%$, $\varepsilon_{c1} = -2,378\%$ e $E_{ci} = 35,71$ GPa.

Para calcular as tensões de tração perpendiculares à direção das bielas utilizou-se a formulação proposta pelo FIB Model Code 2010 vol.1, item 5.1.8.2:

$$\begin{aligned} \sigma_{ct} &= E_{ci} \varepsilon_{ct} \quad \text{se } \sigma_{ct} \leq 0,9f_{tm} \\ \sigma_{ct} &= f_{tm} \left(1 - 0,1 \frac{0,00015 - \varepsilon_{ct}}{0,00015 - 0,9 \frac{f_{tm}}{E_{ci}}} \right) \quad \text{se } 0,9f_{tm} < \sigma_{ct} < f_{tm} \\ \sigma_{ct} &= 0 \quad \text{se } \sigma_{ct} > f_{tm} \end{aligned} \quad (0.11)$$

onde

ε_{ct} – deformação específica de tração atuante;

E_{ci} – módulo de elasticidade tangente;

f_{tm} – resistência à tração média do concreto.

A Tabela 0.6 e a

Tabela 0.7 apresentam as tensões atuantes nas bielas das vigas das séries V0 e VS, calculadas com a formulação apresentada, onde σ_1 é a tensão principal máxima e σ_2 é a tensão principal mínima. Para a realização da comparação dos resultados experimentais de tensão com os resultados teóricos, item 0, separou-se as maiores tensões de tração σ_t e de compressão σ_c encontradas nos resultados experimentais.

Tabela 0.6 – Tensões principais atuantes nas bielas, Séries V0 e VS.

Séries	Vigas	Biela Esquerda		Biela Direita		Maiores Valores	
		σ_{1e} (MPa)	σ_{2e} (MPa)	σ_{1d} (MPa)	σ_{2d} (MPa)	σ_{te} (MPa)	σ_{ce} (MPa)
V0	V01	0*	-32,14	1,92	-6,00	0*	-32,14
	V02	-1,01	-8,24	-11,6	-26,01	---	-26,01
	V03	0*	-9,94	0,84	-3,67	0*	-9,94
	V04	-0,06	-2,84	2,08	-0,43	2,08	-2,84
VS	VS1	0*	-30,84	-1,85	-9,87	0*	-30,84
	VS2	0*	-16,23	0*	-8,66	0*	-16,23
	VS3	3,10	-7,91	3,55	-6,07	3,55	-7,91
	VS4	0*	-25,61	0*	-7,07	0*	-25,61

* Atingiu a tensão de ruptura à tração e fissurou.

4.1.6 Análise das Tensões nas Armaduras – Séries V0 e VS

As tensões nas armaduras σ_{SG_i} foram obtidas multiplicando-se as deformações específicas ε_{SG_i} nas armaduras, apresentadas na Tabela 0.2, pelos módulos de elasticidade apresentados na Tabela 0.1. A

Tabela 0.7 contém as tensões calculadas nas armaduras. Os dados inconsistentes são assinalados como “IN”; mais informações sobre os valores lidos nos extensômetros podem ser encontradas em BUSCH (2011).

Tabela 0.7 – Tensões nas armaduras.

Séries	Vigas	Tensões (MPa)					
		Armadura Longitudinal		Armadura Transversal			
		σ_{SG1}	σ_{SG2}	σ_{SG9}	σ_{SG10}	σ_{SG11}	σ_{SG12}
V0	V01	40,0	68,4	–	–	–	–
	V02	76,7	48,7*	–	–	–	–
	V03	48,7*	34,9	–	–	–	–
	V04	48,7*	48,7*	–	–	–	–
VS	VS1	N	48,7*	322,1	IN	176,8	185,6
	VS2	48,3	48,7*	670,9*	670,9*	IN	259,7
	VS3	8,7	1,9	IN	IN	283,9	162,1
	VS4	N	48,7*	IN	IN	129,4	IN

* Atingiu a tensão de escoamento da armadura.

4.1.6 Inclinação das Fissuras – Séries V0 e VS

BUSCH (2011) realizou uma inspeção visual nas vigas ensaiadas e ajustou uma reta para a determinação da inclinação média θ_{cr} das fissuras principais. A Tabela 0.8 apresenta as inclinações médias registradas para cada uma das vigas ensaiadas.

Tabela 0.8 – Inclinações médias das fissuras

Série	Viga	Inclinação média das fissuras principais (°)	
		Esquerda	Direita
V0	V01	65,4	69,1
	V02	57,7	55,6
	V03	37,6	39,1
	V04	44,2	–
VS	VS1	47,7	–
	VS2	44,0	–
	VS3	55,0	–
	VS4	63,5	–

Fonte: BUSCH (2011).

4.2 APLICAÇÃO DO MODELO TEÓRICO AOS ENSAIOS REALIZADOS POR BUSCH (2011)

4.2.1 Geometria do Modelo

Com os dados apresentados no item 0 ficam definidos todos os parâmetros necessários à aplicação do fluxograma da Figura 3.8, sendo o ângulo de inclinação da biela θ , dado por:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{z}{a}\right) \quad (0.12)$$

onde z e a são definidos na Figura 3.7.

A geometria dos nós adotada foi a mesma para as vigas com e sem armadura transversal.

O nó tipo CCT foi definido como um prisma triangular de largura igual à largura do apoio, e altura h_2 igual ao dobro da distância do bordo inferior da viga ao centro da armadura longitudinal de tração (tirante). Para as vigas da série V0, h_2 é dado pela expressão (0.13). Para as vigas da série VS, h_2 é dado pela expressão (0.14).

$$h_2 = 2(c + 0,5\phi_l) \quad (0.13)$$

$$h_2 = 2(c + \phi_w + 0,5\phi_l) \quad (0.14)$$

O nó tipo CCC foi definido como a combinação de um paralelepípedo e um prisma triangular. O paralelepípedo tem a largura do console de aplicação da força e altura h_1 , e o prisma triangular tem altura h_0 , então:

$$h_0 = \frac{a_2 \operatorname{tg} \theta}{2} \quad (0.15)$$

$$h_1 = h - 0,5h_2 - z \quad (0.16)$$

Definidas a inclinação da biela e as dimensões dos nós, a seção transversal da biela fica determinada conforme se observa na Figura 0.5. A

Tabela 0.9 apresenta os valores encontrados para cada uma das vigas ensaiadas utilizando-se as expressões (0.12) a (0.16), e também informa os valores das hipotenusas H_0 e H_2 dos triângulos que formam os nós superior e inferior, respectivamente.

Tabela 0.9 – Parâmetros geométricos.

Série	Viga	θ (°)	h_0 (cm)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	H_0 (cm)	H_2 (cm)
V0	V01	51,36	6,25	3,42	5,60	8,01	11,46
	V02	44,21	4,86	3,42	5,60	6,98	11,46
	V03	33,96	3,37	3,42	5,60	6,03	11,46
	V04	30,56	2,95	2,92	5,60	5,81	11,46
VS	VS1	50,95	6,16	3,42	6,86	7,94	12,13
	VS2	43,80	4,79	3,42	6,86	6,93	12,13
	VS3	33,58	3,32	3,42	6,86	6,00	12,13
	VS4	29,91	2,88	3,42	6,86	5,77	12,13

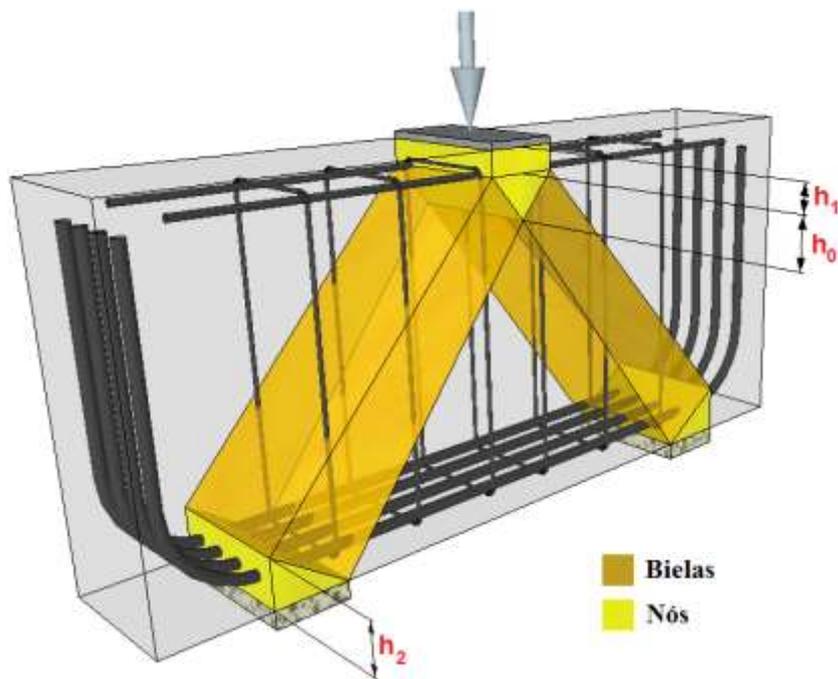


Figura 0.5 – Geometria dos nós.

4.2.2 Forças nas Bielas e Tirantes

Para as vigas com armadura transversal, as forças foram calculadas utilizando-se o modelo proposto por JENNEWEIN e SCHÄFER (1992). O fluxograma apresentado na Figura 3.8 mostra como foram obtidos os resultados para as forças apresentadas na Tabela 0.10.

Os valores de V_T (força cortante total ao longo do comprimento a_L), T_T (força na armadura longitudinal até o meio do vão da viga) e F_b (força de compressão na biela de concreto), são dadas, respectivamente, pelas seguintes expressões:

$$V_T = a_L V \quad (0.17)$$

$$T_T = T(a - 0,5a_1) \quad (0.18)$$

Para as vigas sem armadura transversal, a força na armadura longitudinal é dada por:

$$T_T = F \cot g \theta \quad (0.19)$$

Para as vigas com e sem armadura transversal, o esforço de compressão na biela é dado por:

$$F_b = F \cos(90^\circ - \theta) \quad (0.20)$$

Tabela 0.10 – Forças no modelo de bielas e tirantes proposto por JENNEWEIN e SCHÄFER (1992).

Série	Viga	V (kN/cm)	V_T (kN)	T (kN/cm)	T_T (kN)	T_1 (kN)	T_2 (kN)
V0	V01	–	–	–	208,65	–	–
	V02	–	–	–	308,39	–	–
	V03	–	–	–	418,71	–	–
	V04	–	–	–	414,93	–	–
VS	VS1	9,53	238,19	5,52	165,59	282,19	282,19
	VS2	5,43	189,97	4,4	176,09	228,4	228,4
	VS3	4,52	248,46	5,76	345,48	335,56	335,56
	VS4	3,23	210,24	4,87	341,05	303,95	303,95

4.2.3 Tensões nas Bielas e Tirantes

As tensões nas armaduras longitudinais σ_{long} foram obtidas dividindo-se a força resultante na armadura longitudinal T_T pela área da seção transversal da armadura longitudinal. As tensões nos estribos σ_{est} foram obtidas dividindo-se a força cortante total V_T pelo somatório das áreas das pernas dos estribos ao longo do comprimento a_L .

Nas bielas foram calculadas as tensões nas interfaces biela – nó superior $\sigma_{b.ns}$, biela – nó inferior $\sigma_{b.ni}$ e as tensões na metade do comprimento da biela $\sigma_{b.m}$ foram obtidas com a interpolação entre $\sigma_{b.ns}$ e $\sigma_{b.ni}$.

A

Tabela 0.11 apresenta os resultados obtidos para os cálculos das tensões nas armaduras e bielas para as vigas das séries V0 e VS.

Tabela 0.11 – Tensões nas armaduras e bielas, modelo de bielas e tirantes.

Série	Viga	σ_{long} (MPa)	σ_{est} (MPa)	$\sigma_{b.ns}$ (MPa)	$\sigma_{b.ni}$ (MPa)	$\sigma_{b.m}$ (MPa)
V0	V01	259,4	–	-12,7	-8,9	-10,8
	V02	383,5	–	-15,0	-9,1	-12,1
	V03	520,6	–	-13,1	-6,9	-10,0
	V04	515,9	–	-10,7	-5,4	-8,1
VS	VS1	205,9	1273,5	-22,8	-15,0	-18,9
	VS2	219,0	761,8	-15,7	-9,0	-12,3
	VS3	429,6	664,2	-16,0	-7,9	-12,0
	VS4	424,1	481,7	-12,1	-5,8	-8,9

4.3 COMPARAÇÃO MODELO TEÓRICO *VERSUS* ENSAIOS

4.3.1 Comparação das Tensões

A Tabela 0.12 apresenta os cálculos da razão entre as tensões obtidas nos ensaios, apresentados na Tabela 0.6 e na

Tabela 0.7, com os resultados para as tensões calculadas segundo o modelo de bielas e tirantes, apresentados na

Tabela 0.11.

Tabela 0.12 – Razão de tensão, experimental/modelo.

Séries	Vigas	Razão de Tensões						
		Armadura Longitudinal		Armadura Transversal				Bielas
		$\frac{\sigma_{SG1}}{\sigma_{long}}$	$\frac{\sigma_{SG2}}{\sigma_{long}}$	$\frac{\sigma_{SG9}}{\sigma_{est}}$	$\frac{\sigma_{SG10}}{\sigma_{est}}$	$\frac{\sigma_{SG11}}{\sigma_{est}}$	$\frac{\sigma_{SG12}}{\sigma_{est}}$	$\frac{\sigma_{ce}}{\sigma_{b.m}}$
V0	V01	0,93	1,03	–	–	–	–	2,97
	V02	0,98	1,43	–	–	–	–	2,16
	V03	1,05	0,45	–	–	–	–	1,00
	V04	1,06	1,06	–	–	–	–	0,35
Média		1,00		–	–	–	–	1,62
Desvio Padrão		0,27		–	–	–	–	1,17
Coeficiente de Variação		0,27		–	–	–	–	0,72
VS	VS1	IN	2,66	0,25	IN	0,14	0,15	1,63
	VS2	1,59	2,51	0,88	0,88	IN	0,34	1,32
	VS3	0,09	0,21	IN	IN	0,43	0,24	0,66
	VS4	IN	1,29	IN	IN	0,27	IN	2,87
Média		1,39		0,57	–	0,28	0,24	1,62
Desvio Padrão		1,10		0,45	–	0,15	0,10	0,93
Coeficiente de Variação		0,79		0,79	–	0,52	0,39	0,57

As Figura 0.8 a Figura 0.10 mostram os resultados apresentados na Tabela 0.12 por meio de gráficos que relacionam as razões de tensões medidas e calculadas para as vigas das séries V0 e VS, e a razão a/d . Os gráficos foram elaborados para os valores médios das razões de tensões, tendo em vista que se dispõe de mais de um extensômetro para as armaduras longitudinais e transversais.

A discrepância dos valores experimentais, dentre outras justificativas, está relacionada à pequena quantidade de amostras ensaiadas.

Analisando-se o gráfico da Figura 0.6 se observa que não houve correlação entre a razão de tensão nas armaduras longitudinais e a razão a/d para as vigas da série V0, o que indica que esses parâmetros devem ser pesquisados em um maior número de ensaios.

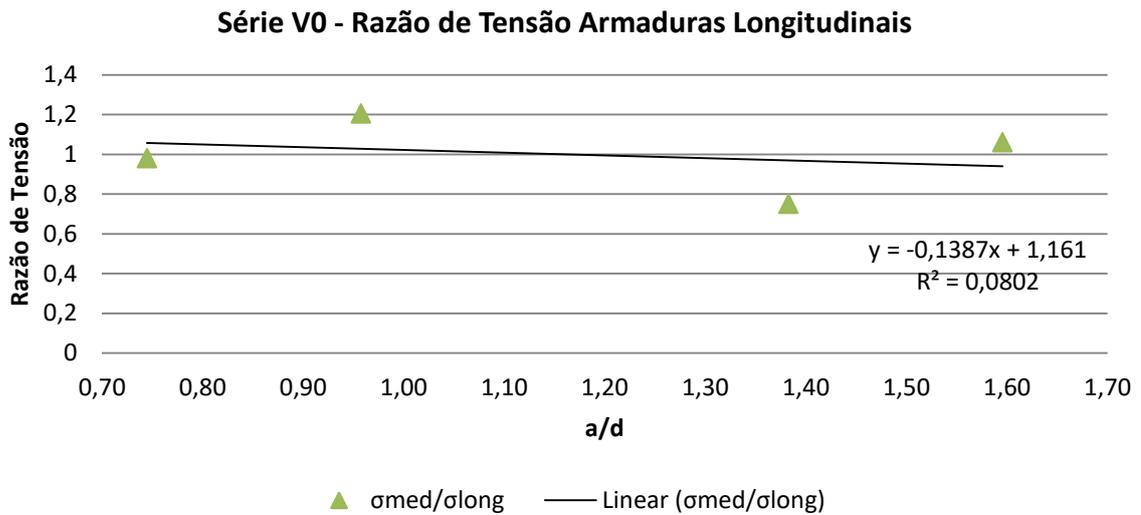


Figura 0.6 – Razão de tensão para as armaduras longitudinais, vigas série V0.

O gráfico da Figura 0.7 mostra que houve boa correlação entre a razão de tensão nas bielas e a razão a/d para as vigas da série V0. Observa-se que o comportamento das bielas apresentou resultados mais consistentes do que os resultados das armaduras longitudinais.

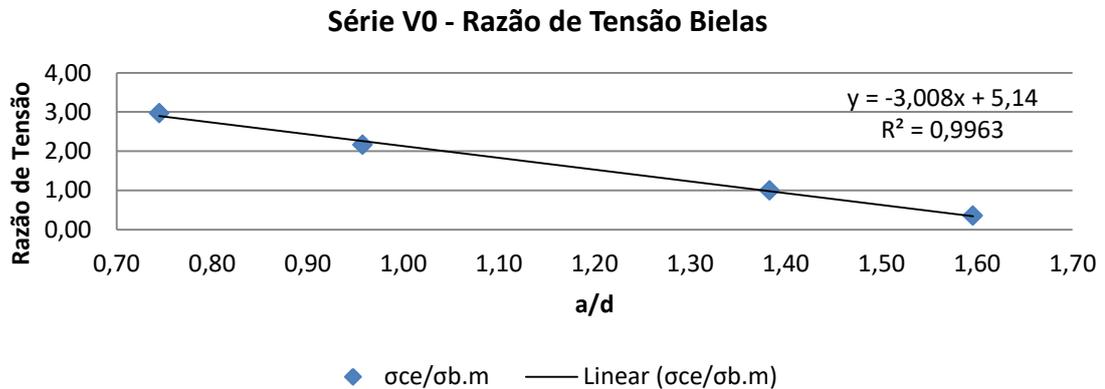


Figura 0.7 – Razão de tensão para as bielas, vigas série V0.

O gráfico da Figura 0.8 mostra que houve correlação fraca entre a razão de tensão nas armaduras longitudinais e a razão a/d para as vigas da série VS. Entretanto, não podem ser feitas conclusões, pois a viga se encontra superarmada. A presença de estribos propiciou um comportamento mais consistente da razão de tensão nas armaduras longitudinais comparado ao mostrado na Figura 0.6.

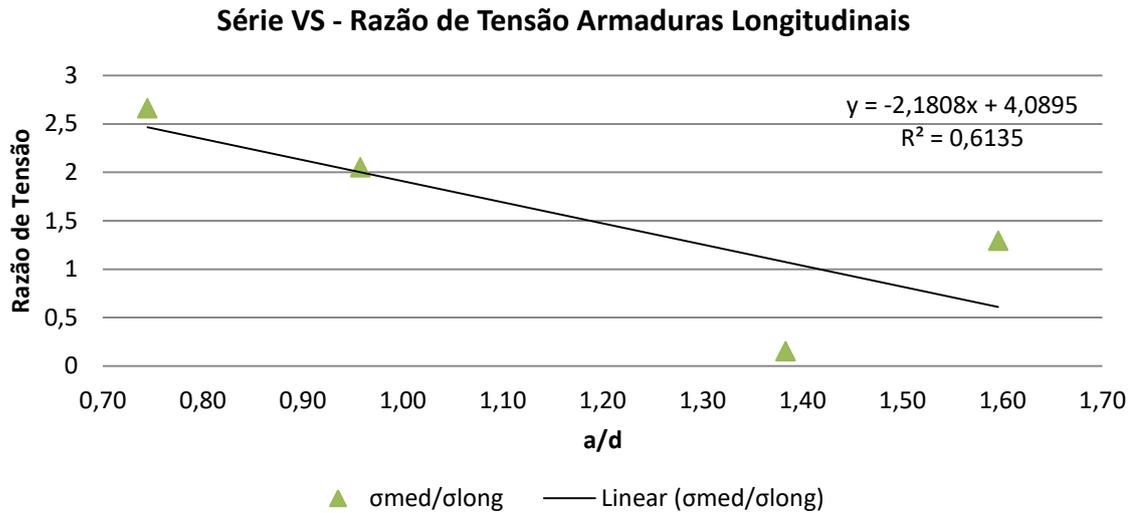


Figura 0.8 – Razão de tensão para as armaduras longitudinais, vigas série VS.

O gráfico da Figura 0.9 mostra que não houve correlação entre a razão de tensão nas armaduras transversais e a razão a/d para as vigas da série VS.

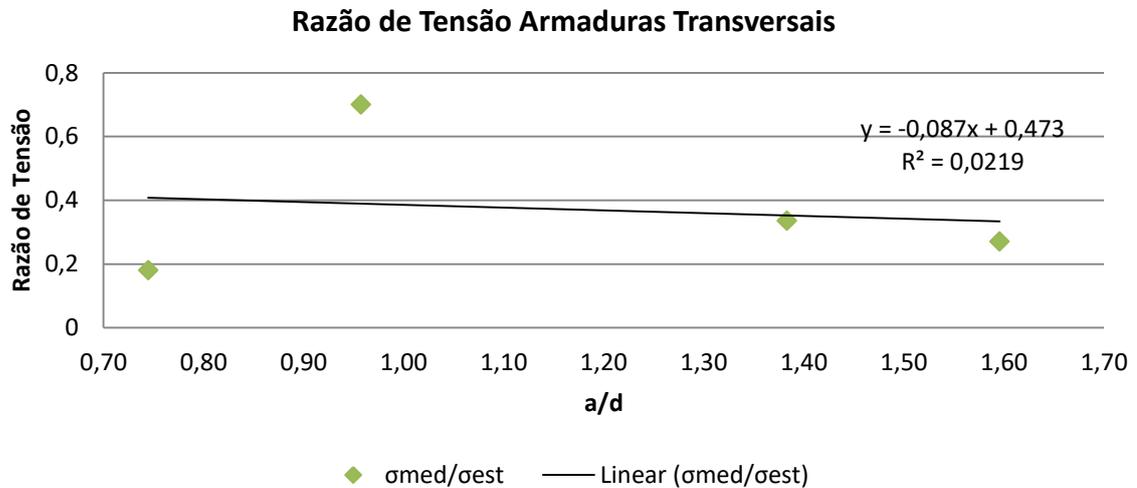


Figura 0.9 – Razão de tensão para as armaduras transversais, vigas série VS.

O gráfico mostrado na Figura 0.10 em comparação com o gráfico da Figura 0.7 apresentou baixa correlação entre a razão de tensão nas bielas e a razão a/d para as vigas da série VS.

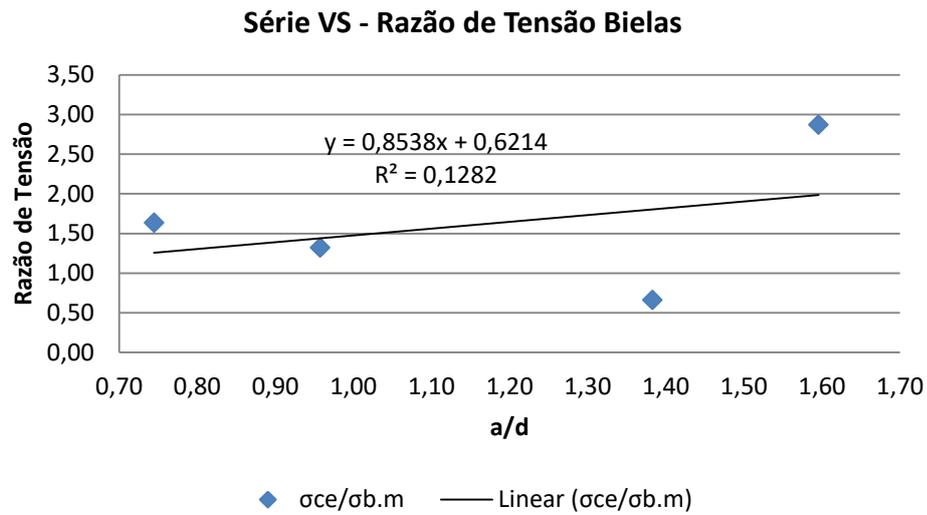


Figura 0.10 – Razão de tensão para as bielas, vigas série VS.

4.3.2 Comparação entre os Ângulos das Fissuras

Dispõe-se de três ângulos para a realização da comparação dos ângulos de fissuras, o ângulo da inspeção visual θ_{cr} , o ângulo do modelo teórico θ dado na equação (0.12) e o ângulo de inclinação das tensões principais de compressão $\theta_{mín}$ apresentado na

Tabela 0.3 (vigas da série V0) e na Fonte: BUSCH (2011).

Tabela 0.4 (vigas da série VS).

Admitiu-se que o ângulo do modelo teórico θ representa a inclinação do campo de tensões principais de compressão. Também se admitiu que as fissuras ocorreram paralelas aos ângulos de inclinação das deformações específicas principais de compressão θ_{min} . A comparação foi realizada por meio da razão entre os ângulos supracitados.

Tabela 0.13 – Razão entre ângulos de fissuras.

Série	Viga	Razão entre ângulos de fissuras					
		Biela esquerda			Biela direita		
		$\frac{\theta}{\theta_{cr}}$	$\frac{\theta_{mín}}{\theta_{cr}}$	$\frac{\theta}{\theta_{mín}}$	$\frac{\theta}{\theta_{cr}}$	$\frac{\theta_{mín}}{\theta_{cr}}$	$\frac{\theta}{\theta_{mín}}$
V0	V01	0,79	0,71	1,10	0,74	0,83	0,89
	V02	0,77	0,51	1,49	0,80	1,36	0,59
	V03	0,90	1,08	0,84	0,87	1,65	0,52
	V04	0,68	0,93	0,74	---	---	0,71
VS	VS1	1,07	0,58	1,85	---	---	2,08
	VS2	1,00	0,85	1,17	---	---	1,02
	VS3	0,61	0,13	4,56	---	---	0,78
	VS4	0,47	0,49	0,97	---	---	0,76

As Figuras 4.11 à Figura 0.22 mostram os resultados da

Tabela 0.13 em forma gráfica.

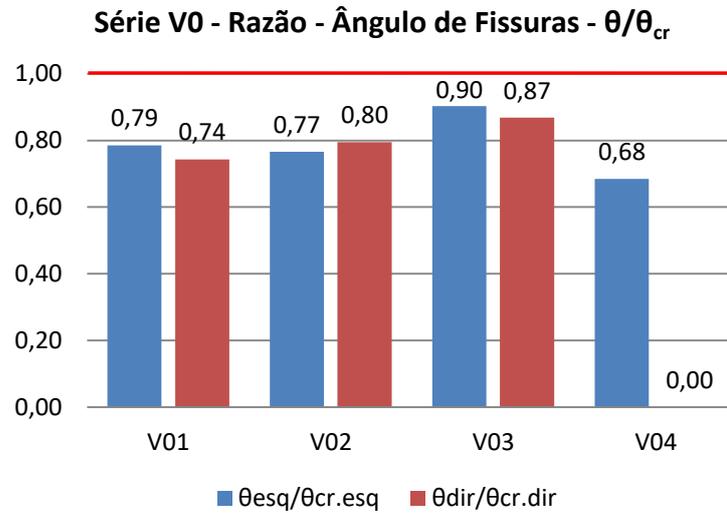


Figura 0.11 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{cr} , vigas série V0.

O gráfico da Figura 0.12 mostra que não houve correlação entre a razão θ/θ_{cr} e a razão a/d para as vigas da série V0.

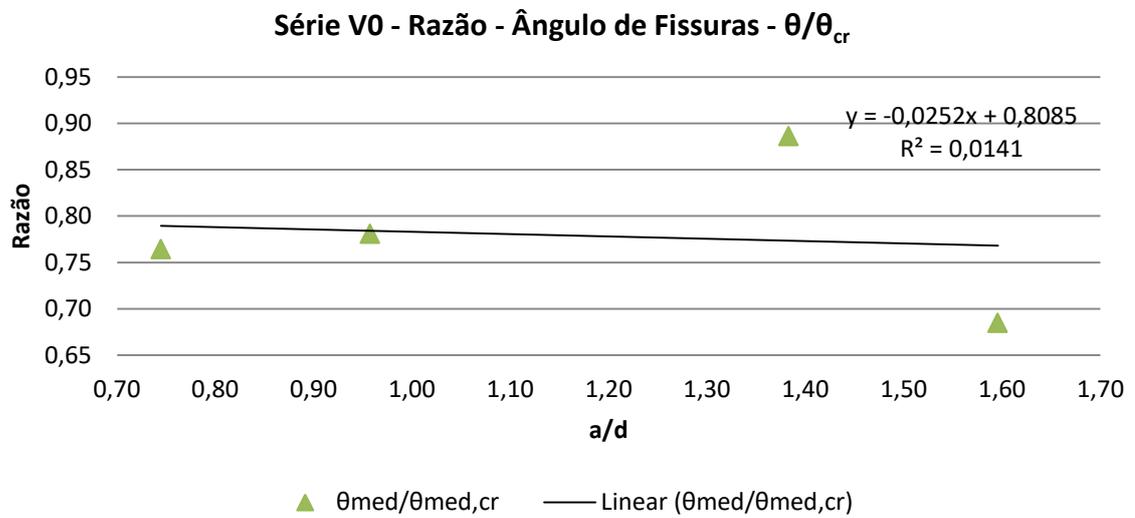


Figura 0.12 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{cr} , vigas série V0.

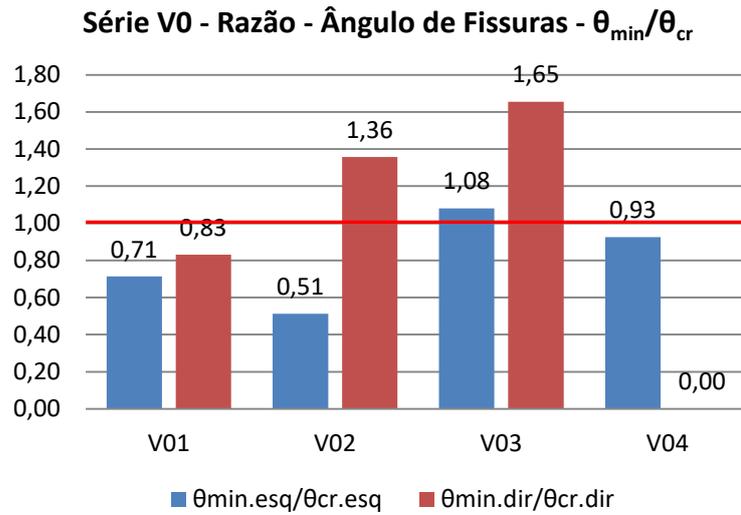


Figura 0.13 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta_{\min}/\theta_{cr}$, vigas série V0.

O gráfico da Figura 0.14 mostra que não houve correlação entre a razão $\theta_{\min}/\theta_{cr}$ e a razão a/d para as vigas da série V0.

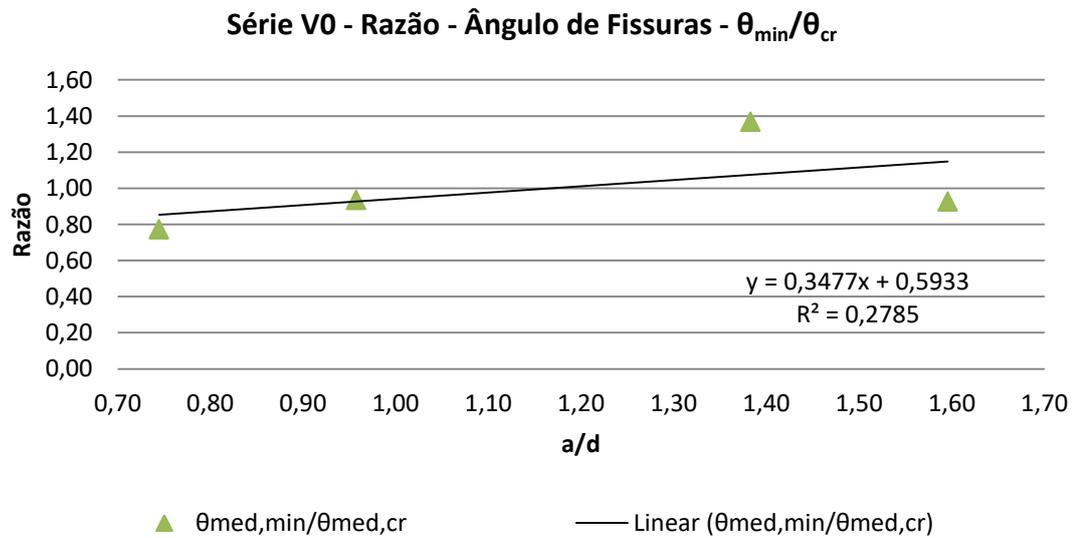


Figura 0.14 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta_{\min}/\theta_{cr}$, vigas série V0.

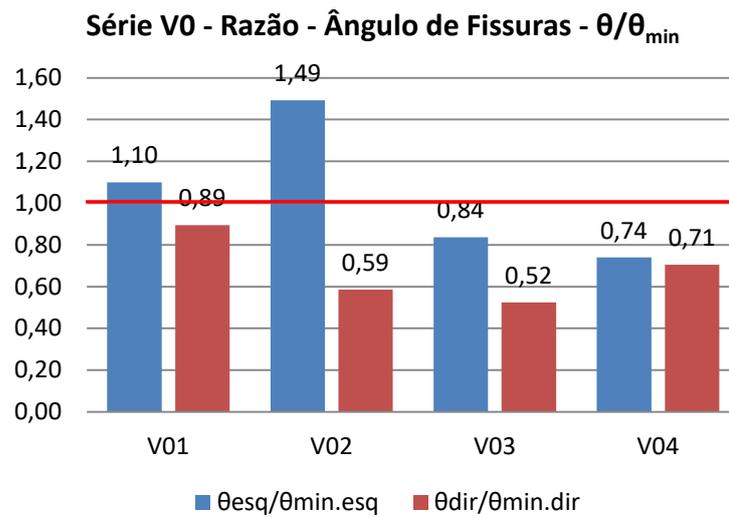


Figura 0.15 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{min} , vigas série V0.

O gráfico da

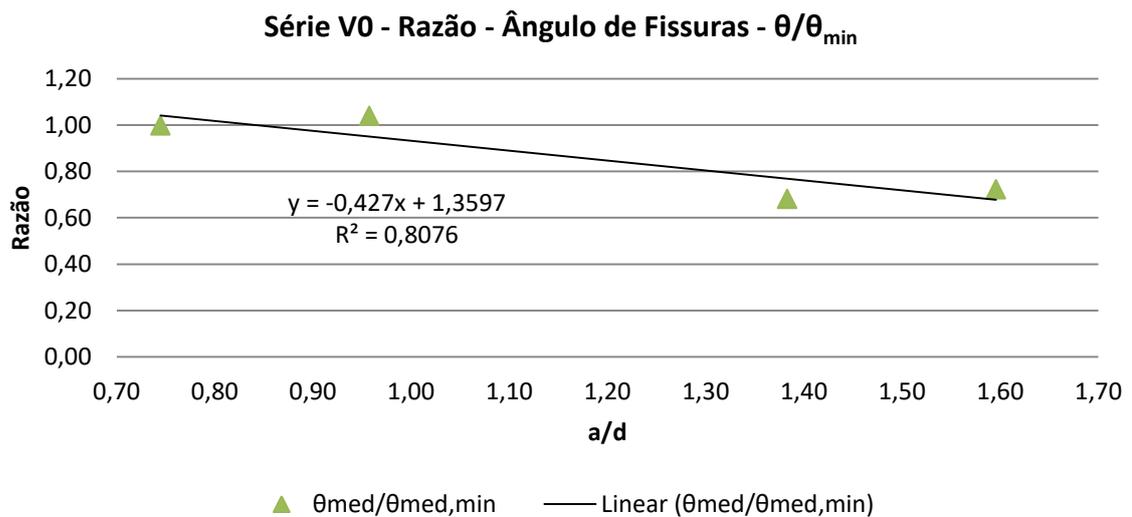


Figura 0.16 mostra que houve uma melhor correlação entre a razão θ/θ_{min} e a razão a/d para as vigas da série V0.

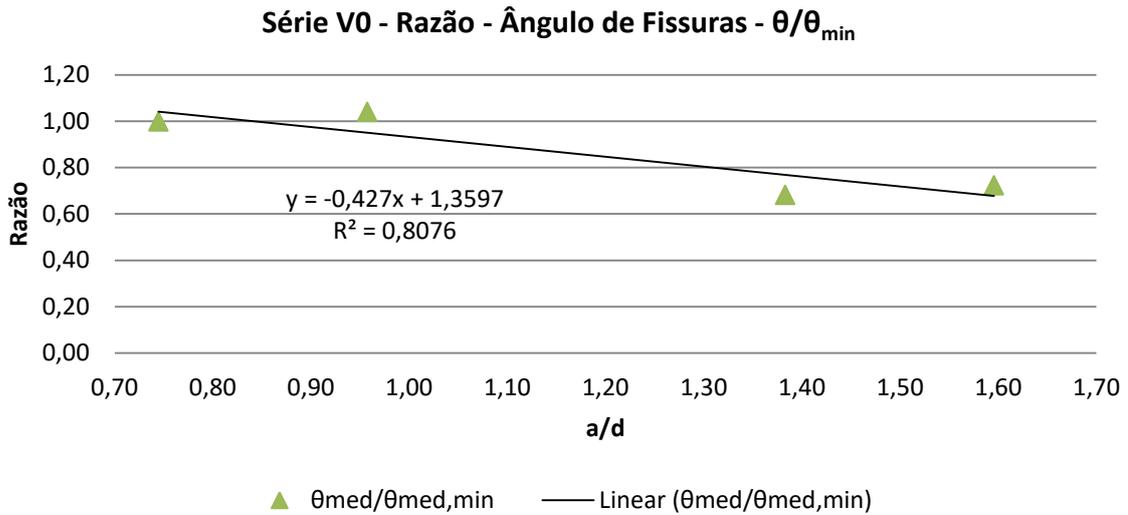


Figura 0.16 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{min} , vigas série V0.

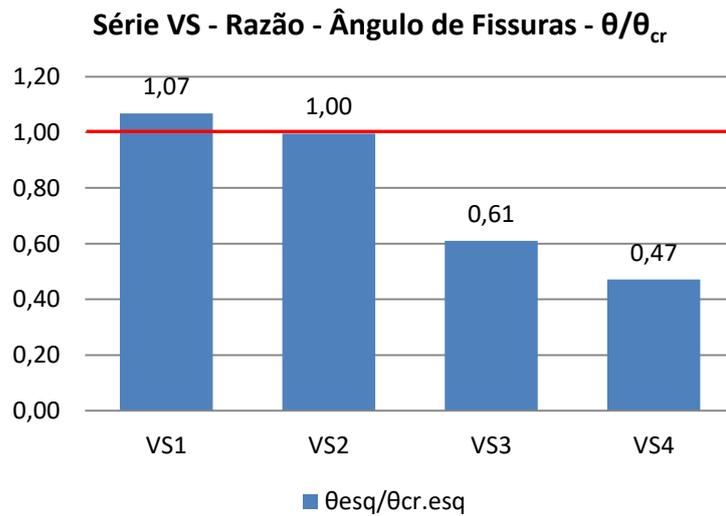


Figura 0.17 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{cr} , vigas série VS.

O gráfico da Figura 0.18 mostra que houve correlação entre a razão θ/θ_{cr} e a razão a/d para as vigas da série VS. A presença dos estribos propiciou um comportamento mais consistente.

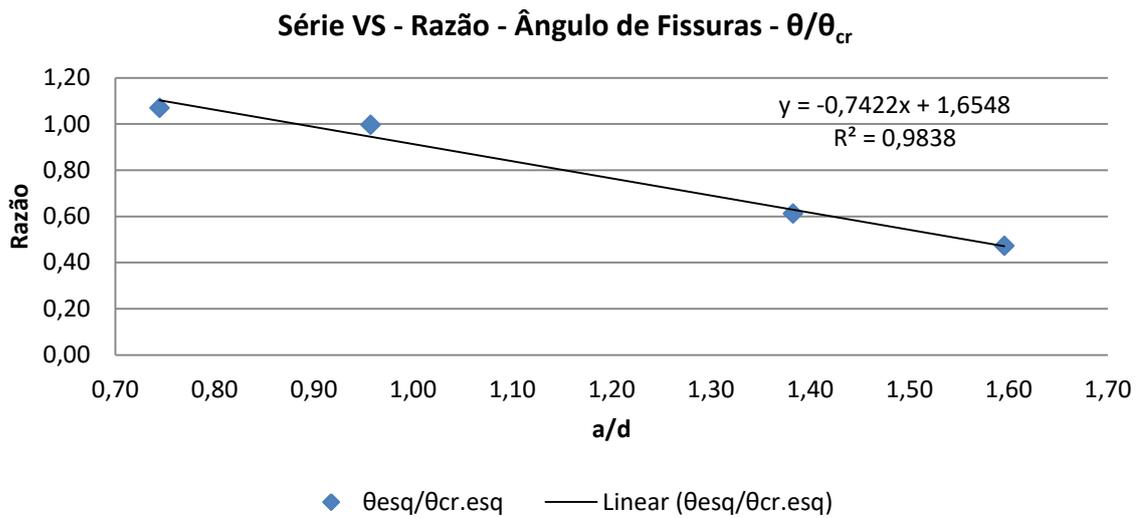


Figura 0.18 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{cr} , vigas série VS.

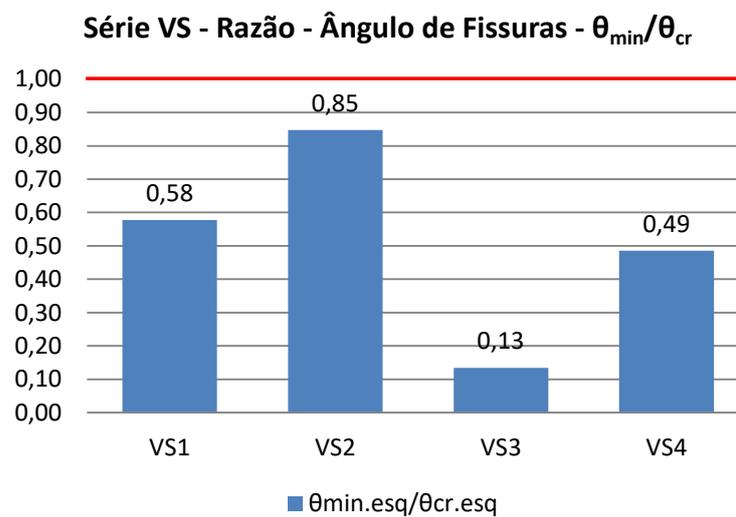


Figura 0.19 – Razão entre os ângulos de fissuras θ_{min}/θ_{cr} , vigas série VS.

O gráfico da Figura 0.20 apresentou baixa correlação entre a razão θ_{min}/θ_{cr} e a razão a/d para as vigas da série VS.

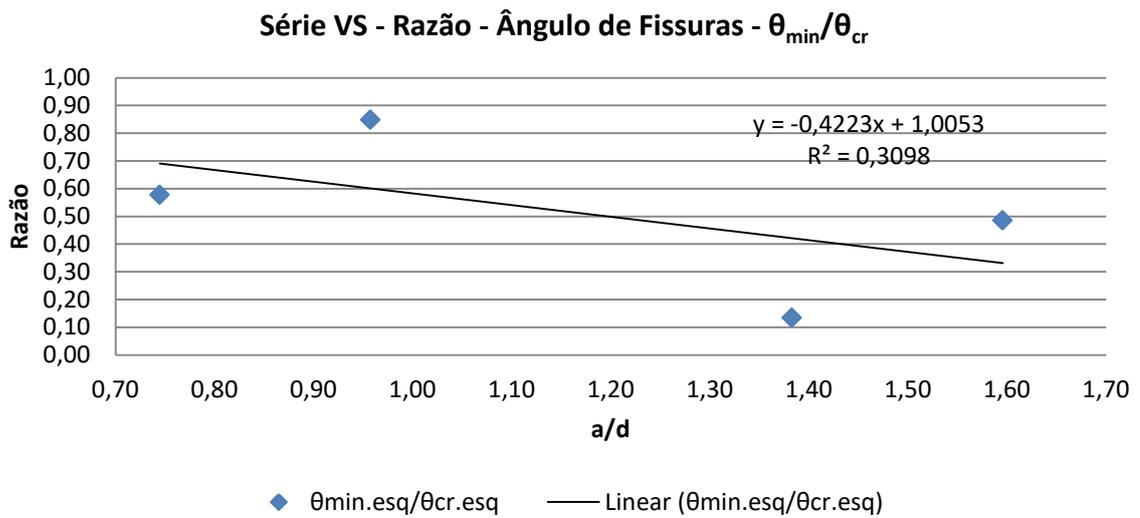


Figura 0.20 – Razão entre os ângulos de fissuras $\theta_{\min}/\theta_{cr}$, vigas série VS.

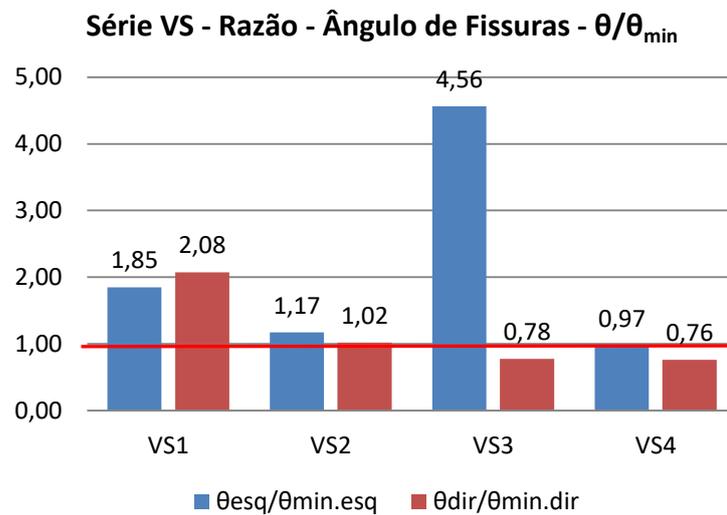


Figura 0.21 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{\min} , vigas série VS.

O gráfico da Figura 0.22 mostra que não houve correlação entre a razão θ/θ_{\min} e a razão a/d para as vigas da série VS.

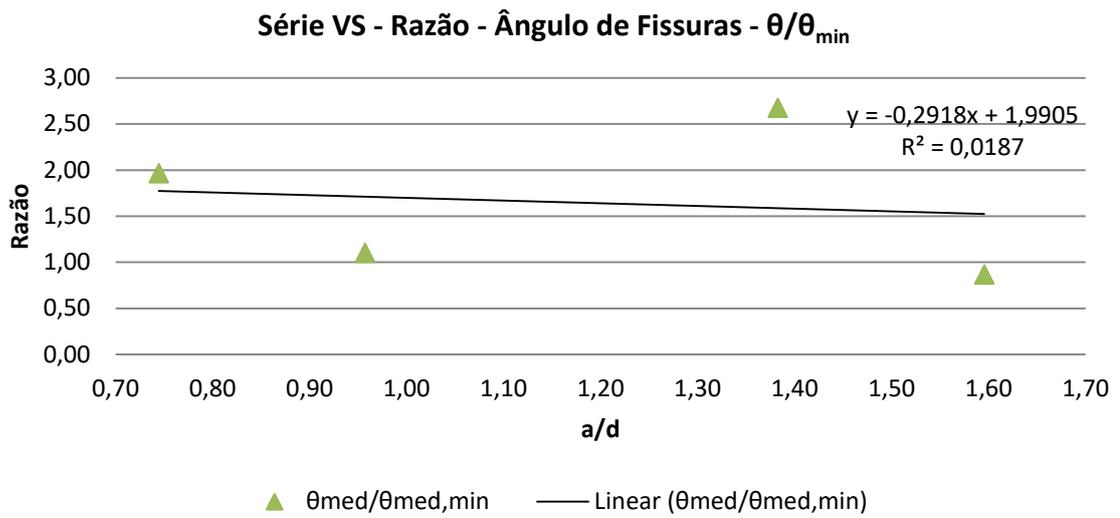


Figura 0.22 – Razão entre os ângulos de fissuras θ/θ_{min} , vigas série VS.

5 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Ao longo da história a forma de se projetar evoluiu. Atualmente, existe um consenso no que diz respeito à classificação dos métodos de dimensionamento segundo à segurança e à economia. Essa classificação é apresentada a seguir.

- Nível 0: método das tensões admissíveis. Utiliza apenas as resistências médias.
- Nível 1: métodos semi-probabilísticos ou LRFD (“Load and Resistance Factor Design”). Utiliza a média e o desvio padrão das resistências e cargas, e em alguns casos as distribuições de probabilidade.
- Nível 2: métodos semi-probabilísticos com Otimização (SPDO – Semi-Probabilistic Design Optimization). Equivale à utilização dos métodos do nível 1 com o emprego de otimização.
- Nível 3: métodos baseados em confiabilidade. Utiliza dados estatísticos completos das variáveis aleatórias.
- Nível 4: métodos baseados em confiabilidade e otimização. Equivale à utilização dos métodos do nível 3 com o emprego de otimização.
- Nível 5: método baseado em risco e otimização. Equivale ao emprego dos métodos de nível 4, mas é superior no que diz respeito à economia.

5.1 NOTAS INICIAIS

A confiabilidade estrutural é uma ferramenta que permite considerar as incertezas inerentes às variáveis de projeto por meio das correspondentes distribuições de probabilidade, e das características estatísticas das variáveis aleatórias, tais como média, desvio padrão, coeficiente de assimetria (*Skewness*) e curtose (*Kurtosis*). O emprego dessa ferramenta permite obter:

- a probabilidade de falha da estrutura;
- a avaliação do nível de segurança global da estrutura como um todo;
- a sensibilidade do projeto em relação a cada uma das variáveis aleatórias envolvidas;
- a calibração dos fatores de segurança a partir da definição de um nível alvo considerado aceitável para a probabilidade de falha estrutural.

O índice de confiabilidade de referência corresponde a um valor mínimo para o índice de confiabilidade de uma estrutura, sendo esse valor associado a um valor máximo de probabilidade de falha da estrutura.

A definição da probabilidade de falha limite (aceitável) de uma estrutura está relacionada a fatores sociais, econômicos, políticos e outros. No Brasil ainda não há disposição normativa que regule o nível de confiabilidade necessária aos diversos tipos de estruturas (SOUZA, 2011).

O EUROCODE EN 1990 (2002) define os índices de confiabilidade de referência a partir de consequências de falha, classes de confiabilidade e períodos de retorno. As classes de consequência de falha são definidas em função do impacto causado pela ocorrência da falha, ou seja, número de perdas de vidas humanas, consequências ambientais, sociais e econômicas.

A Tabela 0.1 apresenta cada uma das classes, o grau de impacto e um exemplo associado à classe.

Tabela 0.1 – Classes de consequência de falha, grau de impacto e exemplo;

EUROCODE EN 1990 (2002).

Classe de Consequência de Falha	Grau de Impacto	Exemplo
CC1	Pequeno	Construções agrícolas (pouco trânsito de pessoas)
CC2	Moderado	Residências, prédios comerciais, hotéis, escolas
CC3	Elevado	Teatros, prédios públicos, pontes com utilização significativa

A Tabela 0.2 apresenta a definição da classe de consequência de acordo com a frequência de uso e consequência de falha.

Tabela 0.2 – Classes de consequências; EUROCODE EN 1990 (2002).

Frequência de uso	Consequência de falha		
	Baixa	Média	Alta
Baixa	CC1	CC2	CC3
Média	CC2	CC2	CC3
Alta	---	CC3	CC3

As classes de consequência de falha CC1, CC2 e CC3 estão relacionadas, respectivamente, às classes de confiabilidade RC1, RC2 e RC3. A Tabela 0.3 apresenta os

índices de confiabilidade de referência β_r , em função da classe de confiabilidade e do tempo de recorrência.

Tabela 0.3 – Índices de confiabilidade de referência β_r ; EUROCODE EN 1990 (2002).

Classes de Consequência	Classes de Confiabilidade	Índice de confiabilidade de referência – E.L.U.	
		1 Ano	50 Anos
CC1	RC1	4,2	3,3
CC2	RC2	4,7	3,8
CC3	RC3	5,2	4,3

Para o estudo desenvolvido neste trabalho, o EUROCODE EN 1990 (2002) indica a adoção de um índice de confiabilidade $\beta = 3,8$, o que corresponde a uma probabilidade de falha $p_f = 7,2 \times 10^{-5}$. Isso indica que nos projetos estruturais nos quais foram adotados os coeficientes parciais de segurança, a probabilidade de falha é da ordem de 10^{-4} , o que significa uma única peça atingindo o E.L.U. em um tempo de recorrência de 50 anos em um lote de 10.000 peças do mesmo tipo, apresentando um significado convencional e em termos práticos como medida adequada de dimensionamento.

A análise de confiabilidade depende da qualidade dos dados estatísticos das variáveis aleatórias envolvidas no problema em estudo e da precisão do modelo matemático usado para a análise das funções de estado limite (funções de falha). Nos itens seguintes são apresentados os conceitos envolvidos na análise de confiabilidade.

5.2 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

Quando os resultados de um determinado fenômeno são previsíveis, o fenômeno é denominado de determinístico e as variáveis envolvidas são ditas determinísticas. Contrapondo, quando os resultados não são previsíveis, o fenômeno é denominado de aleatório ou randômico e as variáveis envolvidas são ditas aleatórias. Nesse caso, cada resultado do experimento é associado a uma probabilidade, ou seja, à frequência de ocorrência do resultado dentre diversos resultados obtidos nos experimentos realizados.

Os vários resultados de um fenômeno aleatório podem ser vistos como os resultados de uma função. Essa função é definida como variável aleatória. Um determinado resultado dentre os diversos possíveis tem valor de probabilidade entre 0 e 1. O somatório de todos os resultados possíveis sempre será 1 (Figura 0.1).

Então se X é uma variável aleatória define-se a função de densidade de probabilidade $f_X(x)$, usualmente denominada como PDF (*Probability Density Function*):

$$P\left(x - \frac{dx}{2} \leq X \leq x + \frac{dx}{2}\right) = f_X(x)dx \quad (0.1)$$

A PDF associada a um intervalo (a, b) , ou seja, a probabilidade de se obter valores da variável aleatória X pertencentes ao intervalo (a, b) é definido de acordo com:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f_X(x)dx \quad (0.2)$$

Uma função PDF pode ser qualquer função que satisfaça às seguintes condições:

- 1º: $f_X(x) \geq 0$, para qualquer x ;
- 2º: $\int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x)dx = 1,0$;
- 3º: $\int_a^b f_X(x)dx = P(a \leq X \leq b)$.

Define-se a função cumulativa de densidade de probabilidade $F_X(a)$, usualmente denominada como CDF (*Cumulative Density Function*), ou seja, a probabilidade de se obter valores da variável aleatória X menores ou iguais a a , por:

$$F_X(a) = \int_{-\infty}^a f_X(x)dx \quad (0.3)$$

Uma função CDF pode ser qualquer função que satisfaça as seguintes condições:

- 1º: $F_X(-\infty) = 0$;
- 2º: $0 \leq F_X \leq 1$;
- 3º: $F_X(\infty) = 1$.

A PDF e a CDF são apresentadas graficamente na Figura 0.1.

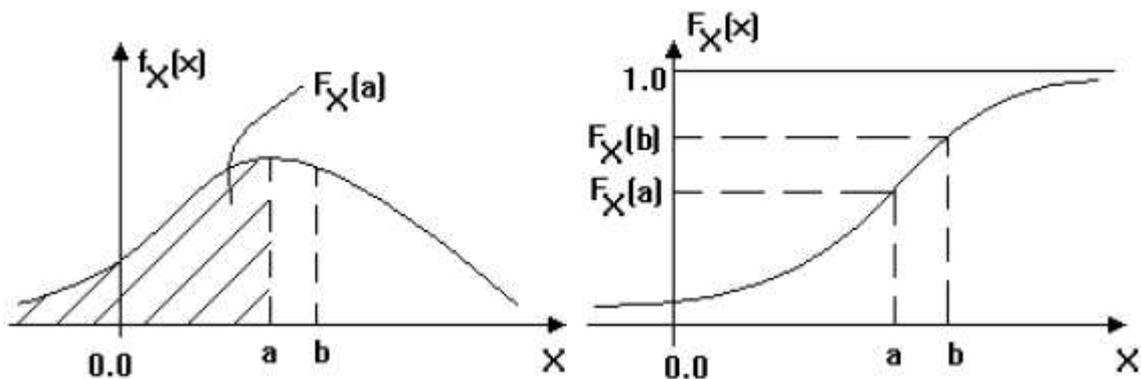


Figura 0.1 – PDF e CDF, respectivamente.

As variáveis aleatórias são caracterizadas por parâmetros que indicam o comportamento da função que define cada variável aleatória.

A média corresponde ao valor esperado da variável aleatória, sendo expresso por:

$$E(X) = \mu_X = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx \quad (0.4)$$

A variância mede a dispersão dos valores da variável X em torno da média, sendo:

$$Var(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X)^2 f_X(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_X(x) dx - \mu_X^2 \quad (0.5)$$

Em estatística é mais comum se trabalhar com a raiz quadrada da variância; a grandeza resultante é denominada de desvio padrão, dada por:

$$\sigma_X = \sqrt{Var(X)} \quad (0.6)$$

O coeficiente de variação mede a dispersão dos dados em torno da média de maneira adimensional, sendo o coeficiente de variação:

$$\delta_X = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \quad (0.7)$$

Baixos valores do coeficiente de variação indicam que os valores da variável aleatória estão distribuídos próximos à média, enquanto que valores altos indicam uma forte dispersão em torno da média.

5.3 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

Uma função que satisfaça as condições de uma PDF, descritas no item 0, pode ser usada como uma distribuição de probabilidades. Essa função deve representar estatisticamente um determinado fenômeno que está sendo investigado. Na literatura existem diversas funções que atendem às condições descritas, algumas são apresentadas a seguir.

5.3.1 Distribuição Normal e Normal Padrão

A distribuição de densidade de probabilidade normal é definida pelos parâmetros média μ_X e o desvio padrão σ_X :

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2} \quad (0.8)$$

Em geral, se introduz uma variável auxiliar, denominada variável reduzida:

$$Y = \frac{X - \mu_X}{\sigma_X} \quad (0.9)$$

Essa variável reduzida conduz à distribuição de densidade de probabilidade normal padrão reduzida. Essa distribuição tem média zero e desvio padrão um, sendo expressa por:

$$f_Y(y) = \phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}y^2} \quad (0.10)$$

A distribuição cumulativa de densidade de probabilidade normal padrão reduzida é dada por:

$$F_Y(y) = \Phi(y) = \int_{-\infty}^y \phi(y) dy \quad (0.11)$$

5.3.2 Distribuição Lognormal

Uma variável aleatória X tem distribuição lognormal quando $\ln(X)$ pode ser representado por uma distribuição normal, sendo definida pelos parâmetros λ que é a média de $\ln(X)$, e ξ que é o desvio padrão de $\ln(X)$. A função de distribuição lognormal é dada por:

$$f_X(x) = \frac{1}{\xi x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2} \quad (0.12)$$

A média e o desvio padrão se relacionam com os parâmetros λ e ξ , por meio das expressões:

$$\xi^2 = \ln\left(1 + \left(\frac{\sigma_X}{\mu_X}\right)^2\right) \quad (0.13)$$

$$\lambda = \ln(\mu_X) - \frac{1}{2}\xi^2 \quad (0.14)$$

5.3.3 Distribuição de Valores Extremos

Na maioria dos problemas de engenharia os valores expressivos de uma variável aleatória são os valores máximos e mínimos. Com essa característica tem-se o conceito de distribuição de valores extremos, que consiste em ajustar uma distribuição de densidade de probabilidade às amostras de valores extremos.

Na literatura existem basicamente três tipos de distribuição de valores extremos: Tipo I (Gumbel, máximos e mínimos), Tipo II (Weibull, máximos) e Tipo III (Weibull, mínimos). Essas distribuições de probabilidade aplicadas a valores extremos são apresentadas a seguir.

5.3.3.1 Distribuição de Gumbel (Máximos e Mínimos)

A distribuição de valores extremos máximos de Gumbel é definida por dois parâmetros, u e α . Esses parâmetros se relacionam com a média e o desvio padrão por meio das expressões:

$$\mu_X = u + \frac{0,5772}{\alpha} \quad (0.15)$$

$$\sigma_X = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}} \quad (0.16)$$

A função de distribuição de valores extremos máximos de Gumbel é dada por:

$$f_X(x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad (0.17)$$

A distribuição de valores extremos mínimos de Gumbel é definida por dois parâmetros, u e α . Esses parâmetros se relacionam com a média e o desvio padrão por meio das expressões:

$$\mu_X = u - \frac{0,5772}{\alpha} \quad (0.18)$$

$$\sigma_X = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}} \quad (0.19)$$

A função de distribuição de valores extremos mínimos de Gumbel é dada por:

$$f_X(x) = 1 - e^{-e^{\alpha(x-u)}} \quad (0.20)$$

5.3.3.2 Distribuição Weibull (Máximos e Mínimos)

A distribuição de valores extremos máximos de Weibull é definida por dois parâmetros, v e k . Esses parâmetros se relacionam com a média e o desvio padrão por meio das expressões:

$$\mu_X = v\Gamma\left(1 - \frac{1}{k}\right) \quad (0.21)$$

$$\sigma_X = v\sqrt{\Gamma\left(1 - \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{k}\right)} \quad (0.22)$$

A função de distribuição de valores extremos máximos de Weibull é dada por:

$$f_X(x) = e^{-\left(\frac{v}{x}\right)^k} \quad (0.23)$$

A distribuição de valores extremos mínimos de Weibull é definida por dois parâmetros, ν e k . Esses parâmetros se relacionam com a média e o desvio padrão por meio das expressões:

$$\mu_X = \nu \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (0.24)$$

$$\sigma_X = \nu \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (0.25)$$

A função de distribuição de valores extremos mínimos de Weibull é dada por:

$$f_X(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\nu}\right)^k} \quad (0.26)$$

Nas expressões (0.21) à (0.25) o símbolo Γ se refere à função Gamma.

5.4 TESTE DE ADERÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO À AMOSTRA

Numa determinada amostra busca-se uma distribuição de probabilidade que melhor a represente. Dentre os diversos métodos de teste de aderência das curvas de distribuição de probabilidades existentes destacam-se os métodos: Gráficos P-P (probabilidades empíricas acumuladas x teóricas acumuladas), Chi Quadrado e Kolmogorov-Smirnov.

5.5 CONCEITO DE FUNÇÃO DE FALHA

O principal objetivo da confiabilidade estrutural é a avaliação da segurança de uma estrutura, ou a avaliação da probabilidade de que a mesma não falhe. A confiabilidade é definida como o complemento da probabilidade de falha:

$$C = 1 - P_f \quad (0.27)$$

onde C é a confiabilidade da estrutura e P_f é a probabilidade de falha.

Entretanto, como a probabilidade de falha das estruturas é em geral muito pequena (entre 10^{-3} e 10^{-6}), é usual tomar a probabilidade de falha como medida de confiabilidade da estrutura.

A avaliação da probabilidade de falha é baseada numa função de desempenho do sistema em estudo. Essa função é denominada como função de estado limite, função de falha ou margem de segurança; para o caso bidimensional é denominada como superfície de falha. Geralmente a função de falha é representada por $G(U)$, onde U é o conjunto de todas as variáveis aleatórias envolvidas. A Figura 0.2 apresenta uma representação da função de falha para o caso bidimensional.

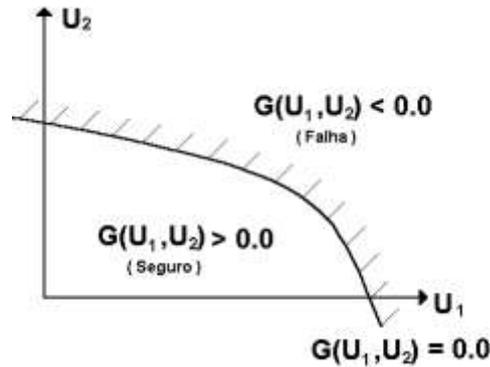


Figura 0.2 – Representação da função de falha.

Em geral as equações matemáticas utilizadas em engenharia para a realização do dimensionamento são equações que contêm uma parcela referente à resistência R e outra parcela referente às solicitações S . Para que não ocorra nem o sub ou super dimensionamento, igualam-se as parcelas R e S . Dessa forma, tem-se:

$$G(U) = R - S \quad (0.28)$$

Como as variáveis que irão compor R e S são aleatórias, o interesse da confiabilidade recai em calcular a probabilidade de falha, ou seja:

$$Pf = P(G(U) \leq 0) \quad (0.29)$$

Como a função $G(U)$ é função do conjunto U de variáveis aleatórias, então a própria função $G(U)$ é uma variável aleatória. Logo existe uma função de densidade de probabilidade conjunta $f_u(U)$ de todas as variáveis aleatórias envolvidas na análise de $G(U)$. A probabilidade de falha em função de $f_u(U)$ ao longo do domínio de falha $G(U) \leq 0$ é dada por:

$$Pf = \int f_u(U) du \quad (0.30)$$

A avaliação da expressão (0.30) é muito complexa, pois na maioria das vezes não há uma função explícita para a função de densidade de probabilidade conjunta, e o cálculo de uma integral n -dimensional (n é o número de variáveis aleatórias de U) em um domínio complexo $G(U) \leq 0$ demanda grande esforço computacional. Devido a isso alguns métodos visam facilitar ou simplificar o cálculo da probabilidade de falha.

5.5.1 Função de Falha com Várias Variáveis Aleatórias

Quando as variáveis aleatórias são não correlacionadas a função de densidade de probabilidade conjunta é dada pelo produto das funções de densidade de probabilidade de cada variável aleatória independentemente:

$$f_{x,y,\dots,z}(x,y,\dots,z) = f_x(x)f_y(y) \dots f_z(z) \quad (0.31)$$

Quando as variáveis aleatórias são correlacionadas, na maioria dos casos não se dispõe da função de densidade de probabilidade conjunta. Assim os métodos que serão discutidos no item 0 se concentram em descorrelacionar as variáveis aleatórias para se trabalhar utilizando-se a expressão (0.31).

5.5.2 Covariância e Coeficiente de Correlação

Quando duas ou mais variáveis aleatórias estão envolvidas no mesmo espaço de probabilidades, caso típico de funções de falha é importante conhecer como as variáveis aleatórias variam conjuntamente, ou seja, se o comportamento de uma variável influencia no comportamento da outra. A covariância estabelece a relação entre as variáveis aleatórias duas a duas, sendo dada pela expressão:

$$\begin{aligned} COV(X,Y) &= E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)] = E(XY) - E(X)E(Y) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xyf_{x,y}(x,y)dxdy - \mu_x\mu_y \end{aligned} \quad (0.32)$$

onde E corresponde ao valor esperado, e $f_{x,y}(x,y)$ é a função de densidade de probabilidade conjunta bidimensional.

Uma grandeza mais usual em confiabilidade para expressar a relação linear entre variáveis aleatórias duas a duas é o coeficiente de correlação $\rho_{x,y}$, cujo domínio restringe-se a $[-1,1]$. Essa grandeza adimensional é função da covariância $COV(X,Y)$ e dos desvios padrões das variáveis X e Y :

$$\rho_{x,y} = \frac{COV(X,Y)}{\sigma_x\sigma_y} \quad (0.33)$$

A

Tabela 0.4 apresenta a classificação do grau de dependência entre as variáveis aleatórias (MELCHERS, 2002).

Tabela 0.4 – Grau de dependência entre as variáveis; MELCHERS (2002).

Intervalo de $\rho_{i,j}$	Grau de dependência
0,0 a 0,3	Baixo
0,3 a 0,5	Médio
0,5 a 0,7	Importante
0,7 a 0,9	Forte
0,9 a 1,0	Muito forte

Fonte: MELCHERS (2002).

A Figura 0.3 apresenta algumas dispersões de pontos indicando a interpretação gráfica do coeficiente de correlação, ou seja, do comportamento conjunto de duas variáveis aleatórias.

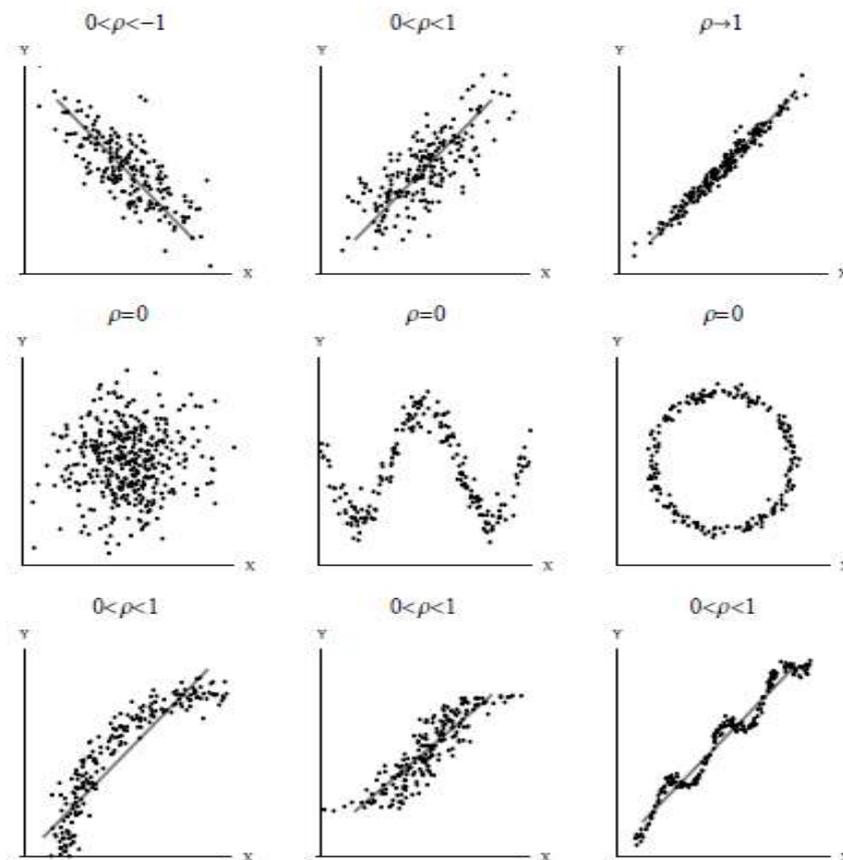


Figura 0.3 – Interpretação gráfica do coeficiente de correlação

Fonte: BECK (2010).

Em análise de confiabilidade as relações duas a duas entre as diversas variáveis aleatórias são sintetizadas na matriz de correlação ρ , cujos termos são dados por:

$$\rho_{i,j} = \rho_{x_i,x_j} \quad (0.34)$$

Na matriz de correlação a diagonal da matriz contém apenas o valor 1, pois o coeficiente de correlação entre a variável aleatória e ela mesma resulta no valor 1:

$$\rho_{i,j} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{x_1,x_2} & \dots & \rho_{x_1,x_n} \\ \rho_{x_2,x_1} & 1 & \dots & \rho_{x_2,x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{x_n,x_1} & \rho_{x_n,x_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (0.35)$$

5.6 MÉTODOS DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

5.6.1 Método FOSM

O método FOSM ("First Order Second Moment") foi o primeiro método concebido. Trata-se de um método de primeira ordem, pois a função de falha é aproximada por uma função linear em torno da média. Denomina-se segundo momento, pois necessita do primeiro momento (média) e do segundo momento (variância).

O método analítico FOSM foi o primeiro método desenvolvido e o primeiro utilizado para a definição do índice de confiabilidade. Restringe-se às variáveis aleatórias normais e independentes, sendo aplicável a funções de falha lineares e não lineares aproximadas por uma função linear em torno da média. A Figura 0.4 apresenta uma função de falha não linear aproximada por uma função linear em torno da média.

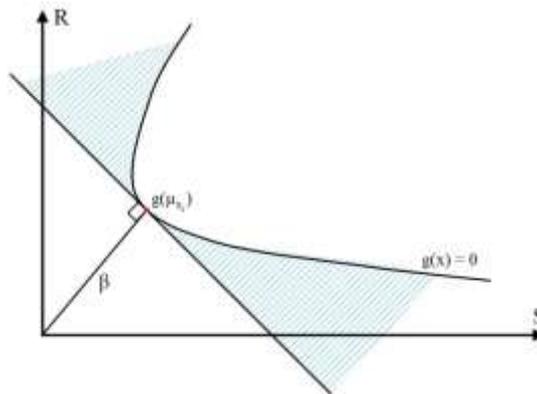


Figura 0.4 – Função de falha não linear aproximada por uma função linear em torno da média

Fonte: BECK (2010).

Quando a função de falha é composta por variáveis aleatórias normais e estatisticamente independentes, a própria função de falha pode ser considerada como uma variável aleatória normal, com sua respectiva distribuição de densidade de probabilidade

$f_u(U)$. Então, considerando-se as expressões (0.30) e (0.31), a probabilidade de falha é dada pela área hachurada do gráfico apresentado na Figura 0.5.

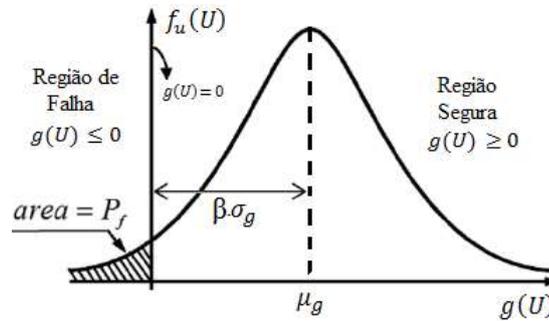


Figura 0.5 – Função de densidade de probabilidade da função de falha, admitida como variável aleatória com distribuição normal.

Na Figura 0.5 tem-se o índice de confiabilidade β , expressão (0.36), que corresponde à razão entre o valor esperado de $G(U)$ e o desvio padrão de $G(U)$, ou seja, quantos desvios padrões a média de $G(U)$ está distante de $G(U) = 0$, assim:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (0.36)$$

Observando-se a Figura 0.5 constata-se que a probabilidade de falha corresponde a:

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_u(U) du \quad (0.37)$$

A Tabela 0.5 apresenta a razão entre os valores do índice de confiabilidade β e a probabilidade de falha P_f .

Tabela 0.5 – Relação entre β e P_f .

β	P_f
0,00	$0,500 \times 10^0$
0,50	$0,309 \times 10^0$
1,00	$0,159 \times 10^0$
1,50	$0,668 \times 10^{-1}$
2,00	$0,228 \times 10^{-1}$
2,50	$0,621 \times 10^{-2}$
3,00	$0,135 \times 10^{-2}$
3,50	$0,233 \times 10^{-3}$
4,00	$0,317 \times 10^{-4}$

5.6.2 Método AFOSM

O método analítico AFOSM ("Advanced First Order Second Moment") é o resultado de uma evolução do método FOSM. Restringe-se a variáveis aleatórias normais e independentes, sendo aplicável a funções de falha lineares e não lineares aproximadas por uma função linear em torno do ponto de projeto y^* .

A diferença entre o FOSM e o AFOSM reside no fato que no FOSM a função de falha é linearizada em torno da média, enquanto no AFOSM a função de falha é linearizada em torno do ponto de projeto. A Figura 0.6 apresenta uma função de falha não linear aproximada por uma função linear em torno do ponto de projeto y^* .

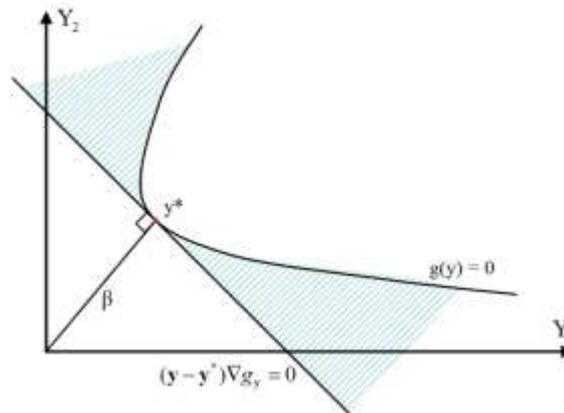


Figura 0.6 – Função de falha não linear aproximada por uma função linear em torno do ponto de projeto;

Fonte: adaptado de BECK (2010).

O método AFOSM também difere do FOSM, porque adota a variável normal padrão reduzida Y , cuja transformação é dada pela expressão (0.9). Assim, com a expressão (0.28) e a transformação dada pela expressão (0.9), substituindo-se X por R e S tem-se a função de falha $G(Y)$ em relação ao espaço normal padrão reduzido, dada por:

$$G(U) = R - S$$

$$y_1 = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} ; y_2 = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S} \quad (0.38)$$

$$G(Y) = \mu_R + y_1 \sigma_R - (\mu_S + y_2 \sigma_S)$$

A Figura 0.7 apresenta o resultado da transformação dada pelas expressões (0.38).

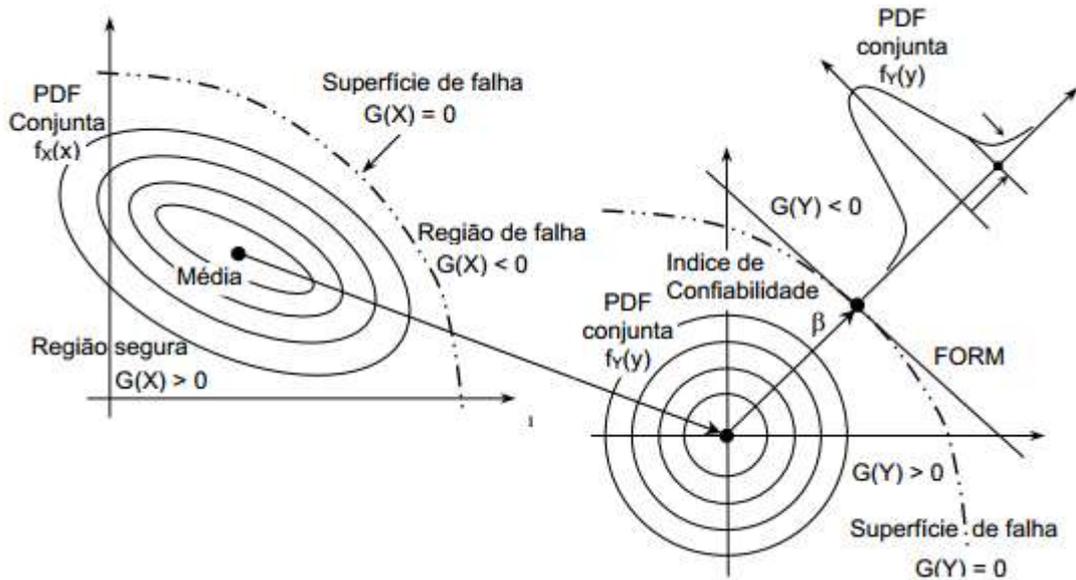


Figura 0.7 – Transformação do espaço normal para o espaço normal padrão reduzido;

Fonte: CHOI e YOUNG (2001).

O cálculo do índice de confiabilidade β consiste na distância entre a origem e o ponto de projeto y^* :

$$\beta = \|y^*\| \quad (0.39)$$

O ponto de projeto y^* é o ponto sobre a reta $G(Y) = 0$, cuja distância à origem é a menor possível. A busca pelo ponto de projeto pode ser representada por um problema de otimização com uma restrição tal que:

$$\begin{aligned} P: & \text{minimiza } |y| \\ & \text{sujeito a } G(y) = 0 \end{aligned} \quad (0.40)$$

Trata-se de um método iterativo, onde a cada iteração a superfície de falha é aproximada por uma superfície linear tangente ao ponto de pesquisa.

HASOFER e LIND (1974) e RACKWITZ e FIESLER (1978) apresentaram algoritmos para a solução deste problema de otimização. Esses algoritmos foram desenvolvidos em 1974 e posteriormente aprimorados em 1978, passando a ser comumente identificado como algoritmo HLRF.

A Figura 0.8 apresenta graficamente a busca pelo ponto de projeto y^* de acordo com o algoritmo HLRF.

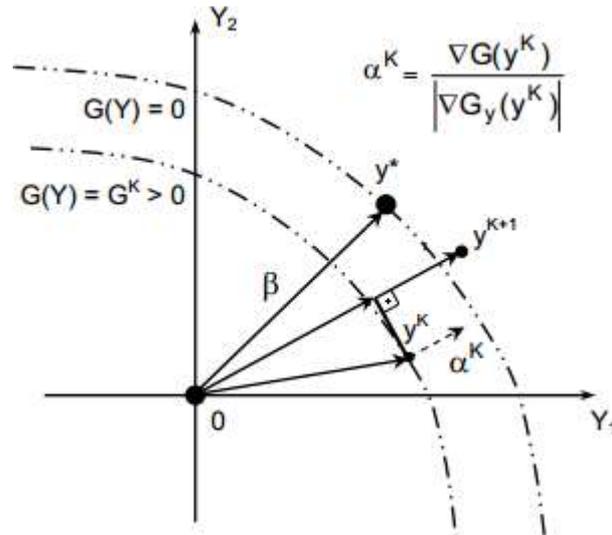


Figura 0.8 – Busca pelo ponto de projeto y^* ;

Fonte: adaptado de LOPES (2007).

Esse método iterativo está baseado na aproximação de um ponto qualquer y à superfície $G(Y) = 0$ e na ortogonalidade entre o valor y e a superfície $G(Y) = 0$, sendo o ponto y_{k+1} avaliado em função do ponto y_k , dado por:

$$y_{k+1} = \frac{\nabla_y G(y_k)}{|\nabla_y G(y_k)|^2} [\nabla_y G(y_k)^T y_k - G(y_k)] \quad (0.41)$$

O ponto correspondente a y_{k+1} no espaço original é:

$$x_{k+1} = x_k + (J^{-1})^T (y_{k+1} - y_k) \quad (0.42)$$

onde J é o jacobiano.

O processo iterativo adota como ponto de projeto de partida as médias das variáveis aleatórias, sendo interrompido quando há uma estabilização do ponto de projeto y^* em relação a uma tolerância definida:

$$\frac{\|y^*\| - \|y_{k+1}\|}{\|y^*\|} \leq \text{tolerância} \quad (0.43)$$

Definido o ponto de projeto, o índice de confiabilidade é dado pela distância entre esse ponto e a origem (expressão (0.39)).

A probabilidade de falha fica:

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\beta} f_u(Y) dy \quad (0.44)$$

Tanto o método FOSM quanto o método AFOSM tiveram grande importância para o entendimento inicial do conceito de índice de confiabilidade. Entretanto, devido ao seu

restrito leque de aplicações, somente para variáveis aleatórias normais e estatisticamente independentes, caiu em desuso. Outro fator importante é que esse método retorna valores diferentes do β para sistemas mecanicamente equivalentes. Por exemplo, a função de falha $G = R - S$, $G = 0$ é o estado limite, mas também pode-se definir $G = R/S$, $G = 1$ como estado limite. Entretanto, cada uma das funções de falha retorna um β diferente, o que não poderia ocorrer já que mecanicamente o significado é o mesmo. Tendo em vista esses fatores o método foi abandonado, mas serviu de precursor dos métodos mais eficientes e robustos para o cálculo do índice de confiabilidade, como FORM, SORM e Monte Carlo.

5.6.2 Método FORM

O método analítico FORM ("*First Order Reliability Method*") segue a mesma lógica de cálculo do Método AFOSM. Entretanto, é mais generalista permitindo trabalhar com variáveis aleatórias com distribuições quaisquer, podendo as variáveis aleatórias envolvidas serem estatisticamente dependentes entre si ou não.

No que diz respeito às variáveis aleatórias serem normais, o FORM contorna a limitação do AFOSM transformando qualquer tipo de distribuição em uma distribuição normal equivalente em um determinado ponto. Isso é realizado igualando-se as funções densidade de probabilidade e cumulativa da distribuição normal (ϕ e Φ), dadas nas expressões (0.10) e (0.11), respectivamente, e da distribuição real da variável aleatória não normal x_i (F e f) em um determinado ponto x_a , conforme o sistema dado pelas expressões:

$$\Phi\left(\frac{x_a - \mu_{x_{iN.eq}}}{\sigma_{x_{iN.eq}}}\right) = F(x_a) \quad (0.45)$$

$$\frac{1}{\sigma_{x_{iN.eq}}} \phi\left(\frac{x_a - \mu_{x_{iN.eq}}}{\sigma_{x_{iN.eq}}}\right) = f(x_a) \quad (0.46)$$

Assim forma-se um sistema cujo resultado retorna a média e o desvio padrão da distribuição normal equivalente em um determinado ponto x_a , definido pelas expressões:

$$\sigma_{x_{iN.eq}} = \frac{\phi\left(\Phi^{-1}(F(x_a))\right)}{f(x_a)} \quad (0.47)$$

$$\mu_{x_{iN.eq}} = x_a - \sigma_{x_{iN.eq}} \Phi^{-1}(F(x_a)) \quad (0.48)$$

onde Φ^{-1} é a inversa da função de distribuição cumulativa normal CDF.

A Figura 0.9 apresenta o resultado do processo de transformação de uma distribuição qualquer em uma distribuição normal equivalente num determinado ponto.

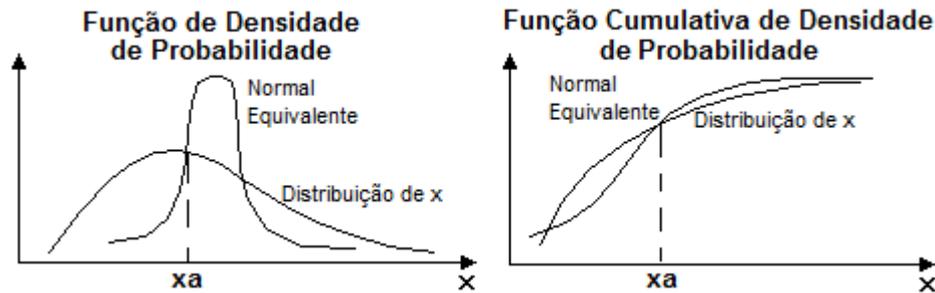


Figura 0.9 – Transformação de uma distribuição qualquer em normal equivalente em um determinado ponto.

Quando as variáveis aleatórias envolvidas são estatisticamente dependentes também deve-se transformar os coeficientes de correlação ρ_{ij} entre as variáveis, obtidos pela expressão (0.33), em coeficientes normais equivalentes $\rho_{ij_{N.eq}}$. Essa transformação pode ser realizada empregando-se:

$$\rho_{ij_{N.eq}} = F \rho_{ij} \quad (0.49)$$

onde F é um valor que depende dos coeficientes de variação δ_i e δ_j , da correlação ρ_{ij} das variáveis aleatórias x_i e x_j , e do tipo de distribuição, não dependendo do ponto onde a transformação está sendo realizada. Vários autores estimam o valor de F a ser aplicado na expressão (0.50). A obtenção de F proposta por MELCHERS (2002), cujos coeficientes (a até h , k e l) podem ser encontrados em tabelas constantes na bibliografia, sendo dado por:

$$F = a + b\delta_i + c\delta_i^2 + d\rho_{ij} + e\rho^2 + f\rho_{ij}\delta_i + g\delta_j + h\delta_j^2 + k\rho_{ij}\delta_j + l\delta_i\delta_j \quad (0.50)$$

Em relação às variáveis aleatórias normais serem estatisticamente independentes, o FORM contorna a limitação do AFOSM transformando as variáveis aleatórias normais estatisticamente dependentes ou não em estatisticamente independentes, mediante a transformação de Nataf (expressão (0.51)). Essa transformação também transforma as variáveis aleatórias normais e normais equivalentes x_i em normais padrão reduzidas y_i , assim:

$$Y = \Gamma \sigma^{-1}(X - m) \quad (0.51)$$

onde

Y – vetor que contém as variáveis aleatórias normais padrão estatisticamente independentes y_i ;

σ – matriz diagonal com os desvios padrões das variáveis aleatórias normais e normais equivalentes σ_{xi} ;

X – vetor das variáveis aleatórias normais e normais equivalentes x_i correlacionadas ou não;

m – vetor que contém as médias das variáveis aleatórias normais e normais equivalentes μ_{xi} ;

Γ – inversa da matriz triangular inferior obtida da decomposição de Choleski da matriz dos coeficientes de correlação ρ_{xi} .

Aplicando-se as transformações descritas obtém-se como resultado em um determinado ponto, variáveis aleatórias normais padrão estatisticamente independentes, condição necessária à aplicação do método AFOSM. Daí em diante prossegue-se aplicando-se o algoritmo de busca HLRF do ponto de projeto, conforme as expressões (0.41) e (0.42). Encontrado o ponto de projeto y^* , o índice de confiabilidade β e a probabilidade de falha P_f podem ser calculados conforme as expressões (0.39) e (0.44), respectivamente.

Para funções de falha lineares o método FORM fornece valores exatos para a probabilidade de falha e índice de confiabilidade. Entretanto, para funções de falha não lineares fornece uma aproximação para o cálculo da probabilidade de falha, pois a função de falha é aproximada por uma função linear no ponto de projeto. Dependendo da concavidade da função de falha no espaço reduzido, o método FORM pode ser a favor (superfície de falha convexa) ou contra (superfície de falha côncava) a segurança, conforme pode ser observado na Figura 0.10.

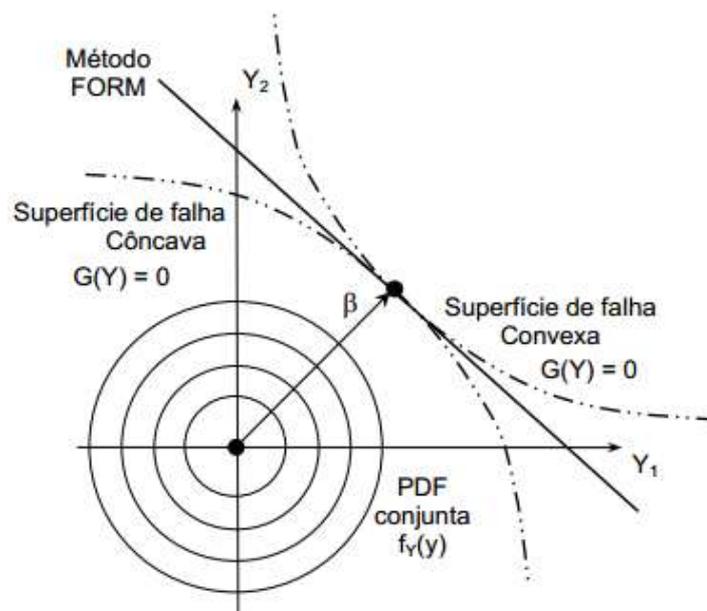


Figura 0.10 – Aproximação do método FORM, superfícies côncavas e convexas;

Fonte: adaptado de LOPES (2007).

O método FORM é o método mais utilizado em análise de confiabilidade devido à sua maior abrangência de aplicabilidade. Com o objetivo de reduzir o erro, fruto da linearização em torno do ponto de projeto, foi desenvolvido o método SORM.

5.6.3 Método SORM

A formulação do método analítico SORM (“*Second Order Reliability Method*”) é muito semelhante ao método FORM. No método FORM a função de falha é linearizada (aproximada por uma função linear) em torno do ponto de projeto y^* . No método SORM a função de falha é aproximada por uma função de segundo grau (parábola) em torno do ponto de projeto y^* . A Figura 0.11 apresenta essa diferença para o caso de duas variáveis aleatórias.

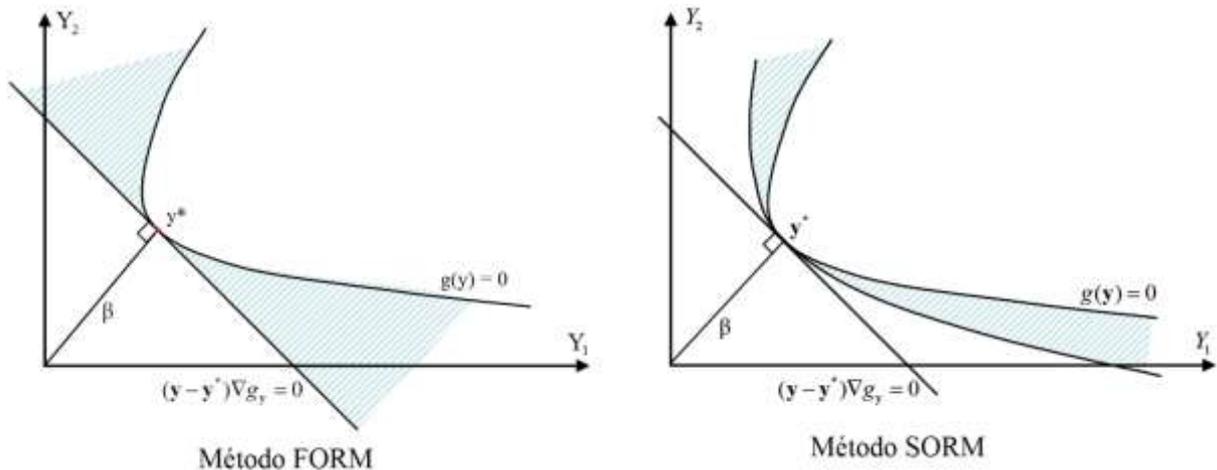


Figura 0.11 – FORM x SORM: comparação da aproximação feita em torno do ponto de projeto;

Fonte: adaptado de BECK (2010).

Existem diversas formulações propostas para realizar essa aproximação. Na formulação mais simples a probabilidade de falha obtida pelo método SORM é dada por:

$$P_f = \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} (1 + \beta K_i)^{-\frac{1}{2}} \quad (0.52)$$

onde

β – índice de confiabilidade obtido pelo método FORM;

K_i – matriz que contém as curvaturas principais da superfície de falha no ponto de projeto y^* ;

n – número de variáveis aleatórias consideradas na função de falha.

Para a determinação da matriz K_i é necessário que as variáveis normais padrão reduzidas y_i sejam rotacionadas formando outro conjunto de variáveis, denominadas y'_i , de

modo que a última variável y'_i coincida com o vetor α (gradiente da função de falha no ponto de projeto y^* no espaço reduzido). A Figura 0.12 apresenta essa rotação considerando-se duas variáveis aleatórias.

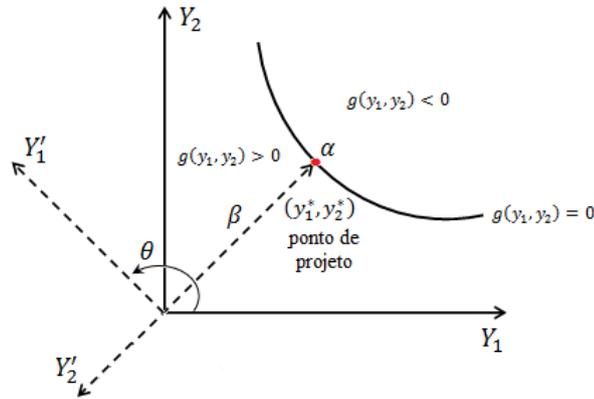


Figura 0.12 – Rotação das variáveis normais padrão reduzidas.

A transformação do espaço y_i para o espaço y'_i é uma transformação ortogonal dada por:

$$y' = Ry \quad (0.53)$$

Para a determinação da matriz R , primeiramente monta-se a matriz R_0 , uma matriz diagonal com a última linha contendo as componentes do vetor α (gradiente da função de falha no ponto de projeto no espaço reduzido), assim:

$$R_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_n \end{pmatrix} \quad (0.54)$$

Em seguida aplica-se o processo de ortogonalização de Gram-Schmidt, descrito a seguir.

Considerando-se as linhas da matriz R_0 nomeadas como $r_{0_1}, r_{0_2}, \dots, r_{0_n}$ e as linhas da matriz R , r_1, r_2, \dots, r_n . As linhas r_{0_i} e r_i são ortogonais entre si e $r_{0_n} = r_n$ (última linha igual para R e R_0). Montando-se a matriz R , a última linha permanece a mesma de R_0 . Para as demais linhas, de $n - 1$ até a primeira linha (obedecendo essa ordem inversa) a linha r_k da matriz R será dada por:

$$r_k = r_{0_k} - \sum_{j=k+1}^n \left(\frac{r_j r_{0_k}^T}{r_j r_j^T} \right) r_j \quad (0.55)$$

Ao final da determinação da matriz R cada linha desta matriz deve ser normalizada, segundo:

$$r_i = \frac{r_i}{\sqrt{r_i r_i^T}} \quad (0.56)$$

Após ser definida a matriz R calcula-se a matriz D , que contém as derivadas de segunda ordem (curvaturas) da função de falha no ponto de projeto y^* no espaço reduzido. Os termos dessa matriz são dados por:

$$D_{i,j} = \frac{\partial}{\partial y_i} \left(\frac{\partial g(y^*)}{\partial y_j} \right) \quad (0.57)$$

É necessário definir a matriz A , cujos termos são dados por:

$$\alpha_{i,j} = \frac{(RDR^T)_{i,j}}{2 \left| \frac{\partial g(y^*)}{\partial y} \right|} \quad (0.58)$$

Após ser definida a matriz A descartam-se suas últimas linha e coluna, resultando na matriz A_N . A matriz K_i corresponde aos autovalores da matriz A_N . Com a matriz K_i , aplica-se a expressão (0.52) para se obter a probabilidade de falha P_f . O índice de confiabilidade β permanece o mesmo avaliado pelo método FORM.

5.6.4 Método de Simulação Monte Carlo

Originalmente o método de Monte Carlo era utilizado no cálculo aproximado de integrais complexas. Em análise de confiabilidade, dado o vetor X das variáveis aleatórias envolvidas na análise e conhecidas as distribuições de densidade de probabilidade $f_{x_i}(x)$ que melhor representam as variáveis aleatórias de X , o método de simulação de Monte Carlo gera n variações de X segundo as distribuições que melhor representam cada uma das variáveis aleatórias.

Considerando-se a expressão (0.30) e com os devidos ajustes para a aplicação do método de simulação de Monte Carlo, tem-se a probabilidade de falha:

$$P_f = \frac{n^\circ \text{ de simulações onde } G(x) < 0}{n} \quad (0.59)$$

onde n corresponde ao número de simulações.

A Figura 0.13 apresenta um exemplo de aplicação do método de simulação de Monte Carlo, considerando-se duas variáveis aleatórias.

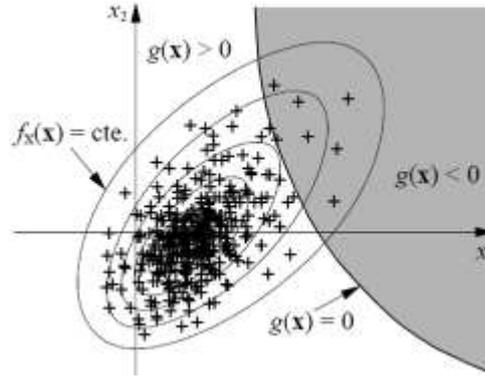


Figura 0.13 – Exemplo de aplicação do método de simulação de Monte Carlo.

Segundo SAGRILO (2014) para as estruturas usuais a probabilidade de falha deve ser pequena, da ordem de 10^{-3} a 10^{-5} . O valor de n deve ser elevado para que se possam obter resultados precisos para a probabilidade de falha. Para se verificar se o tamanho da amostra n está resultando num bom estimador da probabilidade de falha, calcula-se o coeficiente de variação do cálculo da probabilidade de falha:

$$\delta_{pf} = \frac{\sigma_{pf}}{P_f} \quad (0.60)$$

O desvio padrão da probabilidade de falha σ_{pf} é dado por:

$$\sigma_{pf} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} [(n^{\circ} \text{ de simulações onde } G(x) \leq 0)^2 - nP_f^2]} \quad (0.61)$$

Os valores para o coeficiente de variação do cálculo da probabilidade de falha δ_{pf} , entre 0,025 e 0,05, resultam em uma boa aproximação do cálculo.

Por sua simplicidade o método de simulação de Monte Carlo é muito utilizado para aferir outras técnicas aproximadas. Entretanto, uma limitação do método é o grande esforço computacional necessário.

5.6.5 Medidas de Sensibilidade

Os métodos FORM e SORM possibilitam obter a medida de sensibilidade ou o fator de importância de determinada variável aleatória para a falha da estrutura. O fator de importância é obtido para cada variável aleatória, sendo dado por:

$$I_i = \alpha_i^2 \quad (0.62)$$

onde α_i é o cosseno diretor inerente à variável y_i do vetor normal à superfície de falha no ponto de projeto y^* , definido no espaço reduzido de acordo com

$$\alpha_i = \frac{\nabla G(y^*)_i}{|\nabla G(y^*)|} \quad (0.63)$$

onde $\nabla G(y^*)_i$ é a componente do vetor gradiente da função de falha no espaço das variáveis reduzidas no ponto de projeto y^* .

A interpretação prática desse resultado consiste em dar maior atenção às variáveis cujos fatores de importância apresentam valores altos, e a classificação como variáveis determinísticas àquelas que apresentam baixo fator de importância.

5.7 SISTEMAS DE FALHA

Na maioria dos casos em engenharia não há apenas uma função de falha a ser respeitada, mas várias. Nesses casos forma-se um sistema de falha regido por várias funções de falha, cujo índice de confiabilidade e a probabilidade de falha devem ser calculados. Em análise de confiabilidade tal campo é denominado confiabilidade de sistemas.

Os sistemas são descritos a seguir.

- Em Série: todos os eventos devem funcionar, caso contrário o sistema falha.
- Em Paralelo: ao menos um dos eventos deve funcionar. A falha ocorre quando todos não funcionam.
- Paralelo de Séries: todos os eventos de ao menos um ramo do paralelo devem funcionar.
- Série de Paralelos: ao menos um evento de cada paralelo deve funcionar.
- Complexo: qualquer sistema representado por um conjunto dos sistemas anteriores.

A Figura 0.14 ilustra os diversos tipos de sistemas citados.

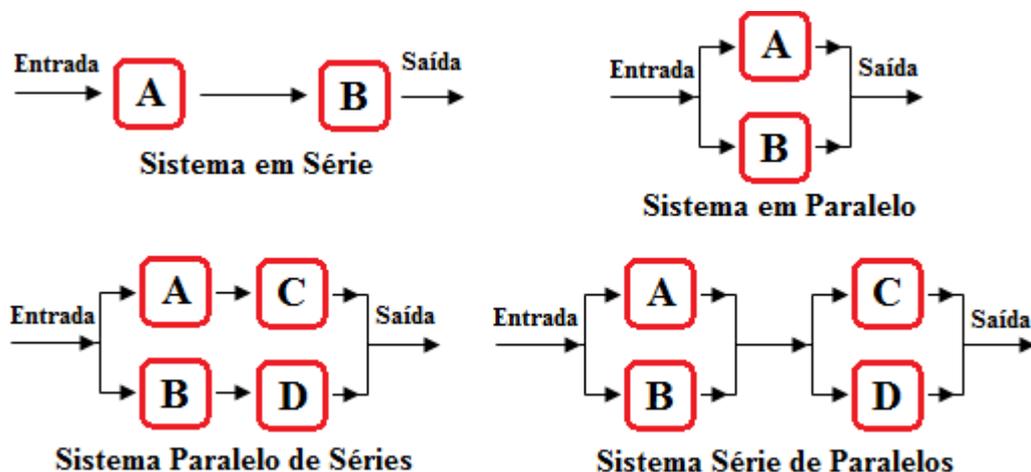


Figura 0.14 – Tipos de sistemas, esquematicamente.

O interesse da engenharia estrutural recai sobre o estudo de sistemas em série, onde devem ser respeitadas as diversas funções de falha para o E.L.U. e E.L.S. A probabilidade de falha P_i e o índice de confiabilidade β_i são comumente calculados pelo método FORM, ou SORM para cada modo de falha. Depois calcula-se a probabilidade do sistema falhar como um todo, considerando-se a contribuição de todos os modos de falha. A Figura 0.15 apresenta dois sistemas em série e um sistema em paralelo, considerando-se duas funções de falha linearizadas no ponto de projeto. A área hachurada corresponde ao domínio de falha.

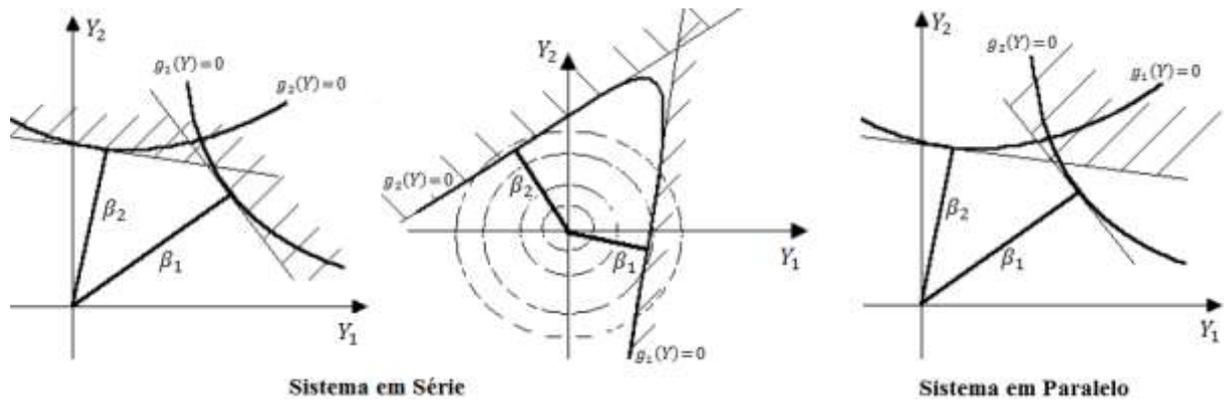


Figura 0.15 – Domínio de falha do sistema em série e em paralelo;

Fonte: SAGRILO (2014).

A probabilidade de falha de um sistema em série é expressa por:

$$P_f = P[(G_1(Y) \leq 0) \cup (G_2(Y) \leq 0) \cup \dots (G_i(Y) \leq 0)] \quad (0.64)$$

Expandindo-se a expressão (0.64) tem-se:

$$P_f = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n P_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=j+1}^n P_{ijk} \quad (0.65)$$

Os significados de P_i , P_{ij} e P_{ijk} são definidos, respectivamente, por:

$$P_i = P[G_i(Y) \leq 0] \quad (0.66)$$

$$P_{ij} = P\{P[G_i(Y) \leq 0] \cap P[G_j(Y) \leq 0]\} \quad (0.67)$$

$$P_{ijk} = P\{P[G_i(Y) \leq 0] \cap P[G_j(Y) \leq 0] \cap P[G_k(Y) \leq 0]\} \quad (0.68)$$

Como as probabilidades de falha dos eventos individuais são baixas, as probabilidades de falha das interseções dos eventos – três a três são tão pequenas que podem ser

desprezadas. Na prática a probabilidade de falha é calculada tomando-se somente as interseções dos eventos dois a dois, resultando em:

$$P_f = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n P_{ij} \quad (0.69)$$

Segundo o método FORM todas as variáveis aleatórias são transformadas em normais padrão estatisticamente independentes. A probabilidade de falha P_i de cada modo de falha é dada pela função cumulativa normal padrão. A probabilidade de falha dois a dois P_{ij} dos modos de falha é dada pela função cumulativa bidimensional normal padrão:

$$P_i = \Phi(-\beta_i) \quad (0.70)$$

$$P_{ij} = \Phi(-\beta_i, -\beta_j, \rho_{i,j}) \quad (0.71)$$

A função cumulativa normal padrão é definida na expressão (0.11). A função cumulativa bidimensional normal padrão é:

$$\Phi(-\beta_i, -\beta_j, \rho_{i,j}) = \Phi(-\beta_i)\Phi(-\beta_j) + \int_0^{\rho_{i,j}} \phi(-\beta_i, -\beta_j, z) dz \quad (0.72)$$

A função de densidade de probabilidade bidimensional normal padrão $\phi(x, y, z)$ é dada por:

$$\phi(x, y, z) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-z^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2+y^2-2zxy}{1-z^2}\right)} \quad (0.73)$$

Na expressão (0.71) $\rho_{i,j}$ é o coeficiente de correlação entre duas funções de falha i e j , sendo calculado em função da componente do vetor unitário normal α à superfície de falha de cada função de falha, calculado em cada ponto de projeto. $\rho_{i,j}$ e α ficam definidos, respectivamente, pelas expressões:

$$\rho_{i,j} = \cos\theta_{ij} = \alpha_i \alpha_j^T \quad (0.74)$$

$$\alpha_i = \frac{\nabla_x G(x)_i}{|\nabla_x G(x)_i|} \quad (0.75)$$

onde θ_{ij} é o ângulo entre os vetores unitários normais aos planos tangentes às funções de falha i e j , respectivamente.

Os valores extremos do coeficiente de correlação entre duas funções de falha $\rho_{i,j} = -1$ e $\rho_{i,j} = 1$, classificam as funções de falha em complementares e totalmente dependentes, respectivamente. O valor dos limites de primeira ordem para um sistema onde os

componentes são classificados entre totalmente dependentes e estatisticamente independentes, SOUZA (2011), é dado por:

$$\max_1^m(P_i) \leq p_f^s \leq \sum_{i=1}^m P_i \quad (0.76)$$

onde P_i corresponde à probabilidade de falha da função de falha i e p_f^s corresponde à probabilidade de falha do sistema em série.

SORENSEN (2004) apresenta um estudo que avalia a relação entre o índice de confiabilidade do sistema em série β_{serie} e o coeficiente de correlação entre as funções de falha do sistema $\rho_{i,j}$ (Figura 0.16).

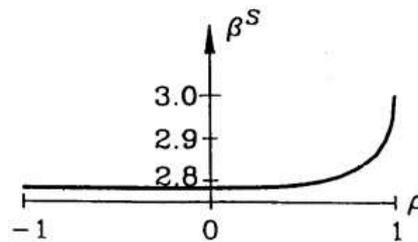


Figura 0.16 – Variação do β_{serie} versus $\rho_{i,j}$; SORENSEN (2004).

A Figura 0.17 apresenta a representação gráfica de sistemas compostos por duas funções de falha que mostram θ_{ij} , respectivamente, iguais a 180° , 90° , 45° e 0° , com os seus índices de confiabilidade.

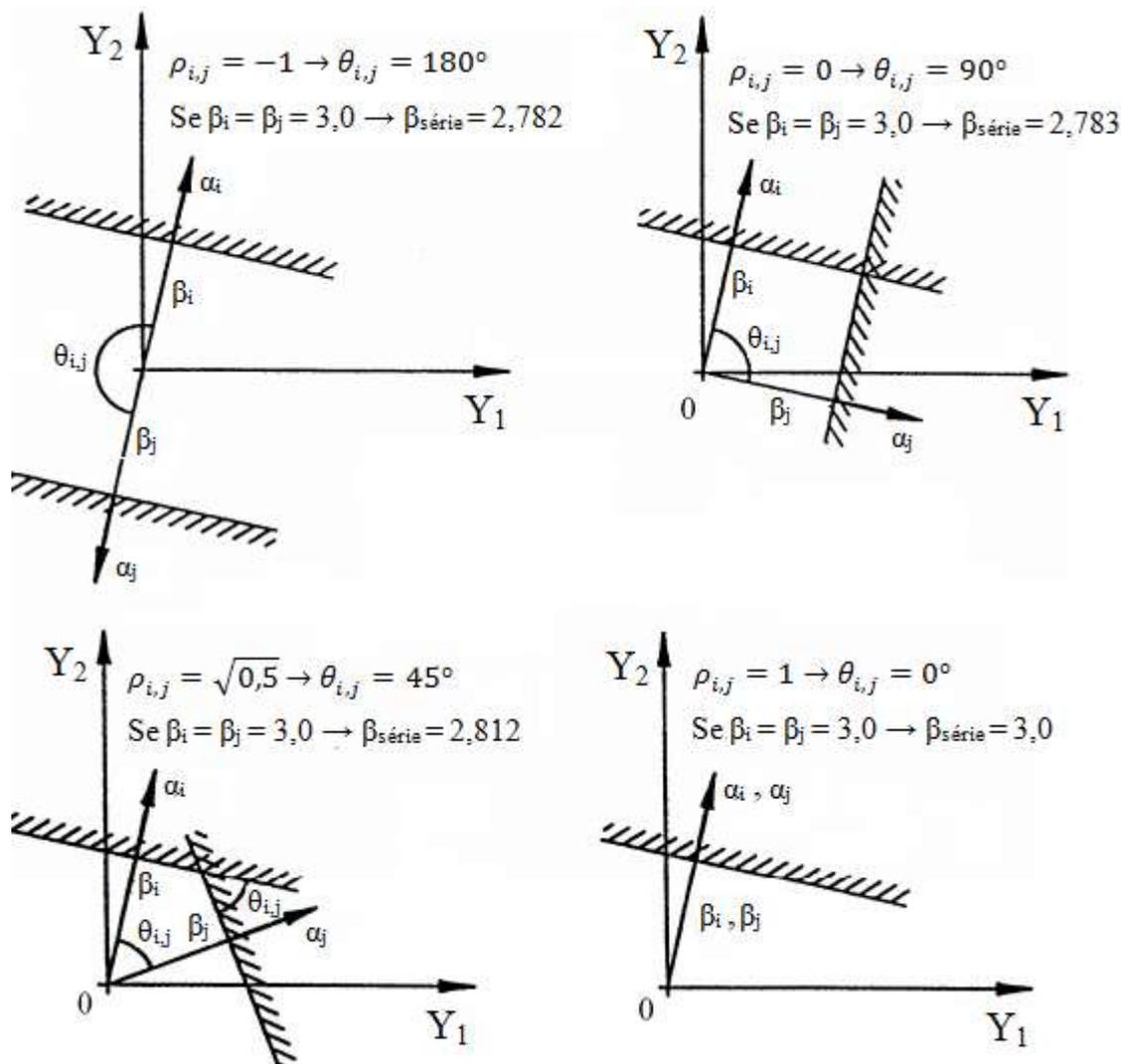


Figura 0.17 – Relação entre $\rho_{i,j}$ e $\beta_{série}$; SORENSEN (2004).

Com as expressões (0.69) à (0.73) fica determinada a probabilidade de falha de um sistema em série.

5.8 SUPERFÍCIES DE RESPOSTA

A análise de confiabilidade estrutural, independente do método utilizado, é baseada na existência de uma função de falha que deve ser determinada e avaliada. Entretanto, na maioria dos problemas de engenharia, como por exemplo, problemas que envolvem o método dos elementos finitos (MEF), a avaliação dessa função de falha torna-se praticamente inviável, demandando grande esforço computacional. Mesmo para o método FORM, que é o mais eficiente computacionalmente, a avaliação do gradiente demanda grande esforço computacional.

Um exemplo de aplicação desse método seria a avaliação de um deslocamento em um determinado ponto de uma estrutura complexa, cujos resultados são provenientes de uma análise de elementos finitos e não há uma função de falha analítica que forneça o resultado de deslocamento.

Com vistas a resolver esse problema surgiu a ideia de se aproximar uma determinada resposta por uma função mais simples de ser avaliada, e que se aproxime de maneira adequada à resposta. Essa função é denominada Superfície de Resposta.

Existem diversos métodos para a aproximação de uma Superfície de Resposta. Desses métodos destacam-se pela sua maior aplicação em engenharia as aproximações por polinômios de Lagrange, utilizando-se os métodos de Newton-Cotes e Gauss.

5.8.1 Polinômios de Lagrange

Segundo VAZ (2010), os polinômios de Lagrange são tais que, dados $n + 1$ pontos $x_i = 0, 1, \dots, n$ em um intervalo $a \leq x \leq b$, é possível criar $n + 1$ polinômios de Lagrange $L_i(x)$ de grau n , cuja forma é:

$$L_i(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)} \quad (0.77)$$

Analisando-se a expressão (0.77) observa-se que o polinômio de Lagrange equivale ao Delta de Kronecker δ_{ij} , que é 1 quando $i = j$ e 0 para $i \neq j$, assim:

$$L_i(x_j) = \delta_{ij} \quad (0.78)$$

A função aproximadora $\phi(x)$ que utiliza os polinômios de Lagrange $L_i(x)$ para aproximar uma função qualquer $f(x)$ é dada por:

$$\phi(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x) f(x) \quad (0.79)$$

Observando-se as expressões (0.79) e (0.78) verifica-se a igualdade para qualquer um dos $n + 1$ pontos x_j :

$$\phi(x_j) = \sum_{i=0}^n L_i(x_j) f(x_j) = f(x_j) \quad (0.80)$$

5.8.2 Método de Newton-Cotes

O método de Newton-Cotes consiste em se utilizar combinações lineares de polinômios de Lagrange no intervalo $[a, b]$, tomando-se os denominados pontos notáveis de Newton-Cotes desse intervalo.

O intervalo $[a, b]$ é dividido em n partes iguais de comprimento Δx , sendo necessários $n + 1$ pontos notáveis para realizar essa divisão. Cada ponto notável x_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) tem sua coordenada definida por:

$$\Delta x = \frac{b - a}{n} \quad (0.81)$$

$$x_i = a + i\Delta x$$

Após serem estabelecidas as coordenadas dos pontos notáveis x_i , definem-se os polinômios de Lagrange $L_i(x)$ que passam por tais pontos. A função aproximadora resultante desse método é função dada pela expressão (0.79).

5.8.3 Método de Gauss

O método de Gauss consiste em utilizar combinações lineares de polinômios de Lagrange no intervalo $[a, b]$, tomando os chamados pontos notáveis de Gauss em relação a um espaço paramétrico ξ com intervalo $[-1, 1]$.

O intervalo $[a, b]$ é dividido em n partes iguais de comprimento Δx , sendo necessários $n + 1$ pontos notáveis para realizar essa divisão. Definidos os $n + 1$ pontos notáveis de Gauss ξ_i no espaço paramétrico, encontram-se os pontos no espaço original mediante:

$$x_i = \frac{a + b}{2} + \frac{b - a}{2} \xi_i \quad (0.82)$$

Após serem definidas as coordenadas dos pontos notáveis x_i definem-se os polinômios de Lagrange $L_i(x)$ que passam por tais pontos. A função aproximadora resultante desse método é função dada pela expressão (0.79).

5.9 CALIBRAÇÃO DE COEFICIENTES DE SEGURANÇA

No contexto atual das normas de projeto baseadas em métodos semi-probabilísticos são definidos coeficientes parciais de segurança para toda uma classe de estruturas. Entretanto, cada estrutura é única, portanto, é muito improvável que a definição de um único coeficiente parcial de segurança para uma determinada classe de estruturas garanta que todas as estruturas pertencentes a essa classe tenham a mesma confiabilidade.

Nesse contexto tem-se utilizado a análise de confiabilidade para a calibração dos coeficientes parciais de segurança de modo que a estrutura atinja um determinado nível de confiabilidade alvo.

De posse dos parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias envolvidas, encontra-se o ponto de projeto utilizando-se um dos métodos FORM, SORM ou Monte Carlo. Esse ponto é a combinação dos valores das variáveis aleatórias, que em caso de falha tem a maior probabilidade de ocorrência. Então se os valores de projeto fossem iguais ao ponto de projeto a estrutura teria a probabilidade de falha resultante da análise.

Assim, define-se um projeto inicial (uma tentativa de dimensões iniciais) e avalia-se a probabilidade de falha do estado limite considerado por qualquer um dos métodos supracitados. O projeto é modificado (dimensões alteradas) e a confiabilidade novamente avaliada até o valor "alvo" da probabilidade de falha ser alcançado.

Dados os valores característicos de cada uma das variáveis aleatórias x_i^k envolvidas no dimensionamento, e os valores de cálculo obtidos quando a probabilidade de falha alvo é atingida x_i^* , o fator parcial de segurança para cada variável aleatória é dado por:

$$\gamma_i = \frac{x_i^*}{x_i^k} \quad (0.83)$$

6 FUNÇÕES DE FALHA E VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

Este capítulo apresenta a forma de abordagem das análises de confiabilidade das vigas curtas de concreto armado solicitadas por uma carga concentrada distante a do eixo apoio.

São definidas as variáveis aleatórias e determinísticas envolvidas nas análises realizadas, e as funções de falha G_i que estabelecem o limite entre os domínios de falha e de segurança da viga curta analisada.

Para o desenvolvimento dos estudos de confiabilidade é utilizado o método analítico FORM, por meio de rotinas desenvolvidas com a utilização do programa de análise numérica Mathcad.

Os resultados das análises de confiabilidade são apresentados, principalmente em termos de índice de confiabilidade β_i , relacionados a uma dada função de falha G_i , e em termos do índice de confiabilidade do sistema em série com n variáveis aleatórias $\beta_{sist,n}$.

6.1 VARIÁVEIS CONSIDERADAS DETERMINÍSTICAS

Os parâmetros geométricos das vigas de concreto armado são:

- b – largura;
- h – altura;
- d – altura útil;
- a_1 – largura do apoio;
- a_2 – largura da placa de aplicação de carga;
- a – distância entre o centro do apoio e o centro da placa sobre a qual a carga é aplicada;
- a_L – distância entre a face interna do apoio à face da placa sobre a qual a carga é aplicada;
- c – cobrimento;
- H_2 – altura considerada para o nó do apoio.

Os parâmetros geométricos e mecânicos das armaduras de aço são:

- n – número de barras da armadura longitudinal;
- ϕ_l – diâmetro das barras da armadura longitudinal;
- ϕ_w – diâmetro das barras da armadura transversal;
- A_{sl} – área da armadura longitudinal;

- A_{sw} – área da armadura transversal (estribos de aço) compreendida ao longo do comprimento a_L .

Os parâmetros associados à ancoragem das armaduras longitudinais são:

- l_b – comprimento de ancoragem;
- α_b – coeficiente que considera a presença favorável do gancho;
- η_1 – coeficiente relacionado à ancoragem, função do tipo de barra (lisa, nervurada ou entalhada);
- η_2 – coeficiente relacionado à ancoragem, função da posição da barra (região de boa ou má aderência);
- η_3 – coeficiente relacionado à ancoragem, função do diâmetro da barra;

6.2 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

A seguir são definidas as variáveis aleatórias básicas relacionadas aos carregamentos e às resistências. A aleatoriedade dessas variáveis é determinada a partir de suas respectivas funções de densidade de probabilidade PDF e parâmetros estatísticos: média μ e desvio padrão σ .

6.2.1 Concreto

De acordo com a NBR 12655 (2006) os parâmetros para a distribuição da resistência do concreto dependem do grau de controle de qualidade em sua produção, sendo o cálculo da resistência média à compressão do concreto dado por:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65\sigma_{f_{cm}} \quad (0.1)$$

onde

f_{cj} – resistência média do concreto à compressão prevista para a idade j dias;

f_{ck} – resistência característica do concreto à compressão;

$\sigma_{f_{cm}}$ – desvio padrão de dosagem do concreto.

A

Tabela 0.1 apresenta os valores do desvio padrão $\sigma_{f_{cm}}$ em função das condições de preparo do concreto.

Tabela 0.1 – Desvio padrão de dosagem do concreto; NBR 12655 (2006).

Condição de preparo	$\sigma_{f_{cm}}$ (MPa)
Boa	4,0
Média	5,5
Ruim	7,0

O coeficiente 1,65 da expressão (0.1) é obtido pela inversa da função de distribuição cumulativa normal padrão (média zero e desvio padrão unitário) para uma probabilidade de 5%, o que representa $p(f_c \leq f_{ck}) = 0,05$.

A classe de concreto adotada neste estudo é considerada como de boa qualidade, portanto, $\sigma_{f_{cm}} = 4,00$ MPa.

A JCSS (2001) sugere para a resistência à compressão do concreto a função de densidade de probabilidade Lognormal.

A NBR 8681 (2014) estabelece para situações normais de projeto, no dimensionamento semi-probabilístico – E.L.U., o coeficiente parcial de ponderação da resistência $\gamma_c = 1,40$ para a obtenção do valor da resistência de cálculo à compressão do concreto:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (0.2)$$

A Tabela 0.2 apresenta um resumo dos parâmetros do modelo probabilístico para o concreto utilizado nos exemplos estudados.

Tabela 0.2 – Modelo probabilístico do concreto.

Resistência característica (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação	Função densidade de probabilidade
30	36,60	4,00	0,11	Lognormal

6.2.2 Aço

A JCSS (2001) recomenda a função densidade de probabilidade Lognormal para o aço, com coeficiente de variação de $\delta_s = 0,05$, e estabelece para o cálculo de sua tensão média de escoamento:

$$f_{ym} = f_{yk} + 2\sigma_s \quad (0.3)$$

onde

f_{ym} – tensão média de escoamento;

f_{yk} – tensão característica de escoamento;

σ_s – desvio padrão da tensão de escoamento, sugerido igual a 30 MPa pela JCSS (2001).

A NBR 8681 (2003) estabelece para situações normais de projeto, no dimensionamento semi-probabilístico – E.L.U., o coeficiente parcial de ponderação da resistência $\gamma_s = 1,15$ para a obtenção do valor da tensão de escoamento de cálculo do aço f_{yd} :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (0.4)$$

O aço utilizado nos estudos realizados é o aço CA 50 para as armaduras longitudinais e transversais. Entretanto, como os resultados dos ensaios das barras transversais de 6.3 mm realizados por BUSCH (2011) tiveram tensão de escoamento próxima a 600 MPa, neste trabalho as barras transversais de 6.3 mm foram classificadas segundo as prescrições JCSS (2001) considerando-se essa tensão experimental.

Assim, de acordo com a expressão (0.3) e o desvio padrão sugerido pela JCSS (2001), a tensão média de escoamento é igual a 560 MPa para o aço CA 50, e 660 MPa para o aço CA 60, conforme apresentado na Tabela 0.3. Considerando-se a expressão (0.4) a tensão de escoamento de cálculo do aço para o dimensionamento semi-probabilístico adotado foi $f_{yd} = 434,8$ MPa para o aço CA 50 e $f_{ywd} = 521,7$ MPa para o aço CA 60.

Tabela 0.3 – Modelo probabilístico do aço.

Tipo de Armadura	Resistência característica de escoamento (MPa)	Resistência média de escoamento (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação	Função densidade de probabilidade
Longitudinal	500	560	30	0,0536	Lognormal
Transversal	600	660	30	0,0455	Lognormal

6.2.3 Cargas

Consideram-se o peso próprio da estrutura e os elementos acessórios que atuam permanentemente na estrutura como cargas permanentes.

A carga acidental é dividida em duas categorias.

- Contínua: constituída do peso dos móveis, dos equipamentos, das pessoas e de seus pertences que atuam com grande frequência na estrutura.
- Momentânea: constituída do peso das pessoas e objetos que em situações especiais como numa emergência, podem estar todos posicionados num mesmo local, ou devido à concentração de objetos numa determinada área.

Segundo NOWAK e COLLINS (2000) os parâmetros estatísticos das cargas acidentais dependem da área de influência. Quanto maior a área de contribuição para a carga acidental menor é o valor nominal da carga e seu coeficiente de variação.

A carga acidental máxima equivalente, considerada para um período de retorno de 50 a 100 anos, é resultante da combinação da carga acidental contínua com a carga acidental momentânea, e os parâmetros probabilísticos dependem da variação temporal da carga acidental momentânea, da duração da carga acidental contínua e do período de retorno considerado (LOPES, 2007).

ELLINGWOOD (1980) propôs um modelo probabilístico para a carga permanente com coeficiente de variação $\delta_g = 0,10$, distribuição normal e valor característico igual ao valor médio. A NBR 8681 (2003) também considera para as cargas permanentes o valor característico igual ao valor médio.

ELLINGWOOD (1980) também propôs um modelo probabilístico para a carga acidental máxima equivalente considerando um período de retorno de 50 anos, com coeficiente de variação $\delta_q = 0,25$, distribuição de valores extremos máximos do tipo I (GUMBEL) e valor médio igual ao valor característico.

Considera-se que o modelo probabilístico adotado para força solicitante, proveniente das cargas permanente e acidental, é o mesmo adotado para as cargas permanente e acidental, respectivamente.

Adotou-se a força solicitante F_{sd} constituída por duas parcelas de cargas, a primeira proveniente de cargas permanentes e a segunda de cargas acidentais:

$$F_{sd} = k_g \gamma_f \mu F \quad (0.5)$$

$$F_{sd} = k_q \gamma_f \mu F \quad (0.6)$$

onde $\gamma_f = 1,40$, k_g é o percentual de carga permanente, k_q é o percentual de carga variável e μF é o valor da solicitação média.

Foram supostas quatro situações distintas para a carga total, com predominância de parcela permanente ou acidental, de acordo com as proporções apresentadas na Tabela 0.4.

Tabela 0.4 – Proporções de carga permanente e acidental em relação à carga total.

Situação	Proporções de cargas	
	k_g (%)	k_q (%)
1	80	20
2	60	40
3	40	60
4	20	80

A Tabela 0.5 apresenta um resumo dos parâmetros do modelo probabilístico para as cargas, utilizado nos exemplos estudados.

Tabela 0.5 – Modelo probabilístico das cargas.

Solicitação	Valor característico (kN)	Valor média (kN)	Coefficiente de variação	Função densidade de probabilidade
Permanente	1,0	1,0	0,10	Normal
Acidental	1,0	1,0	0,25	Gumbel

6.2.4 Fatores de Modelagem

Devido às simplificações associadas aos modelos de cálculo das cargas, dos efeitos das cargas e das resistências, os modelos em geral são incompletos ou inexatos. Com o intuito de se considerar essas incertezas são aplicados fatores de modelagem que são tratados como variáveis aleatórias. Os fatores de modelagem ϕ_S e ϕ_R multiplicam as expressões de solicitação e resistência, respectivamente, transformando a expressão (0.28) em:

$$\phi_R R - \phi_S S < 0 \quad (0.7)$$

A JCSS (2001) estabelece modelos probabilísticos para os fatores de modelagem dos efeitos de solicitação e das resistências. Esses fatores de modelagem são intrínsecos ao tipo de estrutura e ao material que a compõe.

A Tabela 0.6 apresenta um resumo dos parâmetros do modelo probabilístico para os fatores de modelagem utilizados nos exemplos estudados.

Tabela 0.6 – Modelo probabilístico dos fatores de modelagem.

Fator de modelagem	Valor característico	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Função densidade de probabilidade
ϕ_S	1,0	1,0	0,10	0,10	Lognormal
ϕ_R	1,4	1,4	0,35	0,25	Lognormal

Os valores de média e desvio padrão mais elevados adotados para o fator de modelagem associado à resistência são adotados tendo como referência os trabalhos de SOUZA (2011) e LOPES (2007) e são justificados por mecanismos resistentes não capturados pelo modelo teórico.

6.3 FUNÇÕES DE FALHA

As funções de falha foram obtidas a partir das expressões para as solicitações apresentadas no fluxograma da Figura 3.8 e seus valores acumulados segundo as expressões (0.17), (0.18) e (0.19). As funções de falha relacionadas ao esmagamento da biela comprimida de concreto foram obtidas por meio da expressão (0.20).

De acordo com o fluxograma e as expressões apresentadas, a resistência de uma viga curta de concreto é considerada satisfatória quando atendidas simultaneamente as seguintes expressões:

- a força de tração resistente na armadura longitudinal deve atender a

$$\overbrace{T_{Tg} + T_{Tq}}^{T_{Ts}} \leq \overbrace{A_{sl} f_{ym}}^{T_R} \quad (0.8)$$

- a força de tração resistente na armadura transversal deve atender a

$$\overbrace{V_{Tg} + V_{Tq}}^{V_{Ts}} \leq \overbrace{A_{sw} f_{ym}}^{V_R} \quad (0.9)$$

- a força resistente de ancoragem da armadura longitudinal no nó do apoio deve atender a

$$\overbrace{T_{1g} + T_{1q}}^{T_{1s}} \leq \overbrace{\frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ct}}{f_b} n \pi \phi_l \frac{l_b}{\alpha_b}}^{T_{1R}} \quad (0.10)$$

- a tensão de compressão resistente na interface biela – nó superior deve atender a

$$\frac{\overbrace{F_{bg} + F_{bq}}^{\sigma_{b,ns}}}{bH_0} \leq f_{cm} \quad (0.11)$$

- a tensão de compressão resistente na interface biela nó – inferior deve atender a

$$\frac{\overbrace{F_{bg} + F_{bq}}^{\sigma_{b,ni}}}{bH_2} \leq f_{cm} \quad (0.12)$$

As equações de falha determinam o limite de violação de um estado limite quando a resistência R se iguala a uma solicitação S . A partir das expressões (0.8) a (0.12) são definidas as equações de falha (0.13) à (0.17), já restringidas para os casos em análise que resultaram em $a_L \geq z \cot \theta$ e $\tan \theta > 0,5$:

- relativa ao escoamento da armadura longitudinal

$$\begin{aligned} G_1 &= A_{sl}f_{ym} - (T_{Tg} + T_{Tq}) \\ \Rightarrow G_1 &= A_{sl}f_{ym} - \frac{(F_g + F_q)}{z} \left(\frac{a_L}{z \cot \theta} \right)^2 (a - 0,5a_1) \end{aligned} \quad (0.13)$$

- relativa ao escoamento da armadura transversal

$$\begin{aligned} G_2 &= A_{sw}f_{ym} - (V_{Tg} + V_{Tq}) \\ \Rightarrow G_2 &= A_{sw}f_{ym} - \frac{(F_g + F_q)}{z \cot \theta} \left(\frac{a_L}{z \cot \theta} \right) a_L \end{aligned} \quad (0.14)$$

- relativa a perda de aderência da ancoragem (escorregamento das armaduras longitudinais)

$$\begin{aligned} G_3 &= \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ct} n \pi \phi_l \frac{l_b}{\alpha_b} - (T_{1g} + T_{1q}) \\ \Rightarrow G_3 &= \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ct} n \pi \phi_l \frac{l_b}{\alpha_b} - (F_g + F_q) \frac{a}{z} \left[1 - 0,5 \left(\frac{a_L}{z \cot \theta} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (0.15)$$

- relativa à ruptura da biela de concreto na interface biela – nó superior

$$\begin{aligned} G_4 &= f_{cm} - \left(\frac{F_{bg} + F_{bq}}{bH_0} \right) \\ \Rightarrow G_4 &= f_{cm} - \left(\frac{F_g + F_q}{bH_0} \right) \cos(90^\circ - \theta) \end{aligned} \quad (0.16)$$

- relativa à ruptura da biela de concreto na interface biela – nó inferior

$$\begin{aligned} G_5 &= f_{cm} - \left(\frac{F_{bg} + F_{bq}}{bH_2} \right) \\ \Rightarrow G_5 &= f_{cm} - \left(\frac{F_g + F_q}{bH_2} \right) \cos(90^\circ - \theta) \end{aligned} \quad (0.17)$$

Para as vigas sem armadura transversal as equações de falha G_1 e G_3 são obtidas substituindo-se a expressão (0.19) nas expressões (0.8) e (0.10), obtendo-se:

$$G_1 = A_{sl}f_{ym} - (F_g + F_q) \cot \theta \quad (0.18)$$

$$G_3 = \eta_1\eta_2\eta_3f_{ct}n\pi\phi_l \frac{l_b}{\alpha_b} - (F_g + F_q) \cot \theta \quad (0.19)$$

6.4 ABORDAGEM DAS ANÁLISES

No Brasil não existe disposição normativa que regule os níveis de confiabilidade β requeridos para cada tipo de estrutura. O índice de confiabilidade de referência adotado neste trabalho foi obtido segundo o EUROCODE 2 EN1990 (2002).

Na Tabela 0.1, para construções residenciais, prédios comerciais, hotéis e escolas tem-se a classe de consequência de falha CC2, com grau de impacto moderado. De acordo com a Tabela 0.2, a classe CC2 corresponde a uma consequência de falha moderada e construções com frequência de uso média.

Com os dados da Tabela 0.3 obtém-se o índice de confiabilidade de referência $\beta_r = 3,8$, para um período de retorno de 50 anos e classe de confiabilidade RC2, correspondente a uma probabilidade de falha de referência $p_{fr} = 7,23 \times 10^{-5}$.

Neste tópico são apresentados cinco exemplos cujas análises são conduzidas a partir das equações de falha definidas, relacionadas aos E.L.U., para vigas curtas de concreto armado com e sem estribos transversais. Também é apresentada uma calibração para os fatores parciais de segurança.

As incertezas relativas às variáveis envolvidas nas análises são consideradas por meio dos modelos probabilísticos das resistências do concreto e do aço, das ações permanentes e variáveis, e dos fatores de modelagem de solicitação e resistência que constam da Tabela 0.2 a Tabela 0.6.

6.4.1 Cálculo dos Valores Médios das Solicitações

Inicialmente, aplicou-se o método semiprobabilístico para se obter as resistências de cálculo relacionadas a cada estado limite definido nas equações (0.8) à (0.12), substituindo-se os valores médios de resistência pelo valores de cálculo. Depois se igualou as solicitações de cálculo às resistências de cálculo com o objetivo de se obter os valores médios para as solicitações, admitindo-se que os valores característicos são iguais aos valores médios, conforme mencionado no item 0.

Sendo assim, para se obter os valores médios para as solicitações, substituíram-se as equações (0.5) e (0.6) nas equações (0.13) a (0.19), e os valores médios de resistência pelos valores de cálculo resultando, respectivamente:

$$k_g\mu F + k_q\mu F = \frac{1}{\gamma_f} A_{sl} \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \frac{z}{\left(\frac{a_L}{z \cot \theta}\right)^2 (a - 0,5a_1)} \quad (0.20)$$

$$k_g\mu F + k_q\mu F = \frac{1}{\gamma_f} A_{sw} \frac{f_{yw k}}{\gamma_s} \frac{z \cot \theta}{\left(\frac{a_L}{z \cot \theta}\right) a_L} \quad (0.21)$$

$$k_g\mu F + k_q\mu F = \frac{1}{\gamma_f} \eta_1 \eta_2 \eta_3 \frac{0,21 f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c} n \pi \phi_l \frac{l_b}{\alpha_b} \frac{z}{a \left[1 - 0,5 \left(\frac{a_L}{z \cot \theta}\right)^2\right]} \quad (0.22)$$

$$k_g\mu F + k_q\mu F = \frac{1}{\gamma_f} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \frac{b H_0}{\cos(90^\circ - \theta)} \quad (0.23)$$

$$k_g\mu F + k_q\mu F = \frac{1}{\gamma_f} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \frac{b H_2}{\cos(90^\circ - \theta)} \quad (0.24)$$

$$k_g\mu F + k_q\mu F = \frac{1}{\gamma_f} A_{sl} \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \frac{1}{\cot \theta} \quad (0.25)$$

$$k_g\mu F + k_q\mu F = \frac{1}{\gamma_f} \eta_1 \eta_2 \eta_3 \frac{0,21 f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c} n \pi \phi_l \frac{l_a}{\alpha_b} \frac{1}{\cot \theta} \quad (0.26)$$

Aplicando-se as equações (0.20) a (0.26) tem-se os valores médios para as solicitações para cada série de viga e suas respectivas razões a/d , sendo os valores listados na

Tabela 0.7.

Tabela 0.7 – Valores médios para as solicitações.

Série	a/d	Solicitação referente à função de falha (kN)					
		G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	Valor mínimo
V0	0,74	307,666	–	390,326	312,8	451,913	307,666
	0,96	239,35	–	303,655	306,4	507,095	239,35
	1,38	165,693	–	210,209	332,265	634,674	165,693
	1,60	143,622	---	182,208	354,196	703,837	143,622
VS	0,74	693,424	136,629	516,41	311,894	480,962	136,629
	0,96	438,494	153,598	428,979	306,625	540,693	153,598
	1,38	247,094	194,745	322,602	334,216	678,509	194,745
	1,60	201,901	216,589	287,441	356,908	753,184	201,901

Os valores das variáveis utilizadas para a obtenção dos valores médios das solicitações são apontados no anexo A.

Os valores médios das solicitações foram considerados, para fins de análise de confiabilidade, constituídos por parcelas de solicitação variável F_q e permanente F_g . As parcelas foram definidas a partir dos percentuais de carga k_q e k_g , respectivamente. O valor da solicitação média obtida foi o menor valor dentre os valores encontrados quando da análise de cada função de falha.

6.4.2 Problemas Encontrados nas Análises e Soluções Adotadas

Como pode ser observado na

Tabela 0.7, para alguns casos da razão a/d , algumas funções de falha apresentaram valores médios para as solicitações bem maiores que o menor valor obtido quando analisadas todas as funções de falha, para uma mesma razão a/d .

Como as funções de falha são analisadas para o menor valor obtido, a probabilidade de que haja a violação de um estado limite expresso por uma função de falha que tenha retornado um valor para a solicitação média bastante superior ao mínimo é muito baixa.

Conforme mencionado no item 0, uma das etapas do cálculo da análise de confiabilidade é a transformação de distribuições quaisquer em distribuições normais equivalentes, segundo as expressões (0.45) e (0.46).

A ferramenta matemática utilizada para o desenvolvimento do programa de análise de confiabilidade foi o Mathcad. O Mathcad considera como zero absoluto valores inferiores a 1×10^{-307} . Devido à baixa probabilidade de ocorrência de violação do estado limite definido por uma função de falha que tenha retornado um valor para a solicitação média bastante superior ao mínimo, na realização da transformação de distribuição quaisquer em normal equivalente o programa retorna $f(x_a) = 0$ e $F(x_a) = 0$. Tal resultado impede o prosseguimento do cálculo, pois para a realização dos cálculos expressos pelas expressões (0.45) e (0.46) é necessário à utilização de valores não nulos.

Para a solução deste problema utilizou-se a versão de demonstração do *software* comercial ComRel 9, limitado à sete variáveis aleatórias, para analisar especificamente as funções de falha que apresentaram esse problema. Os demais cálculos incluindo-se o cálculo da probabilidade de falha do sistema em série foram conduzidos utilizando-se o programa desenvolvido no Mathcad.

6.4.3 Exemplo I

Neste exemplo é realizada a análise de confiabilidade das vigas curtas de concreto com e sem estribos. As análises são realizadas com o método analítico FORM. Os objetivos deste exemplo são:

- a) avaliar os índices de confiabilidade β_i inerentes a cada equação de falha G_i e suas respectivas probabilidades de falha p_{f_i} , para cada valor de percentual de carga variável k_q e para cada razão a/d ;
- b) avaliar o índice de confiabilidade do sistema em série β_{sist} e a sua respectiva probabilidade de falha $p_{f_{sist}}$ inerente aos diversos valores de percentual de carga variável k_q e para cada razão a/d ;

- c) validar os índices de confiabilidade β_{sist} obtidos com o método FORM por meio da simulação de Monte Carlo;
- d) obter os valores dos fatores de importância relativa I_i das variáveis aleatórias envolvidas na análise;
- e) avaliar a importância da dispersão dos valores da ação variável em relação a sua média.

Os modelos probabilísticos das variáveis aleatórias consideradas neste exemplo são transcritos na Tabela 0.8.

Tabela 0.8 – Valores para os modelos probabilísticos das resistências do concreto, do aço e das ações, exemplo I.

Variáveis Aleatórias	Valor característico	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Função densidade de probabilidade (FDP)
Concreto (MPa)	30	36,6	4,00	0,11	Lognormal
Aço – armadura longitudinal (MPa)	500	560	30	0,0536	Lognormal
Aço – armadura transversal (MPa)	600	660	30	0,0455	Lognormal
Solicitação Permanente (kN)	1,00	1,00	–	0,10	Normal
Solicitação Acidental (kN)	1,00	1,00	–	0,25	Gumbel

A Figura 0.1 à Figura 0.8 apresentam a variação do índice de confiabilidade em relação ao valor de percentual de carga variável k_q e o índice de confiabilidade de referência $\beta_r = 3,8$, apresentado no gráfico como “Ref.”. Os quadros com os valores obtidos nas análises se encontram no anexo A.

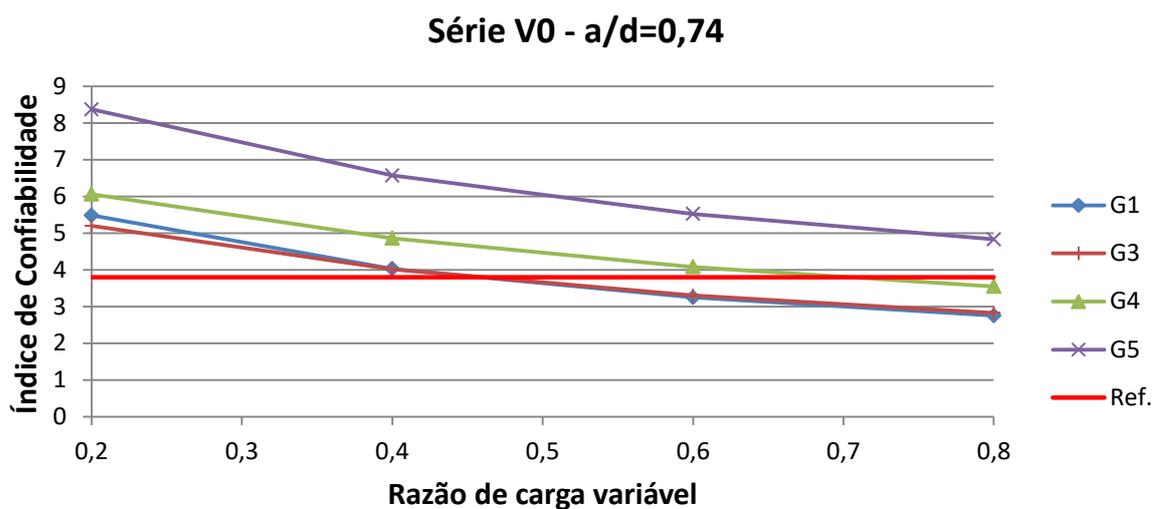


Figura 0.1 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável k_q , vigas série V0 – $a/d = 0,74$.

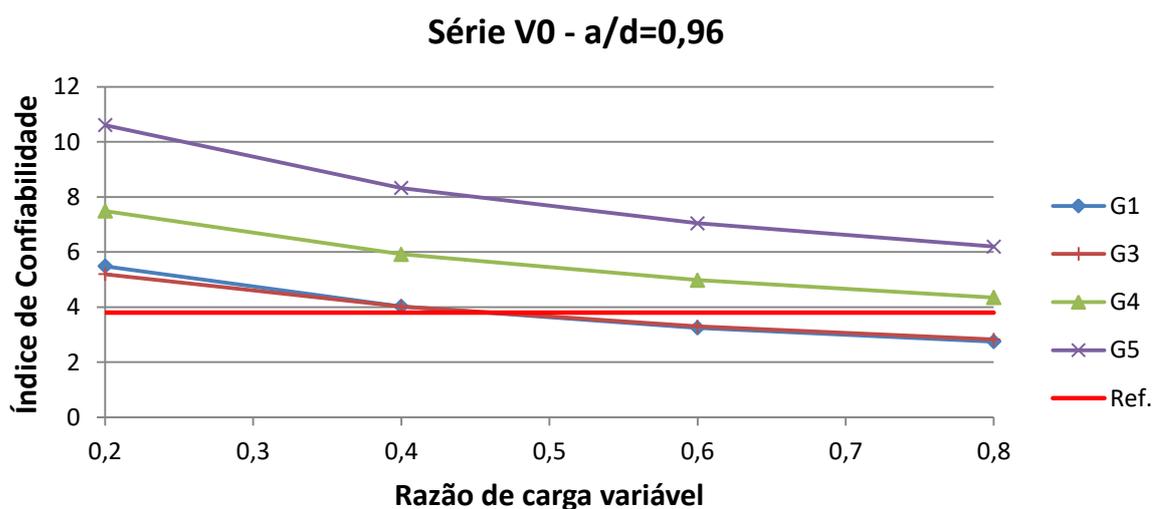


Figura 0.2 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável k_q , vigas série V0 – $a/d = 0,96$.

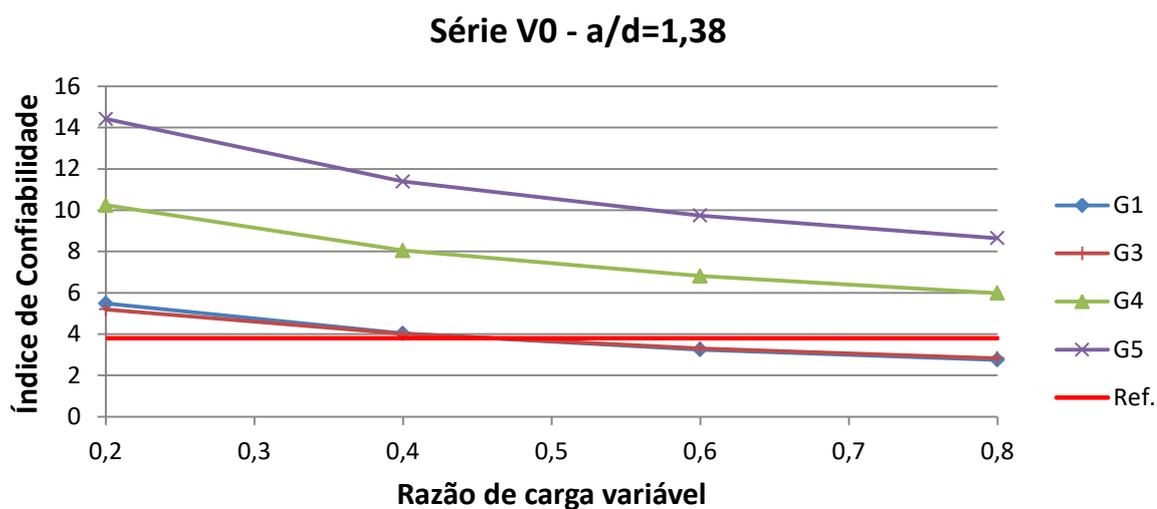


Figura 0.3 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável k_q , vigas série V0 – $a/d = 1,38$.

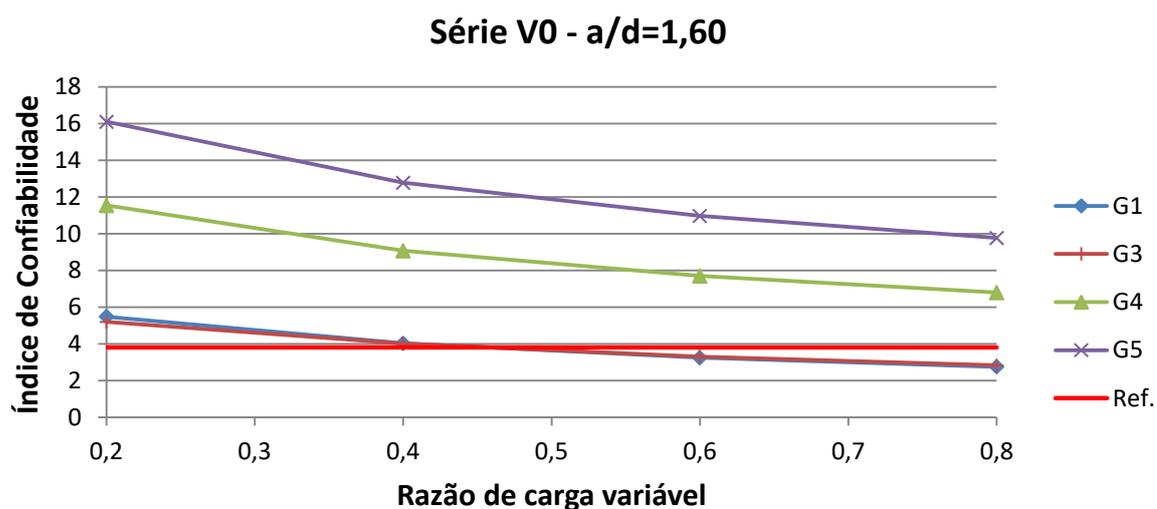


Figura 0.4 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável k_q , vigas série V0 – $a/d = 1,60$.

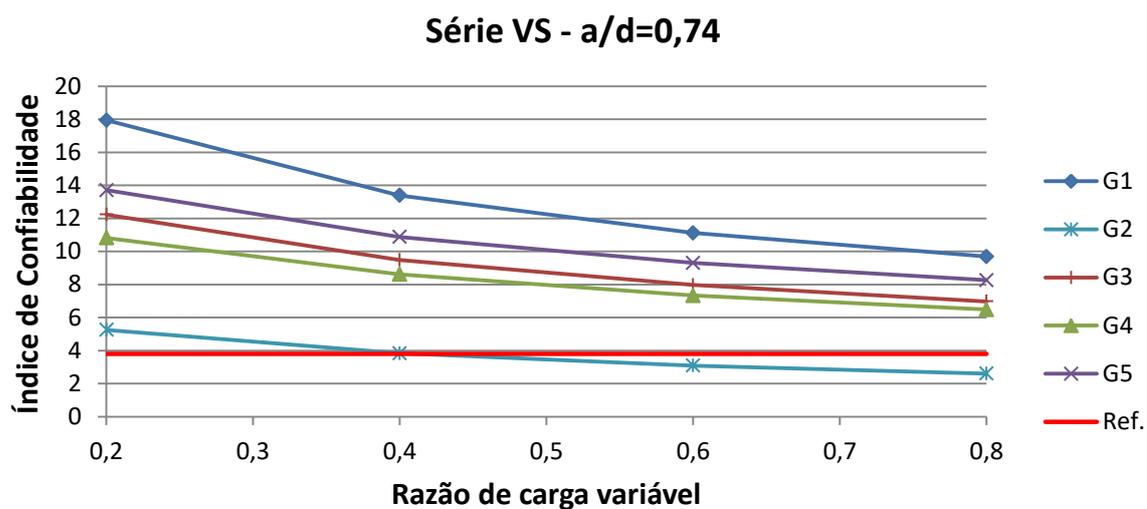


Figura 0.5 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável k_q , vigas série VS - $a/d = 0,74$.

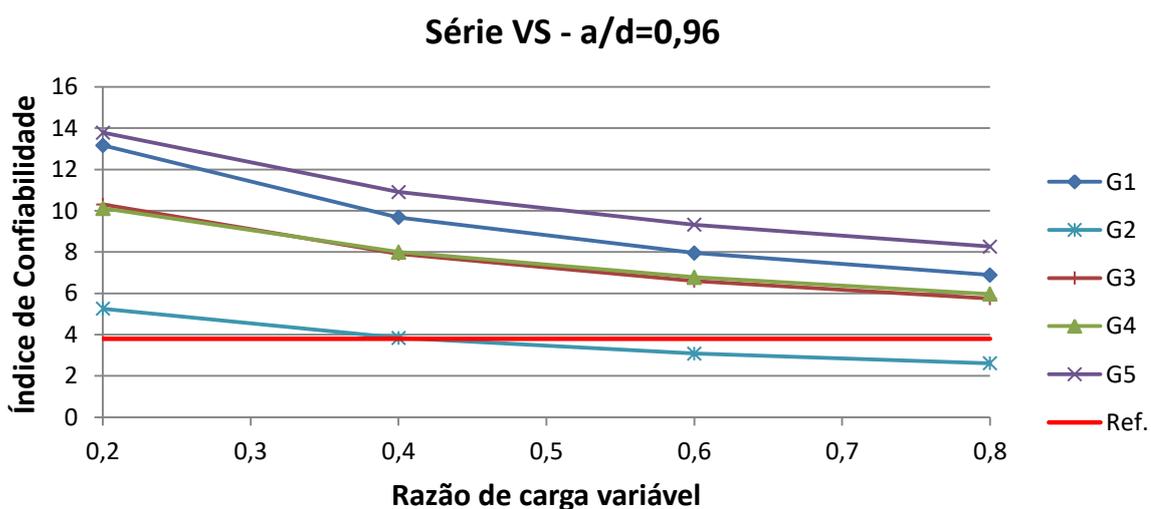


Figura 0.6 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável k_q , vigas série VS - $a/d = 0,96$.

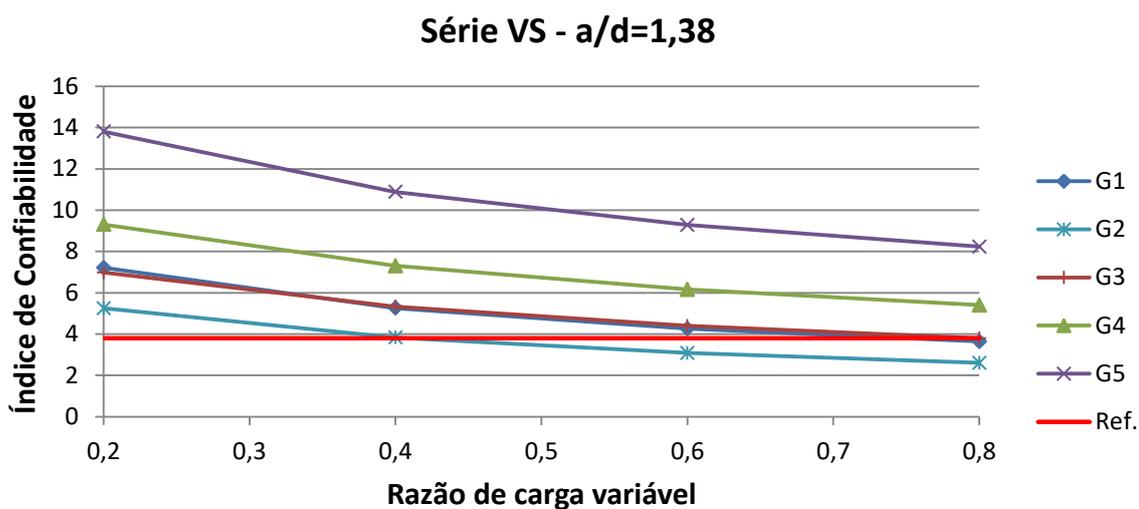


Figura 0.7 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável k_q , vigas série VS – $a/d = 1,38$.

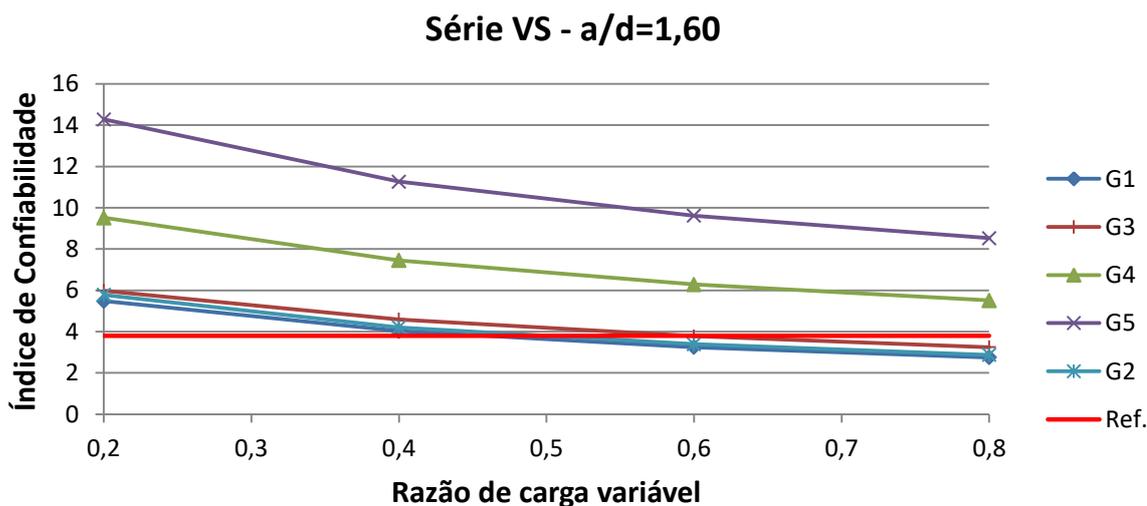


Figura 0.8 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao percentual de carga variável k_q , vigas série VS – $a/d = 1,60$.

Para a série de vigas V0 as funções de falha G_1 e G_3 associadas, respectivamente, ao escoamento da armadura longitudinal e à perda de aderência na ancoragem foram as que governaram o sistema de falha.

Para a série de vigas VS a função de falha G_2 , associada ao escoamento da armadura transversal governou o sistema de falha para razões a/d até 1,38. Para a razão $a/d = 1,60$ o sistema passou a ser governado pela função de falha G_1 , associada ao escoamento da armadura longitudinal.

Os resultados encontrados para o índice de confiabilidade do sistema em relação ao percentual de carga variável para as vigas das séries V0 e VS demonstram coerência com os valores apresentados na

Tabela 0.7, tendo em vista que as funções de falha apontadas apresentaram os menores valores para as solicitações.

Para as séries de vigas V0 e VS o índice de confiabilidade de cada função de falha e do sistema de falha decrescem à medida que se aumenta o percentual de carga variável. Isso se deve devido ao alto coeficiente de variação da carga variável.

O índice de confiabilidade de referência β_r é alcançado quando o percentual de carga variável está entre 40% e 50%. Isso indica que o tratamento semi-probabilístico adotado pela NBR 6118 (2014) fornece índices de confiabilidade aceitáveis para estruturas solicitadas por carregamentos constituídos por percentual de carga variável entre 40% e 50% do seu valor total.

A fim de se analisar o impacto da razão a/d sobre o índice de confiabilidade para as séries de vigas V0 e VS, elaborou-se os gráficos apresentados na Figura 0.9 e Figura 0.10 para o percentual de carga variável de 40%.

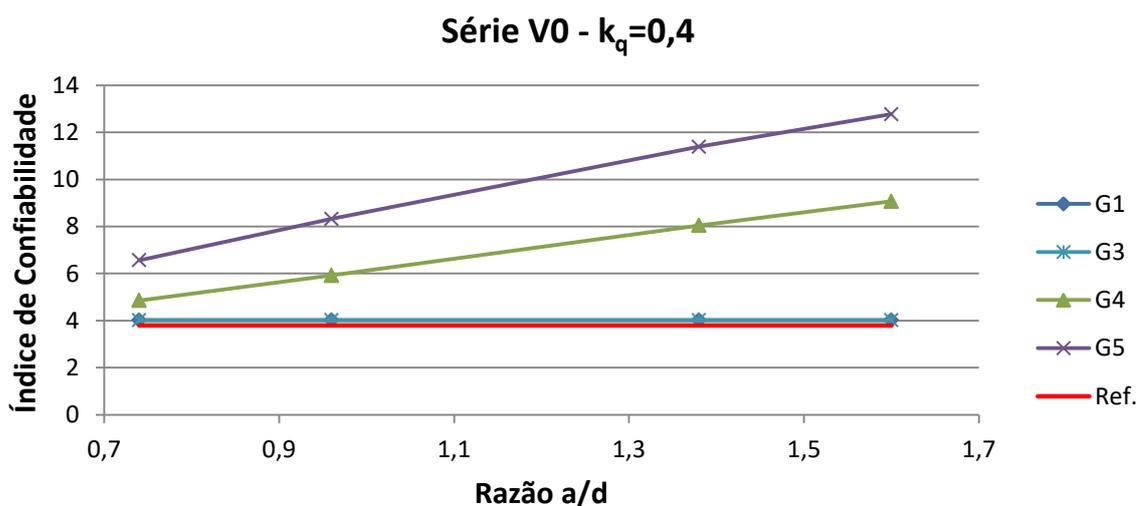


Figura 0.9 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação à razão a/d , vigas série V0 – $k_q = 0,4$.

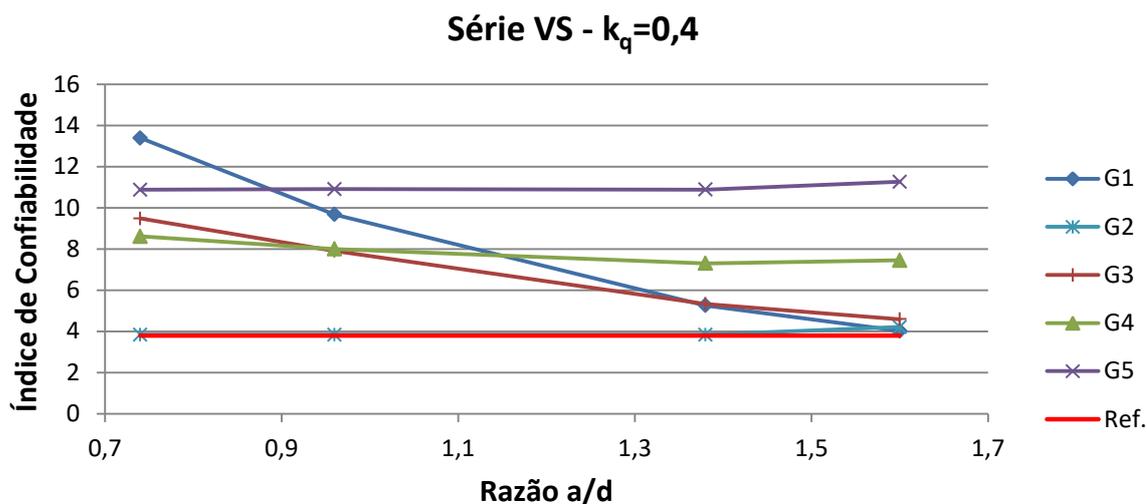


Figura 0.10 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação à razão a/d , vigas série VS – $k_q = 0,4$.

Para as vigas da série V0, observa-se que os índices de confiabilidade associados às funções de falha G_4 e G_5 (ruptura das bielas comprimidas de concreto) aumentam com a razão a/d . As funções de falha G_1 e G_3 associadas, respectivamente, ao escoamento da armadura longitudinal e à perda de aderência na ancoragem, têm um comportamento aproximadamente constante.

Para as vigas da série VS observa-se que os índices de confiabilidade associados às funções de falha G_2 , G_4 e G_5 apresentam um comportamento aproximadamente constante com a razão a/d , enquanto os índices de confiabilidade associados às funções de falha G_1 e G_3 decrescem com a razão a/d .

Devido ao fato de que para a faixa de razões a/d estudadas, as funções de falha que governaram o sistema de falha ficaram praticamente inalteradas, os índices de confiabilidade do sistema β_{sist} apresentaram pouquíssima variação em relação à razão a/d , para um mesmo percentual de carga variável. Entretanto para a série de vigas VS, como as funções de falha G_1 e G_3 decrescem com a razão a/d , acredita-se que para razões $a/d > 1,6$ tais funções de falha passem a governar o sistema de falha e assim o índice de confiabilidade do sistema β_{sist} diminua.

Os índices de confiabilidade do sistema obtidos com o programa desenvolvido foram validados utilizando-se o método de simulação de Monte Carlo. Os resultados da comparação são apresentados na tabela do anexo A.

Os resultados obtidos mostram que a diferença média de resultados entre o índice de confiabilidade obtido pelo programa segundo o método FORM e pelo método de simulação

de Monte Carlo ficou em torno de 0,6%. Isso corrobora a validação dos resultados obtidos segundo o método FORM com o programa desenvolvido.

Salienta-se que os índices de confiabilidade do sistema utilizando-se o método de simulação de Monte Carlo foram obtidos para um número de amostras de vinte milhões. Aplicando-se as equações (0.60) e (0.61), considerando-se um número de amostras de vinte milhões, encontra-se o valor 1,00 para o coeficiente de variação do cálculo da probabilidade de falha. O valor recomendado para tal coeficiente está entre 0,025 e 0,05. Entretanto, para se obter tal resultado teria que se utilizar um número de amostras de quatrocentos milhões, demandando grande esforço computacional. Embora tenha sido utilizado um número de amostras menor, os resultados obtidos com ambos os métodos foram bastante próximos.

Os gráficos apresentados no anexo A apresentam a variação dos fatores de importância em relação ao percentual de carga variável, para cada função de falha, para cada razão a/d , para as vigas da série V0 e VS.

Analisando-se todos os gráficos, tanto para a série V0 quanto para a série VS, o fator de importância associado à carga variável apresentou nível de significância superior às demais variáveis para todos os percentuais de carga variável analisados.

Para as vigas da série V0, com exceção da função de falha G_1 , o fator de importância associado à resistência à compressão do concreto apresentou o segundo maior nível de significância.

Em análise de confiabilidade é comum considerar como determinísticas as variáveis aleatórias que apresentam nível de significância $I_i < 5\%$. Tal consideração em geral não conduz a grandes variações no índice de confiabilidade.

Assumindo-se essa premissa, analisaram-se os resultados apresentados pelos gráficos que constam no anexo A, para as vigas da série V0. Abaixo são apresentadas as conclusões sobre a consideração de algumas variáveis como determinísticas, onde os valores apresentados entre parêntesis correspondem aos maiores fatores de importância encontrados para a variável analisada:

- para todas as funções de falha, para todas as razões a/d estudadas, a carga permanente pode ser considerada como determinística para percentuais de carga variável maiores ou iguais a 40% – $I \leq 3\%$;
- para a função de falha G_4 e G_5 , para as razões $a/d > 1,38$ e $a/d > 0,96$, respectivamente, a carga permanente pode ser considerada como determinística para qualquer percentual de carga variável – $I \leq 4\%$;

- para a função de falha G_1 , para todas as razões a/d estudadas, a tensão de escoamento das armaduras pode ser considerada como determinística para percentuais de carga variável maiores ou iguais a 60% – $I \leq 5\%$;
- com exceção para a função de falha G_1 , pode-se considerar a tensão de escoamento da armadura como determinística para todas as razões a/d estudadas, para qualquer percentual de carga variável – $I \leq 0,45\%$.

Ainda, analisando-se os resultados apresentados pelos gráficos que constam no anexo A para as vigas da série VS, conclui-se que:

- para as funções de falha G_1 e G_3 , para valores de $a/d \leq 0,96$, a carga permanente pode ser considerada determinística para qualquer percentual de carga variável – $I \leq 4\%$;
- para as funções de falha G_1 e G_2 , para todas as razões a/d estudadas, a resistência à compressão do concreto pode ser considerada como determinística para qualquer percentual de carga variável – $I \leq 0,28\%$;
- para a função de falha G_1 , para razão $a/d = 0,96$, a tensão de escoamento da armadura pode ser considerada como determinística para um percentual de carga variável maior ou igual a 80% – $I \leq 5\%$;
- para a função de falha G_1 , para razão $a/d \geq 1,38$, a tensão de escoamento da armadura pode ser considerada como determinística para percentual de carga variável maior ou igual a 60% – $I \leq 5\%$;
- para a função de falha G_2 , para todos os valores da razão a/d estudadas, a carga permanente pode ser considerada determinística para percentuais de carga maiores ou iguais a 40% – $I \leq 4\%$;
- para a função de falha G_2 , para todos os valores da razão a/d estudadas, a tensão de escoamento da armadura transversal pode ser considerada como determinística para percentuais de carga variável maiores ou iguais a 40% – $I \leq 4\%$;
- para a função de falha G_3 , para todos os valores da razão a/d estudadas, a tensão de escoamento pode ser considerada como determinística para qualquer valor de percentual de carga – $I \leq 0,39\%$;
- para as funções de falha G_4 e G_5 , para todos os valores da razão a/d estudadas, a tensão de escoamento da armadura longitudinal e a carga permanente podem ser

consideradas como determinísticas para qualquer percentual de carga variável – $I \leq 4\%$.

Conforme mencionado anteriormente, o fator de importância associado à carga variável apresentou nível de significância superior às demais variáveis. Devido ao seu alto nível de significância conduziu-se um estudo para avaliar a importância da dispersão dos valores da ação variável em relação a sua média.

Realizaram-se análises de confiabilidade para cada razão a/d das vigas da série V0 e VS, para o percentual de carga variável $k_q = 0,80$, que em todas as análises apresentou o maior valor de fator de importância para a carga variável. Avaliaram-se os coeficientes de variação δ_q de 0,10 a 0,40, incrementando-se de 0,10. A Figura 0.11 a Figura 0.18 apresentam os resultados encontrados.

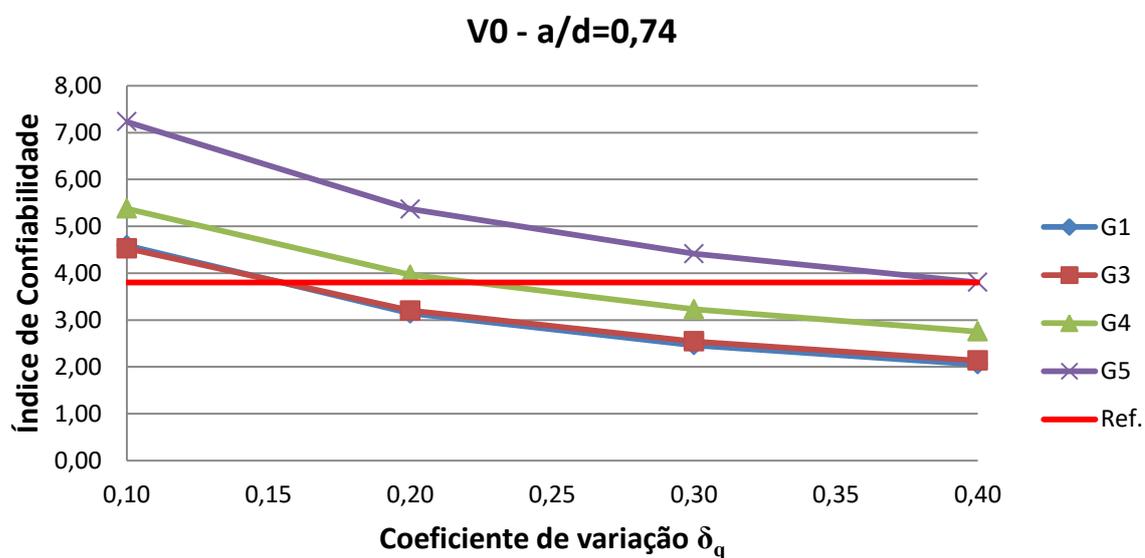


Figura 0.11 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δ_q , série V0 – $a/d = 0,74$.

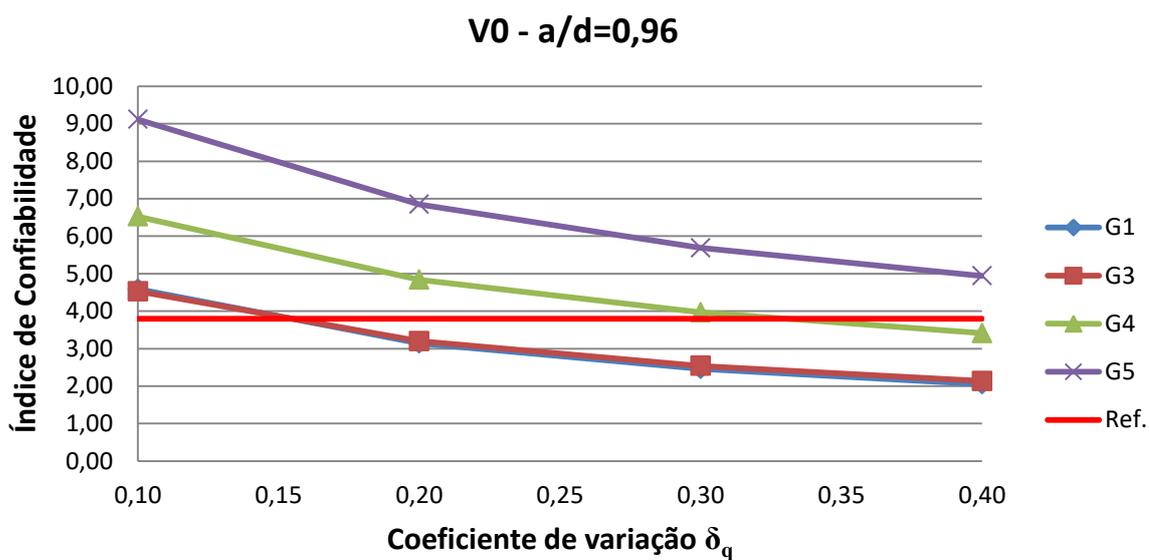


Figura 0.12 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δ_q , série V0 - a/d = 0,96.

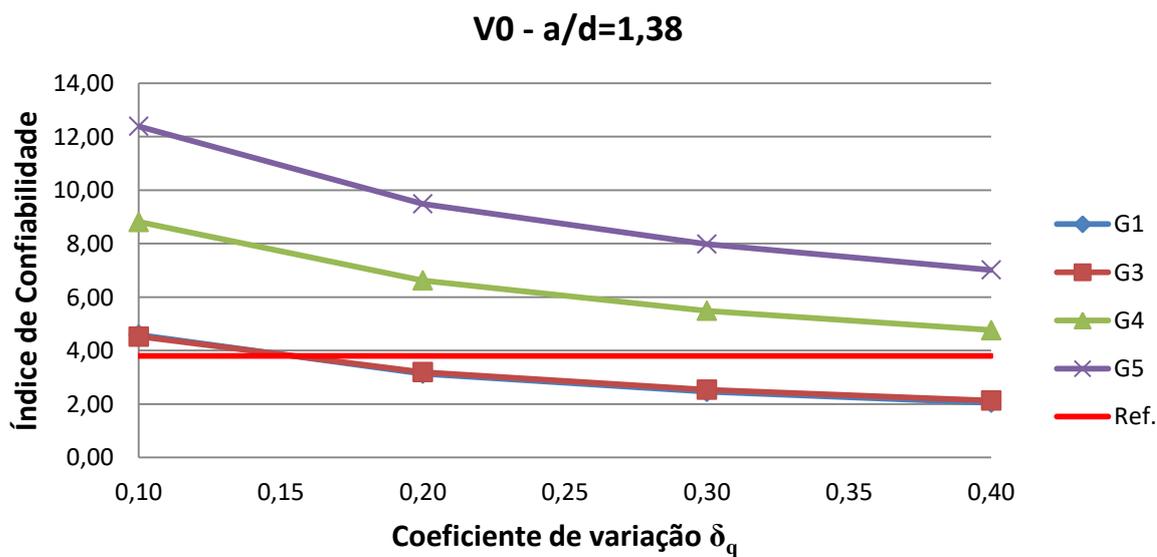


Figura 0.13 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δ_q , série V0 - a/d = 1,38.

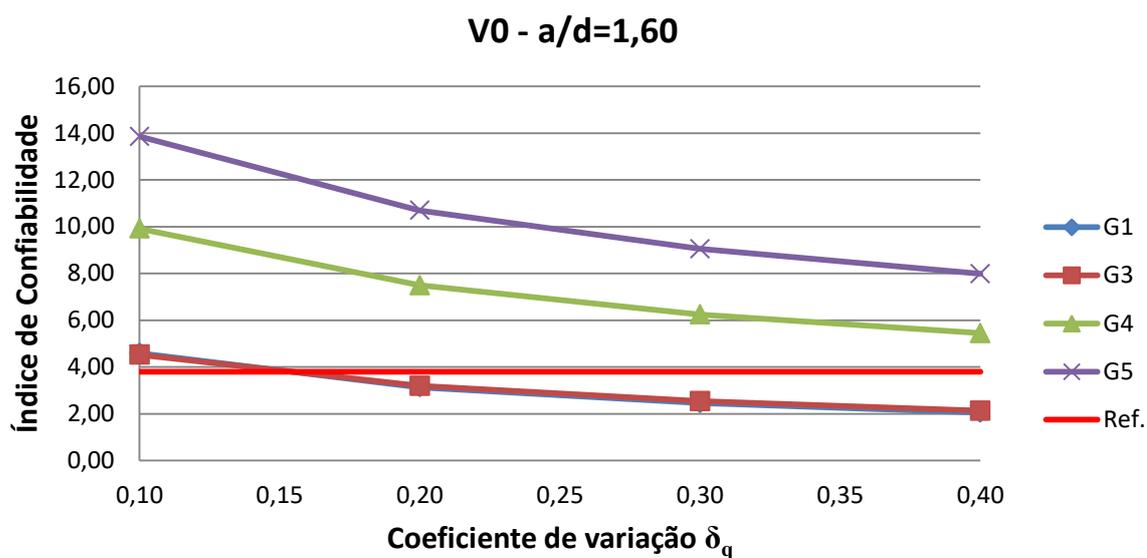


Figura 0.14 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δ_q , série
V0 - $a/d = 1,60$.

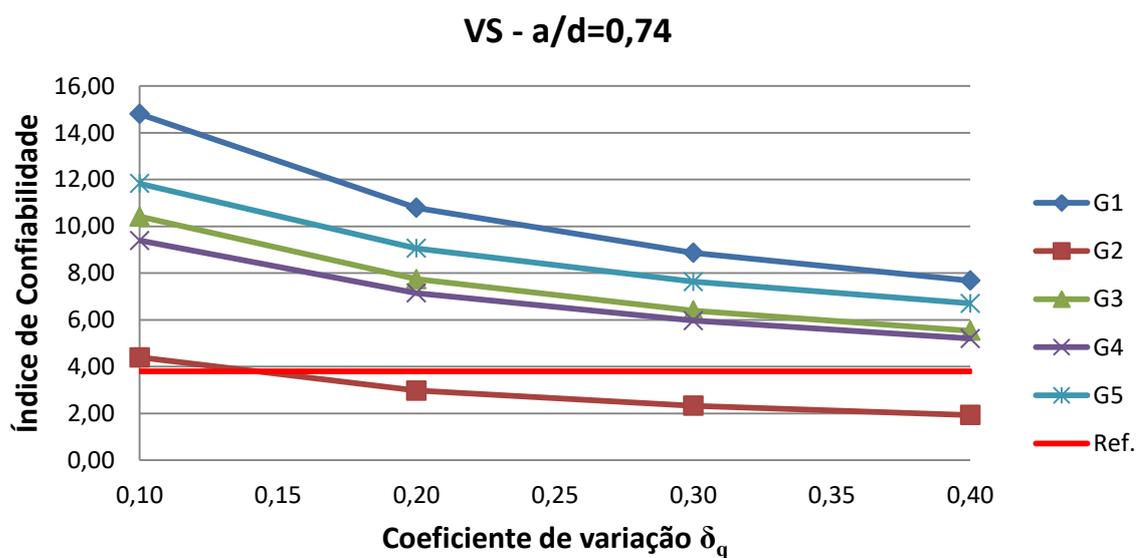


Figura 0.15 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δ_q , série
VS - $a/d = 0,74$.

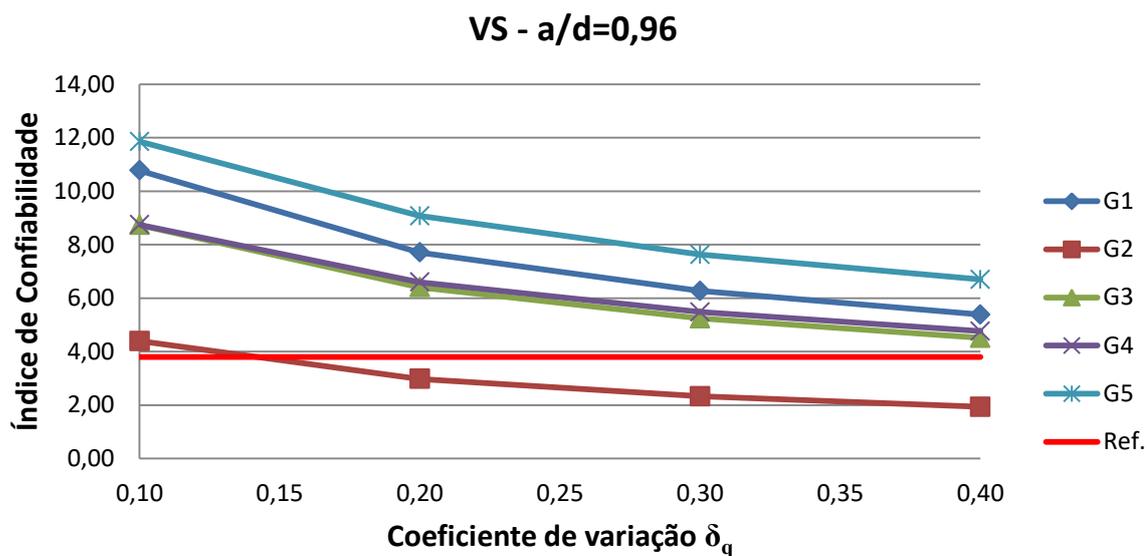


Figura 0.16 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δ_q , série VS - $a/d = 0,96$.

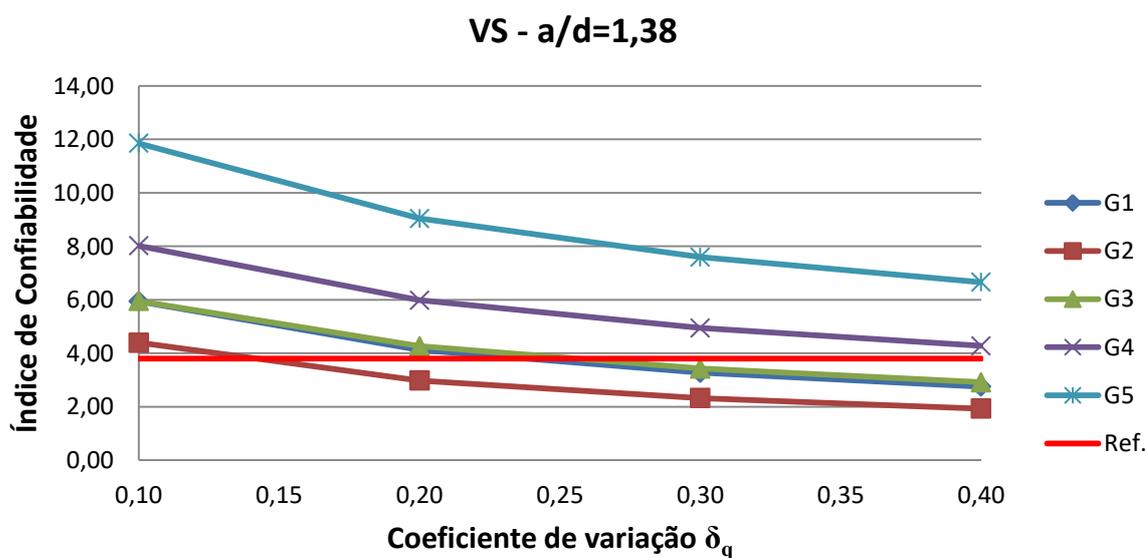


Figura 0.17 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δ_q , série VS - $a/d = 1,38$.

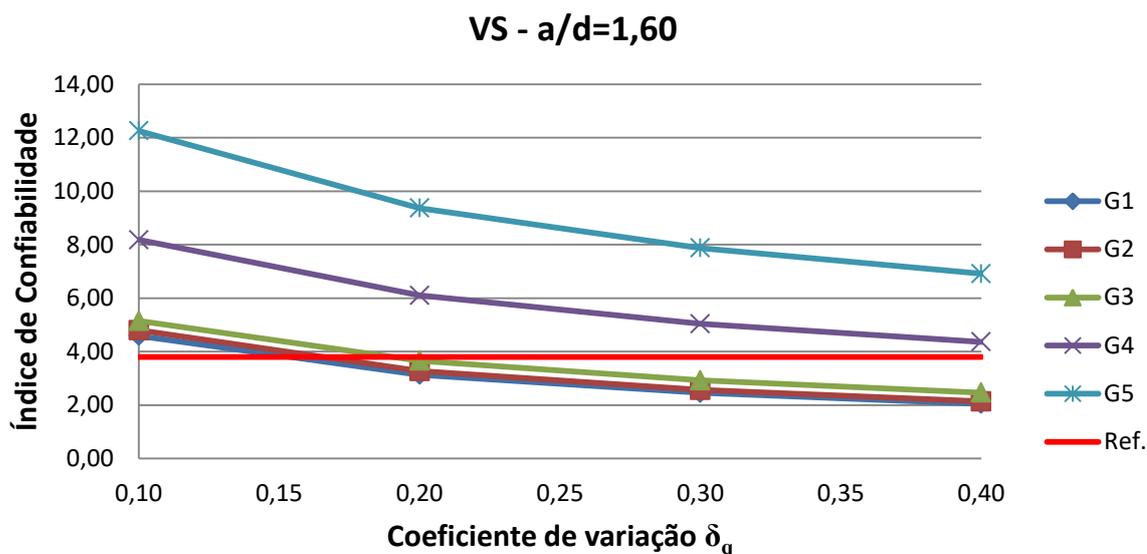


Figura 0.18 – Variação do índice de confiabilidade β_i em relação ao coeficiente de variação de carga δ_q , série VS - a/d = 1,60.

Analisando-se a Figura 0.11 a Figura 0.18 observa-se que o índice de confiabilidade em todos os casos estudados decresce à medida que o coeficiente de variação associado à carga variável aumenta. Esses resultados ilustram forte relação existente entre o índice de confiabilidade do sistema e o coeficiente de variação de uma variável aleatória, assim como, justifica os valores obtidos para o fator de importância da carga variável cujo coeficiente de variação adotado segundo o JCSS (2001) é de 0,25.

6.4.4 Exemplo II

Este exemplo tem por objetivo avaliar as consequências da aplicação dos fatores de modelagem de efeito de solicitação ϕ_S e de resistência ϕ_R , tomados como variáveis aleatórias na análise de confiabilidade das vigas curtas. Sendo assim, conforme a equação (0.7), aplicaram-se às equações (0.13) à (0.19) os fatores de modelagem, multiplicando-se a parcela resistente por ϕ_R e a solicitante por ϕ_S .

Realizou-se a análise de confiabilidade com o objetivo de se obter os índices de confiabilidade β_i e suas respectivas probabilidades de falha p_{f_i} , assim como o índice de confiabilidade do sistema em série β_{sist} e a probabilidade de falha do sistema $p_{f_{sist}}$. Foram obtidos os fatores de importância relativa I das variáveis aleatórias envolvidas.

Os modelos probabilísticos das variáveis aleatórias consideradas neste exemplo são transcritos na Tabela 0.9.

Tabela 0.9 – Valores para os modelos probabilísticos das resistências do concreto, do aço e das ações, exemplo II.

Variáveis Aleatórias	Valor característico	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Função densidade de probabilidade (FDP)
Concreto (MPa)	30	36,6	4,00	0,11	Lognormal
Aço – armadura longitudinal (MPa)	500	560	30	0,0536	Lognormal
Aço – armadura transversal (MPa)	600	660	30	0,0455	Lognormal
Solicitação Permanente (kN)	1,00	1,00	–	0,10	Normal
Solicitação Acidental (kN)	1,00	1,00	–	0,25	Gumbel
Fator de modelagem – solicitação (ϕ_S)	1,0	1,0	0,10	0,10	Lognormal
Fator de modelagem – resistência (ϕ_R)	1,4	1,4	0,35	0,25	Lognormal

As solicitações médias consideradas neste exemplo são as mesmas definidas para as vigas da série V0 e VS, apresentadas na

Tabela 0.7.

A Figura 0.19, elaborada por meio dos quadros que constam no anexo B, apresenta o comportamento do índice de confiabilidade do sistema, considerando a aplicação dos fatores de modelagem (C.F.M.) e sem considerar a aplicação dos fatores de modelagem (S.F.M.), para as vigas das séries V0 e VS, para todos os percentuais de carga, para todas as razões a/d estudadas.

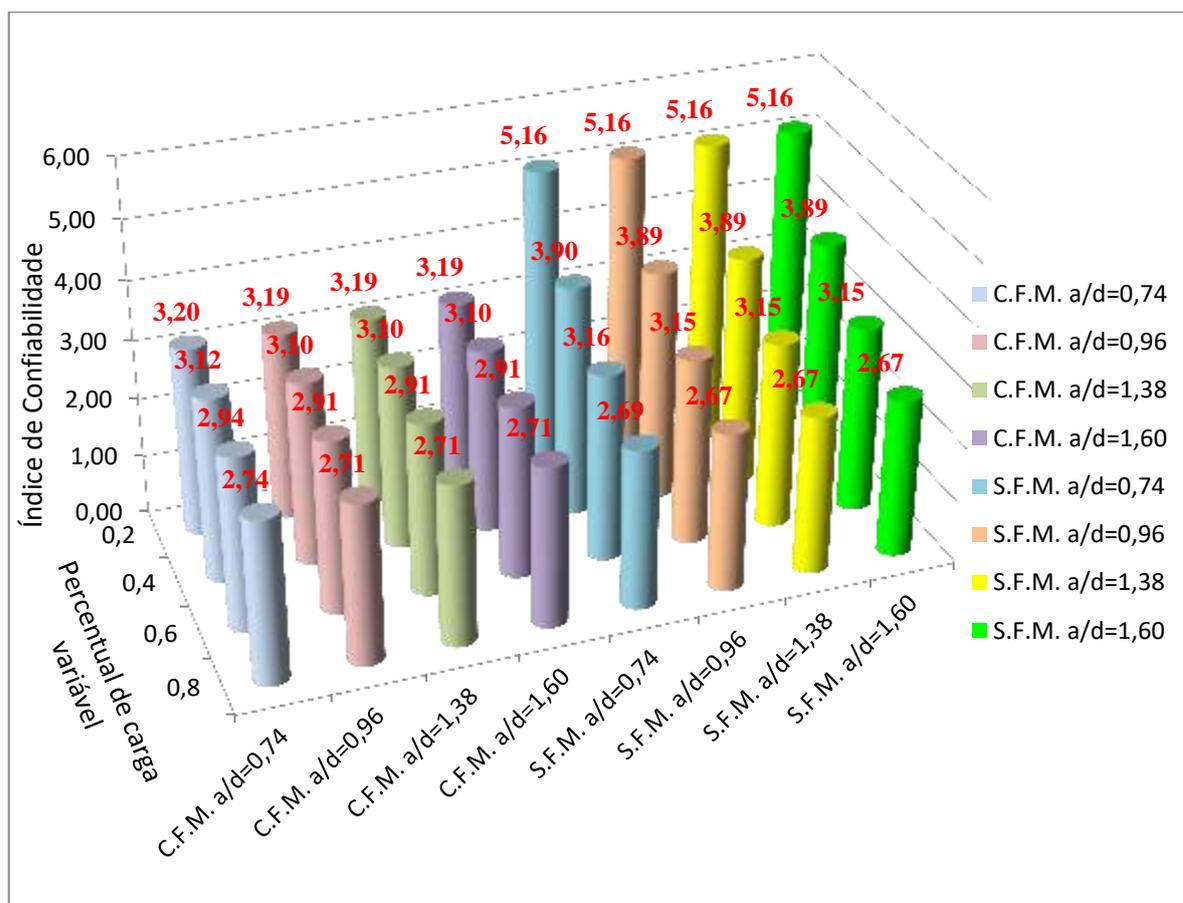


Figura 0.19 – Variação do índice de confiabilidade do sistema (C.F.M.) e (S.F.M.) em relação ao percentual de carga variável e razões a/d , séries V0 e VS.

Analisando-se o gráfico acima observa-se que:

- o modelo C.F.M. produziu índices de confiabilidade que apresentam uma variação mais suave quando comparado com o modelo S.F.M., em relação à variação do percentual de carga variável, para todas as razões a/d estudadas;
- o modelo C.F.M. produziu valores menores para o índice de confiabilidade do sistema para percentuais de carga variável inferiores a 40% em relação ao modelo S.F.M., para todas as razões a/d estudadas;

- o modelo C.F.M. produziu valores para o índice de confiabilidade do sistema próximos aos obtidos com o modelo S.F.M., para percentuais de carga variável maiores que 40%, para todas as razões a/d estudadas.

Os gráficos do anexo B apresentam a variação dos fatores de importância em relação ao percentual de carga variável, para cada função de falha, para cada razão a/d , para as vigas da série V0 e VS.

Analisando-se todos os gráficos, tanto para a série V0 quanto para a série VS, para todas as razões a/d estudadas, observou-se que:

- o fator de importância associado ao fator de modelagem aplicado à resistência apresentou nível de significância superior às demais variáveis, para os percentuais de carga variável inferiores a 60%;
- o fator de importância associado ao fator de modelagem aplicado à resistência apresentou comportamento decrescente com em relação ao percentual de carga variável;
- o fator de importância associado ao percentual de carga variável apresentou um comportamento crescente com relação ao percentual de carga variável;
- os fatores de importância associados ao percentual de carga permanente, à resistência do concreto e ao fator de modelagem aplicado às solicitações apresentaram comportamento decrescente com o percentual de carga variável;
- o fator de modelagem associado à tensão de escoamento do aço das armaduras, longitudinal e transversal, podem ser considerados como variáveis determinísticas, para todos os percentuais de carga variável estudados.

Para as vigas da série V0 observou-se que:

- para a função de falha G_1 , a resistência do concreto pode ser considerada como variável determinística para qualquer percentual de carga variável;
- para as funções de falha G_1 , G_3 e G_4 a carga permanente pode ser considerada como variável determinística para percentuais de carga variável superiores a 20%;
- para as funções de falha G_1 e G_3 a carga variável pode ser considerada como variável determinística para percentuais de carga variável menores ou iguais a 20%;

- para a função de falha G_4 , a carga variável pode ser considerada como determinística para percentuais de carga variável menores ou iguais a 20%, para razões $a/d \leq 1,38$;
- para a função de falha G_5 , a carga permanente pode ser considerada como variável determinística para percentuais de carga variável superiores a 20%, para razões $a/d \leq 0,96$, e para qualquer percentual de carga quando $a/d > 0,96$;
- para a função de falha G_5 , a carga variável pode ser considerada como variável determinística para percentuais de carga variável menores ou iguais a 20%, para razões $a/d < 1,38$.

Para as vigas da série VS observou-se que:

- para as funções de falha G_1 e G_2 a resistência do concreto pode ser considerada como variável determinística;
- para a função de falha G_1 a carga permanente pode ser considerada como determinística para qualquer percentual de carga variável, para razões $a/d \leq 0,74$, e para percentuais de carga variável superiores a 20% para razões $a/d > 0,74$.
- para as funções de falha G_2 , G_3 e G_4 a carga permanente pode ser considerada como determinística para percentuais de carga variável superiores a 20%;
- para a função de falha G_5 a carga permanente pode ser considerada como determinística para qualquer percentual de carga variável;
- para a função de falha G_1 a carga variável pode ser considerada como determinística para percentual de carga variável menor ou igual a 20%, para razões $a/d \geq 1,38$;
- para as funções de falha G_2 e G_4 a carga variável pode ser considerada como determinística para percentual de carga variável menor ou iguais a 20%;
- para a função de falha G_3 a carga variável pode ser considerada como determinística para percentual de carga variável menor ou igual a 20%, para razões $a/d \geq 0,96$.

6.4.5 Exemplo III

Neste exemplo as análises utilizam a função densidade de probabilidade normal para as resistências do aço e do concreto. Posteriormente são comparados os índices de confiabilidade β_i encontrados para cada função de falha G_i , e também os índices de

confiabilidade do sistema em série β_{sist} para as vigas da série V0 e VS com os índices de confiabilidade encontrados no item 0.

Os modelos probabilísticos das variáveis aleatórias consideradas neste exemplo são transcritos na Tabela 0.10.

Tabela 0.10 – Valores para os modelos probabilísticos das resistências do concreto, do aço e das ações, exemplo III.

Variáveis Aleatórias	Valor característico	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Função densidade de probabilidade (FDP)
Concreto (MPa)	30	36,6	4,00	0,11	Normal
Aço – armadura longitudinal (MPa)	500	560	30	0,0536	Normal
Aço – armadura transversal (MPa)	600	660	30	0,0455	Normal
Solicitação Permanente (kN)	1,00	1,00	–	0,10	Normal
Solicitação Acidental (kN)	1,00	1,00	–	0,25	Gumbel
Fator de modelagem – solicitação (ϕ_S)	1,0	1,0	0,10	0,10	Lognormal
Fator de modelagem – resistência (ϕ_R)	1,4	1,4	0,35	0,25	Lognormal

As solicitações médias consideradas neste exemplo são as mesmas definidas para as vigas da série V0 e VS, apresentadas na

Tabela 0.7.

No anexo C constam os quadros com os resultados do exemplo em questão. Comparando-se os índices de confiabilidade β_i e β_{sist} obtidos quando da consideração da resistência do concreto e da tensão de escoamento dos aços com distribuições normais, com os resultados obtidos no exemplo II (resistência do concreto e da tensão de escoamento dos aços com distribuições lognormal), observa-se que:

- para todas as funções de falha e razões a/d , e para todos os percentuais de carga estudados, houve pouca variação no índice de confiabilidade das funções de falha β_i , sendo registrada a diferença máxima de $-4,55\%$ para a série V0 e $-3,74\%$ para a série VS;
- para todas as razões a/d e todos os percentuais de carga estudados, houve pouca variação para o índice de confiabilidade do sistema β_{sist} , sendo registrada a diferença máxima de $-0,18\%$ para a série V0 e $-0,09\%$ para a série VS;
- as maiores variações para o índice de confiabilidade, tanto para as funções de falha como para o sistema de falha, foram obtidos para percentuais de carga variável menores.

6.4.6 Exemplo IV

Este exemplo foi desenvolvido realizando-se análises com o método analítico FORM. Os objetivos deste exemplo são:

- a) calcular o consumo de armadura longitudinal e transversal necessários para se obter o índice de confiabilidade de referência $\beta_r = 3,8$, a partir das coordenadas do ponto de projeto y^* , obtido mediante análise de confiabilidade para cada par de percentual de carga k_q e k_g ;
- b) obter os fatores parciais de segurança γ_i aplicados a cada variável aleatória por meio das coordenadas do ponto de projeto y^* e dos valores característicos das variáveis aleatórias, que aplicados segundo um enfoque semi-probabilístico forneça para a viga um índice de confiabilidade $\beta_r = 3,8$;
- c) relacionar os fatores de importância relativa I_i das variáveis aleatórias, obtidos na análise de confiabilidade para se ter $\beta_r = 3,8$, com os coeficientes parciais de segurança γ_i encontrados.

Os modelos probabilísticos das variáveis aleatórias consideradas neste exemplo são transcritos na

Tabela 0.11.

Tabela 0.11 – Valores para os modelos probabilísticos das resistências do concreto, do aço e das ações, exemplo IV.

Variáveis Aleatórias	Valor característico	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Função densidade de probabilidade (FDP)
Concreto (MPa)	30	36,6	4,00	0,11	Lognormal
Aço – armadura longitudinal (MPa)	500	560	30	0,0536	Lognormal
Aço – armadura transversal (MPa)	600	660	30	0,0455	Lognormal
Solicitação Permanente (kN)	1,00	1,00	–	0,10	Normal
Solicitação Acidental (kN)	1,00	1,00	–	0,25	Gumbel
Fator de modelagem – solicitação (ϕ_S)	1,0	1,0	0,10	0,10	Lognormal
Fator de modelagem – resistência (ϕ_R)	1,4	1,4	0,35	0,25	Lognormal

Em todas as análises realizadas para as séries V0 e VS, foi considerada uma solicitação média de 100 kN.

O cálculo das armaduras longitudinal e transversal por meio da análise de confiabilidade é realizado arbitrando-se valores para as áreas das armaduras. Foram admitidas as seguintes condições:

- para a armadura longitudinal adotou-se a bitola mínima de 8 mm e a bitola máxima de 16 mm e foi-se alterando a quantidade de barras até que os índices de confiabilidade referente a cada função de falha fossem iguais ou aproximadamente superiores ao índice de confiabilidade de referência;
- no caso das vigas com armadura transversal, além das considerações para a armadura longitudinal, manteve-se a bitola dos estribos de 6,3 mm e alterou-se a quantidade de estribos dispostas ao longo do comprimento a_L , até que os índices de confiabilidade referente a cada função de falha fossem iguais ou aproximadamente superiores ao índice de confiabilidade de referência.

Depois foi obtido o índice de confiabilidade do sistema em série; caso fosse maior que o índice de confiabilidade de referência, o dimensionamento seria considerado satisfatório; caso contrário alterava-se novamente a quantidade de barras adotadas.

Para a solução deste exemplo foi necessária a introdução de expressões adicionais, pois para os dados de entrada são necessárias as seguintes informações funções da bitola adotada: a altura útil d , braço de alavanca z , o ângulo de inclinação da biela θ .

Dependendo da bitola adotada e da área de armadura calculada é necessária mais de uma camada de armadura, alterando a posição do centro de gravidade do conjunto de barras. Além disso, deve-se considerar critérios normativos para a disposição transversal adequada das armaduras longitudinais. Assim introduziram-se expressões para o cálculo da posição do centro de gravidade do conjunto de barras. Os parâmetros d , z e θ foram calculados em função da posição do centro de gravidade das armaduras longitudinais.

Devido a se trabalhar com o par de variáveis (bitola e quantidade de barras), podem ser obtidos vários índices de confiabilidade do sistema próximos ao índice de confiabilidade de referência. Assim foi adotado o par (bitola e quantidade de barras) que retornassem para o índice de confiabilidade do sistema um valor mais próximo possível do índice de confiabilidade de referência.

No anexo D constam os quadros com os resultados do exemplo em questão, para as vigas da série V0 e VS, para cada percentual de carga variável, considerando-se no dimensionamento o par (bitola, quantidade de barras) para a armadura longitudinal e quantidade de barras da armadura transversal dispostas ao longo do comprimento a_L que retornaram um índice de confiabilidade do sistema superior ao índice de confiabilidade de referência.

A

Tabela 0.12 apresenta os resultados do dimensionamento das vigas da série V0 e VS, para cada razão a/d e para cada percentual de carga variável k_q .

Tabela 0.12 – Resultados do dimensionamento segundo a análise de confiabilidade.

Série	a/d	k _g	k _q	θ ₁ (cm)	n ₁	A _{sl} (cm ²)	θ _w (cm)	n _w	A _{sw} (cm ²)	β - G1	β - G2	β - G3	β - G4	β - G5	β _{sist}	P _{f,sist}
V0	0,74	0,8	0,2	0,80	4	2,011	---	---	---	3,87	---	8,65	12,83	14,66	3,87	5,517E-05
V0	0,74	0,6	0,4	1,25	2	2,454	---	---	---	3,95	---	5,24	10,25	11,90	3,95	3,885E-05
V0	0,74	0,4	0,6	0,80	6	3,016	---	---	---	4,07	---	7,10	8,78	10,18	4,07	2,362E-05
V0	0,74	0,2	0,8	0,80	7	3,519	---	---	---	4,01	---	6,78	7,79	9,15	4,01	3,079E-05
V0	0,96	0,8	0,2	0,80	6	3,016	---	---	---	5,03	---	9,57	12,62	15,42	5,03	2,489E-07
V0	0,96	0,6	0,4	1,00	4	3,142	---	---	---	3,91	---	6,30	10,08	12,46	3,91	4,543E-05
V0	0,96	0,4	0,6	1,25	3	3,682	---	---	---	3,81	---	4,89	8,63	10,83	3,81	7,073E-05
V0	0,96	0,2	0,8	0,80	9	4,524	---	---	---	3,94	---	6,70	7,65	9,90	3,94	3,994E-05
V0	1,38	0,8	0,2	0,80	8	4,021	---	---	---	4,26	---	8,88	13,11	17,29	4,26	1,030E-05
V0	1,38	0,6	0,4	1,00	6	4,712	---	---	---	4,05	---	6,40	10,45	13,78	4,05	2,602E-05
V0	1,38	0,4	0,6	0,80	11	5,529	---	---	---	3,84	---	6,83	8,99	12,42	3,84	6,077E-05
V0	1,38	0,2	0,8	0,80	13	6,535	---	---	---	3,83	---	6,55	8,01	11,36	3,83	6,288E-05
V0	1,6	0,8	0,2	0,80	9	4,524	---	---	---	3,99	---	8,64	13,55	18,20	3,99	3,293E-05
V0	1,6	0,6	0,4	0,80	11	5,529	---	---	---	4,01	---	7,46	10,85	14,96	4,01	3,092E-05
V0	1,6	0,4	0,6	0,80	13	6,535	---	---	---	3,88	---	6,85	9,34	13,25	3,88	5,263E-05
V0	1,6	0,2	0,8	1,00	10	7,854	---	---	---	3,97	---	5,79	8,31	11,80	3,97	3,539E-05
VS	0,74	0,8	0,2	0,80	2	1,005	0,63	2	1,247	4,88	4,52	5,97	12,84	14,96	4,50	3,365E-06
VS	0,74	0,6	0,4	0,80	3	1,508	0,63	3	1,870	5,69	5,46	6,50	10,26	12,07	5,44	2,666E-08
VS	0,74	0,4	0,6	0,80	3	1,508	0,63	3	1,870	4,63	4,42	5,36	8,79	10,41	4,40	5,368E-06
VS	0,74	0,2	0,8	0,80		1,508	0,63	4	2,494	3,96	4,87	4,64	7,81	9,30	3,97	3,670E-05
VS	0,96	0,8	0,2	0,80	3	1,508	0,63	3	1,870	4,45	6,31	7,41	12,62	15,67	4,45	4,357E-06
VS	0,96	0,6	0,4	0,80	4	2,011	0,63	3	1,870	4,80	4,58	6,99	10,08	12,68	4,55	2,652E-06
VS	0,96	0,4	0,6	0,80	4	2,011	0,63	4	2,494	3,89	4,93	5,78	8,63	10,96	3,89	4,993E-05
VS	0,96	0,2	0,8	1,00	3	2,356	0,63	4	2,494	3,89	4,22	4,74	7,66	9,86	3,88	5,129E-05
VS	1,38	0,8	0,2	0,80	5	2,513	0,63	3	1,870	3,87	5,05	8,82	13,04	17,17	3,87	5,358E-05
VS	1,38	0,6	0,4	0,80	6	3,016	0,63	4	2,494	3,85	5,20	7,51	10,43	14,15	3,85	5,915E-05
VS	1,38	0,4	0,6	1,25	3	3,682	0,63	4	2,494	3,94	4,20	5,15	8,95	12,26	3,93	4,263E-05
VS	1,38	0,2	0,8	0,80	9	4,524	0,63	5	3,117	4,05	4,43	6,93	7,98	11,41	4,04	2,629E-05
VS	1,6	0,8	0,2	1,00	4	3,142	0,63	3	1,870	3,99	4,67	7,99	13,46	18,02	3,99	3,366E-05
VS	1,6	0,6	0,4	1,25	3	3,682	0,63	4	2,494	3,82	4,95	5,67	10,76	14,73	3,82	6,670E-05
VS	1,6	0,4	0,6	0,80	9	4,524	0,63	4	2,494	3,87	4,00	7,39	9,28	13,27	3,83	6,482E-05
VS	1,6	0,2	0,8	1,00	7	5,498	0,63	5	3,117	4,01	4,24	6,31	8,26	11,87	3,99	3,244E-05

A Figura 0.20 à Figura 0.22 apresentam a área de aço da armadura longitudinal e transversal necessárias para se obter o índice de confiabilidade do sistema superior ao índice de confiabilidade de referência $\beta_r = 3,8$, retirados da

Tabela 0.12.

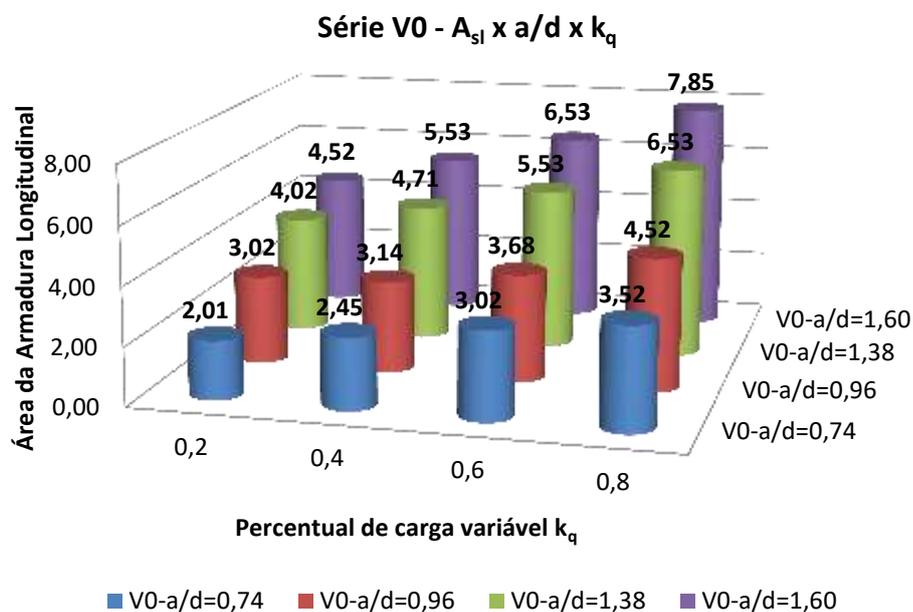


Figura 0.20 – Variação da área de aço da armadura longitudinal com a razão a/d e com o percentual de carga variável k_q , para $\beta_{sist} = 3,8$, série V0.

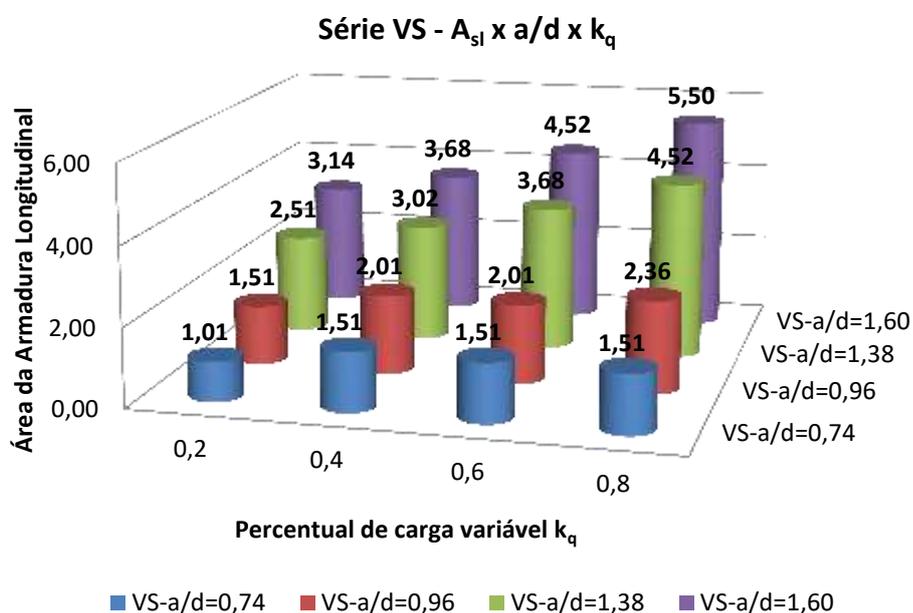


Figura 0.21 – Variação da área de aço da armadura longitudinal com a razão a/d e com o percentual de carga variável k_q , para $\beta_{sist} = 3,8$, série VS.

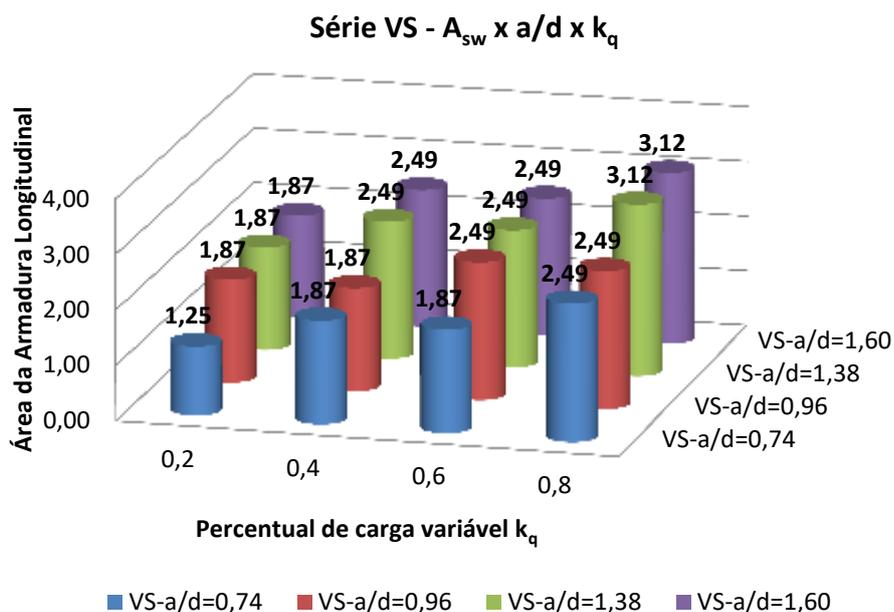


Figura 0.22 – Variação da área de aço da armadura transversal com a razão a/d e com o percentual de carga variável k_q , para $\beta_{sist} = 3,8$, série VS.

Observa-se que é necessária uma maior área de aço da armadura longitudinal à medida que a razão a/d cresce, bem como à medida que o percentual de carga variável k_q cresce. Para as vigas da série VS o índice de confiabilidade de referência é atingido para uma menor área de aço da armadura longitudinal em relação às vigas da série V0, sem armadura transversal. Com relação à armadura transversal observa-se o mesmo comportamento que para a armadura longitudinal, entretanto com variações mais suaves com o crescimento da razão a/d ou com o crescimento do percentual de carga variável k_q .

Para as vigas da série V0 e para a maioria das vigas da série VS, a função de falha relacionada ao escoamento da armadura longitudinal governou o sistema de falha. Para algumas vigas da série VS a função de falha relacionada ao escoamento da armadura transversal governou o sistema. Esse fato se deve ao comportamento discreto do problema em análise. Por exemplo, caso a função de falha relacionada ao escoamento da armadura longitudinal retornasse um índice de confiabilidade de 3,75, o que é muito próximo de 3,80, alterava-se a quantidade de barras longitudinais ou bitola para retornar um índice de confiabilidade superior a 3,8, e isso provocava um aumento significativo do índice de confiabilidade associado à função de falha em questão, passando nesses casos a função de falha associada ao escoamento da armadura transversal a governar o sistema de falha.

Os quadros do anexo D (D.9 ao D.16) apresentam as coordenadas do ponto de projeto (variáveis seguidas por *), obtidas para cada razão a/d e para cada percentual de

carga variável k_q , considerando-se as bitolas e quantidade de barras longitudinais e transversais, originários do dimensionamento,

Tabela 0.12. Essa tabela mostra os valores para os coeficientes parciais de segurança γ_i , calibrados conforme a equação (0.83), mediante a análise de confiabilidade. Os valores assinalados em vermelho nos quadros do anexo D são das funções de falha que governaram o comportamento do sistema de falha. Portanto, as conclusões sobre os coeficientes parciais de segurança são realizadas para tais funções de falha, que são transcritas na Tabela 0.13.

Tabela 0.13 – Coeficientes parciais de segurança para as funções de falha que governaram o sistema de falha.

Série	$\frac{a}{d}$	G_I	k_g	k_q	β_i	β_{sist}	k_g^*	k_q^*	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\frac{k_g^*}{k_{gk}}$	$\frac{k_q^*}{k_{qk}}$	$\frac{f_c^*}{f_{ck}}$	$\frac{f_y^*}{f_{yk}}$	$\frac{f_{yw}^*}{f_{ywk}}$
V0	0,74	G1	0,8	0,2	3,87	3,87	1,190	2,108	36,17	510,04	---	1,190	2,108	1,206	1,020	---
V0	0,74	G1	0,6	0,4	3,95	3,95	1,073	2,690	36,21	527,50	---	1,073	2,690	1,207	1,055	---
V0	0,74	G1	0,4	0,6	4,07	4,07	1,032	2,869	36,21	532,84	---	1,032	2,869	1,207	1,066	---
V0	0,74	G1	0,2	0,8	4,01	4,01	1,012	2,848	36,20	536,28	---	1,012	2,848	1,207	1,073	---
V0	0,96	G1	0,8	0,2	5,03	5,03	1,199	3,031	36,01	501,70	---	1,199	3,031	1,200	1,003	---
V0	0,96	G1	0,6	0,4	3,91	3,91	1,072	2,662	36,16	527,90	---	1,072	2,662	1,205	1,056	---
V0	0,96	G1	0,4	0,6	3,81	3,81	1,032	2,666	36,18	534,62	---	1,032	2,666	1,206	1,069	---
V0	0,96	G1	0,2	0,8	3,94	3,94	1,012	2,800	36,15	536,86	---	1,012	2,800	1,205	1,074	---
V0	1,38	G1	0,8	0,2	4,26	4,26	1,194	2,397	35,92	507,75	---	1,194	2,397	1,197	1,016	---
V0	1,38	G1	0,6	0,4	4,05	4,05	1,073	2,767	36,04	527,45	---	1,073	2,767	1,201	1,055	---
V0	1,38	G1	0,4	0,6	3,84	3,84	1,032	2,697	36,06	534,79	---	1,032	2,697	1,202	1,070	---
V0	1,38	G1	0,2	0,8	3,83	3,83	1,012	2,717	36,04	537,92	---	1,012	2,717	1,201	1,076	---
V0	1,6	G1	0,8	0,2	3,99	3,99	1,192	2,204	35,88	509,95	---	1,192	2,204	1,196	1,020	---
V0	1,6	G1	0,6	0,4	4,01	4,01	1,073	2,737	35,97	527,94	---	1,073	2,737	1,199	1,056	---
V0	1,6	G1	0,4	0,6	3,88	3,88	1,032	2,724	35,99	534,80	---	1,032	2,724	1,200	1,070	---
V0	1,6	G1	0,2	0,8	3,97	3,97	1,012	2,825	35,95	537,34	---	1,012	2,825	1,198	1,075	---
VS	0,74	G2	0,8	0,2	4,52	4,50	1,196	2,688	---	---	611,45	1,196	2,688	---	---	1,019
VS	0,74	G2	0,6	0,4	5,46	5,44	1,075	4,088	---	---	621,90	1,075	4,088	---	---	1,037
VS	0,74	G2	0,4	0,6	4,42	4,40	1,033	3,185	---	---	634,03	1,033	3,185	---	---	1,057
VS	0,74	G1	0,2	0,8	3,96	3,97	1,012	2,812	36,31	536,19	---	1,012	2,812	1,210	1,072	---
VS	0,96	G1	0,8	0,2	4,45	4,45	1,196	2,531	36,21	505,44	---	1,196	2,531	1,207	1,011	---
VS	0,96	G2	0,6	0,4	4,58	4,55	1,074	3,242	---	---	627,73	1,074	3,242	---	---	1,046
VS	0,96	G1	0,4	0,6	3,89	3,89	1,032	2,729	36,27	533,77	---	1,032	2,729	1,209	1,068	---
VS	0,96	G1	0,2	0,8	3,89	3,88	1,012	2,753	36,26	536,83	---	1,012	2,753	1,209	1,074	---
VS	1,38	G1	0,8	0,2	3,87	3,87	1,190	2,115	36,11	510,16	---	1,190	2,115	1,204	1,020	---
VS	1,38	G1	0,6	0,4	3,85	3,85	1,072	2,614	36,17	528,29	---	1,072	2,614	1,206	1,057	---
VS	1,38	G1	0,4	0,6	3,94	3,93	1,032	2,772	36,17	533,78	---	1,032	2,772	1,206	1,068	---
VS	1,38	G1	0,2	0,8	4,05	4,04	1,012	2,881	36,14	536,23	---	1,012	2,881	1,205	1,072	---
VS	1,6	G1	0,8	0,2	3,99	3,99	1,192	2,198	36,04	509,47	---	1,192	2,198	1,201	1,019	---
VS	1,6	G1	0,6	0,4	3,82	3,82	1,072	2,593	36,13	528,63	---	1,072	2,593	1,204	1,057	---
VS	1,6	G1	0,4	0,6	3,87	3,83	1,032	2,715	36,12	534,43	---	1,032	2,715	1,204	1,069	---
VS	1,6	G1	0,2	0,8	4,01	3,99	1,012	2,851	36,08	536,66	---	1,012	2,851	1,203	1,073	---

Analisando-se os resultados transcritos na Tabela 0.13 observa-se que:

- para as vigas da série V0 e VS, em todos os casos, a resistência de projeto do concreto f_c^* se mostrou superior ao valor característico em aproximadamente 20%;

- para as vigas da série V0 e VS a resistência de projeto do aço da armadura longitudinal apresentou comportamento conforme o percentual de carga variável, assumindo valores superiores ao valor característico entre 1% e 2% para $k_q = 0,2$, 5,6% para $k_q = 0,4$, 6,9% para $k_q = 0,6$ e 7,4% para $k_q = 0,8$; em todos os casos sendo os coeficientes parciais de segurança inferiores aos valores adotados pela NBR 8681 (2003);
- para as vigas da série VS, quando a função de falha associada ao escoamento da armadura transversal governou o sistema de falha, a resistência de projeto da armadura transversal apresentou valores, em média, 4% superiores ao valor característico;
- para as vigas da série V0 e VS os valores de projeto para as ações permanentes apresentaram comportamento conforme o percentual de carga variável, assumindo valores superiores aos valores característicos em torno de 19% para $k_q = 0,2$, 7% para $k_q = 0,4$, 3% para $k_q = 0,6$ e 1% para $k_q = 0,8$;
- para as vigas da série V0 e VS, em todos os casos, os valores de projeto para as ações variáveis apresentaram valores muito superiores aos valores característicos; os coeficientes parciais de segurança obtidos foram muito superiores aos valores adotados pela NBR 8681 (2003).

6.4.7 Exemplo V

A NBR 6118 (2014) e o ACI 318 (2014) consideram a aleatoriedade das solicitações permanentes e variáveis a partir de coeficientes parciais de segurança, sendo definidos de acordo com a combinação de ações. Neste trabalho serão considerados os coeficientes parciais de segurança definidos abaixo, conforme adotado por SOUZA (2011):

- NBR 6118 (2014) – $\gamma_g = 1,4$ e $\gamma_q = 1,4$;
- ACI 318 (2014) – $\gamma_g = 1,2$ e $\gamma_q = 1,6$.

O objetivo deste exemplo consiste em calibrar os coeficientes parciais de segurança das solicitações, permanentes γ_g e variáveis γ_q .

Para isso realizou-se o dimensionamento das armaduras longitudinais e transversais (vigas da série VS) utilizando-se os modelos teóricos descritos, segundo um enfoque semi-probabilístico. A força solicitante característica $F_k = 100$ kN foi considerada constituída por duas parcelas, uma permanente e outra variável, expressas por meio dos percentuais de carga permanente k_g e variável k_q , que assumem os valores listados na Tabela 0.4.

As parcelas da força solicitante característica permanente e variável foram multiplicadas pelos coeficientes parciais de segurança γ_g e γ_q , respectivamente. Aos coeficientes parciais de segurança foram atribuídos os valores (1,2; 1,3; 1,4 e 1,5), resultando em um total de 512 dimensionamentos. A Tabela 0.14 apresenta os coeficientes parciais de segurança aplicados às solicitações e às resistências utilizadas neste exemplo.

Tabela 0.14 – Coeficientes parciais de segurança.

Variáveis	Coeficientes
Concreto	$\gamma_c = 1,40$
Aço	$\gamma_s = 1,15$
Ação permanente	$\gamma_g = 1,20; 1,30; 1,40; 1,50$
Ação variável	$\gamma_q = 1,20; 1,30; 1,40; 1,50$

Foi realizada a análise de confiabilidade do sistema em série resultante para cada um dos 512 dimensionamentos, utilizando-se o método analítico FORM. Posteriormente aplicou-se o método de Newton-Cotes, utilizando-se a interpolação polinomial de Lagrange para gerar superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade do sistema em série, aproximada para todos os percentuais de carga variável e para todas as razões a/d estudadas.

Assim calibrou-se os coeficientes parciais de segurança de modo a minimizar o erro entre os valores dos índices de confiabilidade do sistema em série, função de γ_g e γ_q , e o índice de confiabilidade de referência β_r .

Os modelos probabilísticos das variáveis aleatórias consideradas neste exemplo são transcritos na

Tabela 0.11.

Tabela 0.15 – Valores para os modelos probabilísticos das resistências do concreto, do aço e das ações, exemplo V.

Variáveis Aleatórias	Valor característico	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Função densidade de probabilidade (FDP)
Concreto (MPa)	30	36,6	4,00	0,11	Lognormal
Aço – armadura longitudinal (MPa)	500	560	30	0,0536	Lognormal
Aço – armadura transversal (MPa)	600	660	30	0,0455	Lognormal
Solicitação permanente (kN)	1,00	1,00	–	0,10	Normal
Solicitação acidental (kN)	1,00	1,00	–	0,25	Gumbel

Semelhantemente ao exemplo IV foi necessária a introdução de expressões adicionais, pois para os dados de entrada são necessárias as seguintes informações, funções da bitola adotada: a altura útil d , braço de alavanca z , o ângulo de inclinação da biela θ .

Dependendo da bitola adotada e da área de aço calculada é necessária mais de uma camada de armadura, alterando-se a posição do centro de gravidade das armaduras. Além disso deve-se considerar critérios normativos para a disposição transversal adequada das armaduras longitudinais. Assim, introduziram-se expressões para o cálculo da posição do centro de gravidade das armaduras. Os parâmetros d , z e θ foram calculados em função da posição do centro de gravidade das armaduras longitudinais.

Devido a se trabalhar com o par de variáveis (bitola e quantidade de barras), podem ser obtidas várias soluções em função do detalhamento adotado. Assim foi adotado o par (bitola e quantidade de barras) que retornassem a área mais próxima à área necessária, considerando-se as bitolas 8 mm, 10 mm, 12,5 mm e 16 mm para as armaduras longitudinais, e 6,3mm para as armaduras transversais, dispostas ao longo do comprimento a_L .

No anexo E constam os quadros com os resultados do dimensionamento e dos índices de confiabilidade do sistema em série, para as vigas da série V0 e VS, para cada percentual de carga variável, para cada razão a/d , considerando-se as diferentes combinações dos coeficientes parciais de segurança, γ_g e γ_q , aplicados às solicitações.

No que diz respeito à construção da superfície de resposta foram necessárias algumas adaptações para o caso bidimensional. Assim as expressões (0.79) e (0.77) ficaram, respectivamente:

$$\phi\beta_{sist_{k_q}}(\gamma_g, \gamma_q) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m L_i(\gamma_g) L_j(\gamma_q) \beta_{sist_{k_q}}(\gamma_{g_i}, \gamma_{q_j}) \quad (0.27)$$

$$L_i(\gamma_g) = \frac{(\gamma_g - \gamma_{g_1})(\gamma_g - \gamma_{g_2}) \dots (\gamma_g - \gamma_{g_{i-1}})(\gamma_g - \gamma_{g_{i+1}}) \dots (\gamma_g - \gamma_{g_n})}{(\gamma_{g_i} - \gamma_{g_1})(\gamma_{g_i} - \gamma_{g_2}) \dots (\gamma_{g_i} - \gamma_{g_{i-1}})(\gamma_{g_i} - \gamma_{g_{i+1}}) \dots (\gamma_{g_i} - \gamma_{g_n})} \quad (0.28)$$

$$L_j(\gamma_q) = \frac{(\gamma_q - \gamma_{q_1})(\gamma_q - \gamma_{q_2}) \dots (\gamma_q - \gamma_{q_{j-1}})(\gamma_q - \gamma_{q_{j+1}}) \dots (\gamma_q - \gamma_{q_n})}{(\gamma_{q_j} - \gamma_{q_1})(\gamma_{q_j} - \gamma_{q_2}) \dots (\gamma_{q_j} - \gamma_{q_{j-1}})(\gamma_{q_j} - \gamma_{q_{j+1}}) \dots (\gamma_{q_j} - \gamma_{q_n})} \quad (0.29)$$

onde

$\phi\beta_{sist_{k_q}}(\gamma_g, \gamma_q)$ – superfície de resposta em termo de índice de confiabilidade do sistema obtida a partir dos coeficientes parciais de segurança γ_g e γ_q , referente a um determinado percentual de carga variável k_q ;

$L_i(\gamma_g)$ – polinômio de Lagrange definido a partir dos coeficientes parciais de segurança aplicados às ações permanentes γ_g , sendo neste exemplo $i = 1 \dots 4$;

$L_j(\gamma_q)$ – polinômio de Lagrange definido a partir dos coeficientes parciais de segurança aplicados às ações variáveis γ_q , sendo neste exemplo $j = 1 \dots 4$;

$\beta_{sist_{k_q}}(\gamma_g, \gamma_q)$ – índice de confiabilidade do sistema obtido a partir dos coeficientes parciais de segurança γ_g e γ_q , referente a um determinado percentual de carga variável k_q .

A Figura 0.23 a Figura 0.30 apresentam as superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade do sistema em série aproximadas $\phi\beta_{sist_{k_q}}(\gamma_g, \gamma_q)$, obtidas pela interpolação polinomial de Lagrange para os percentuais de carga variável estudados.

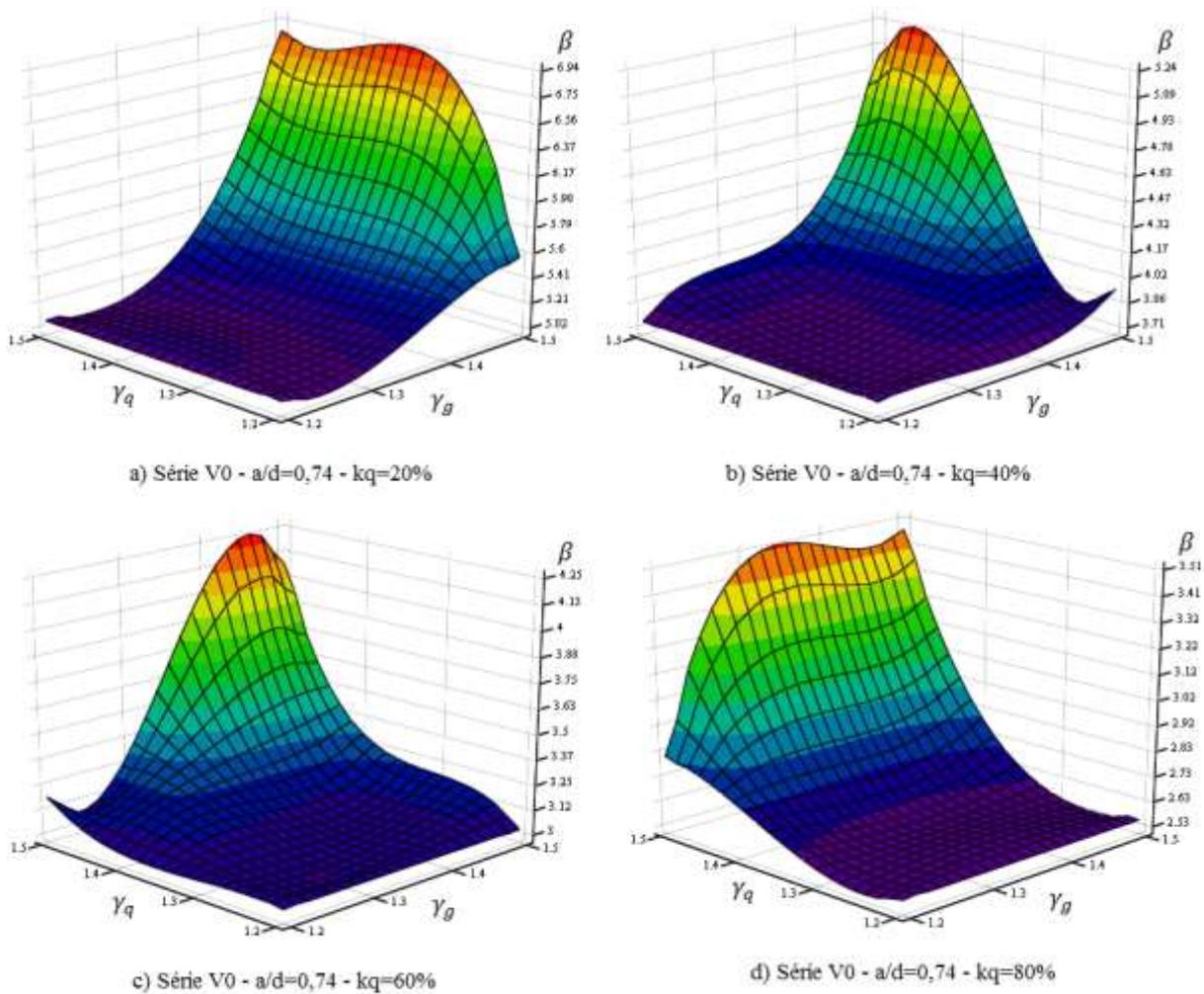


Figura 0.23 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série V0 – $a/d = 0,74$.

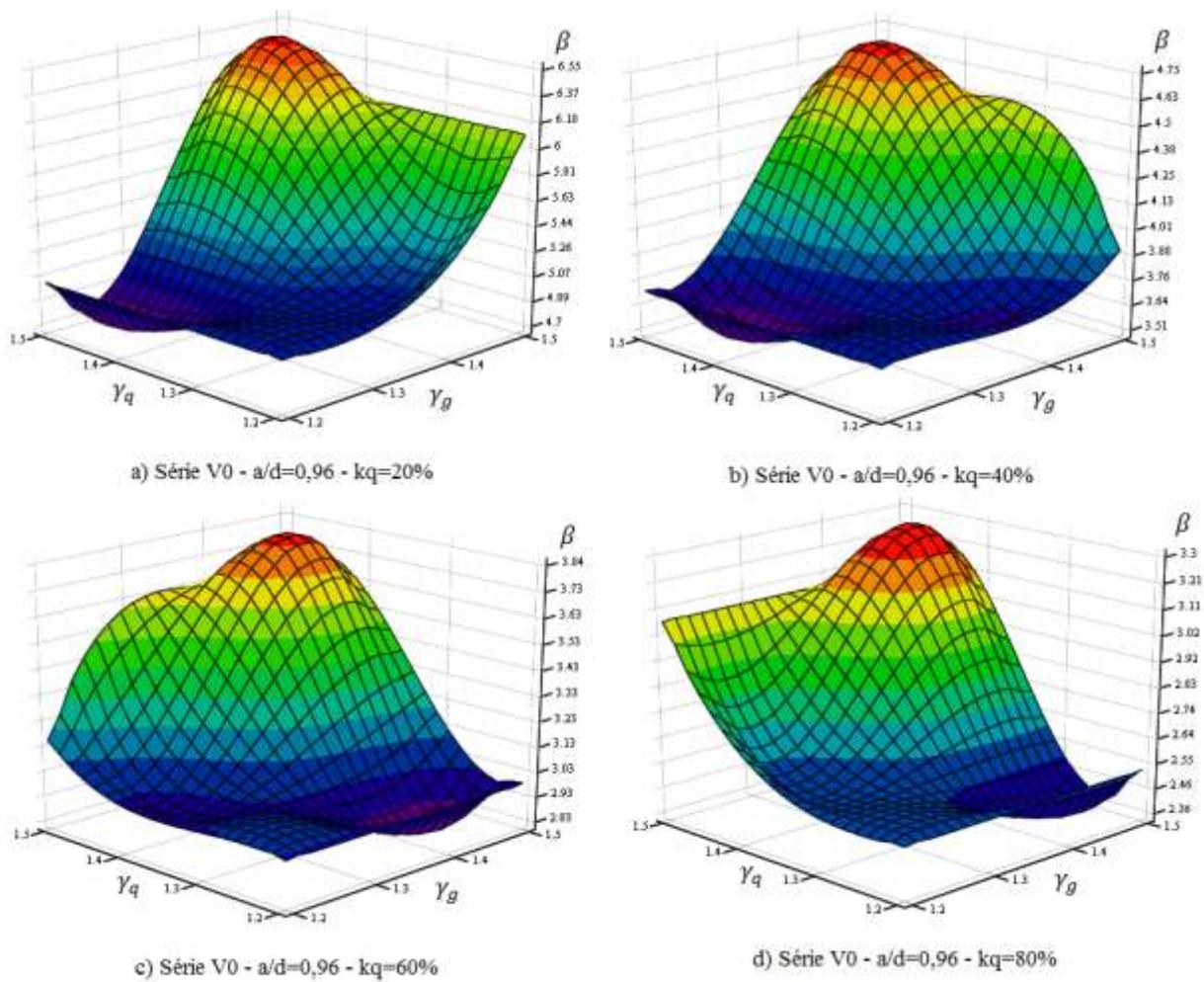


Figura 0.24 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série V0 – $a/d = 0,96$.

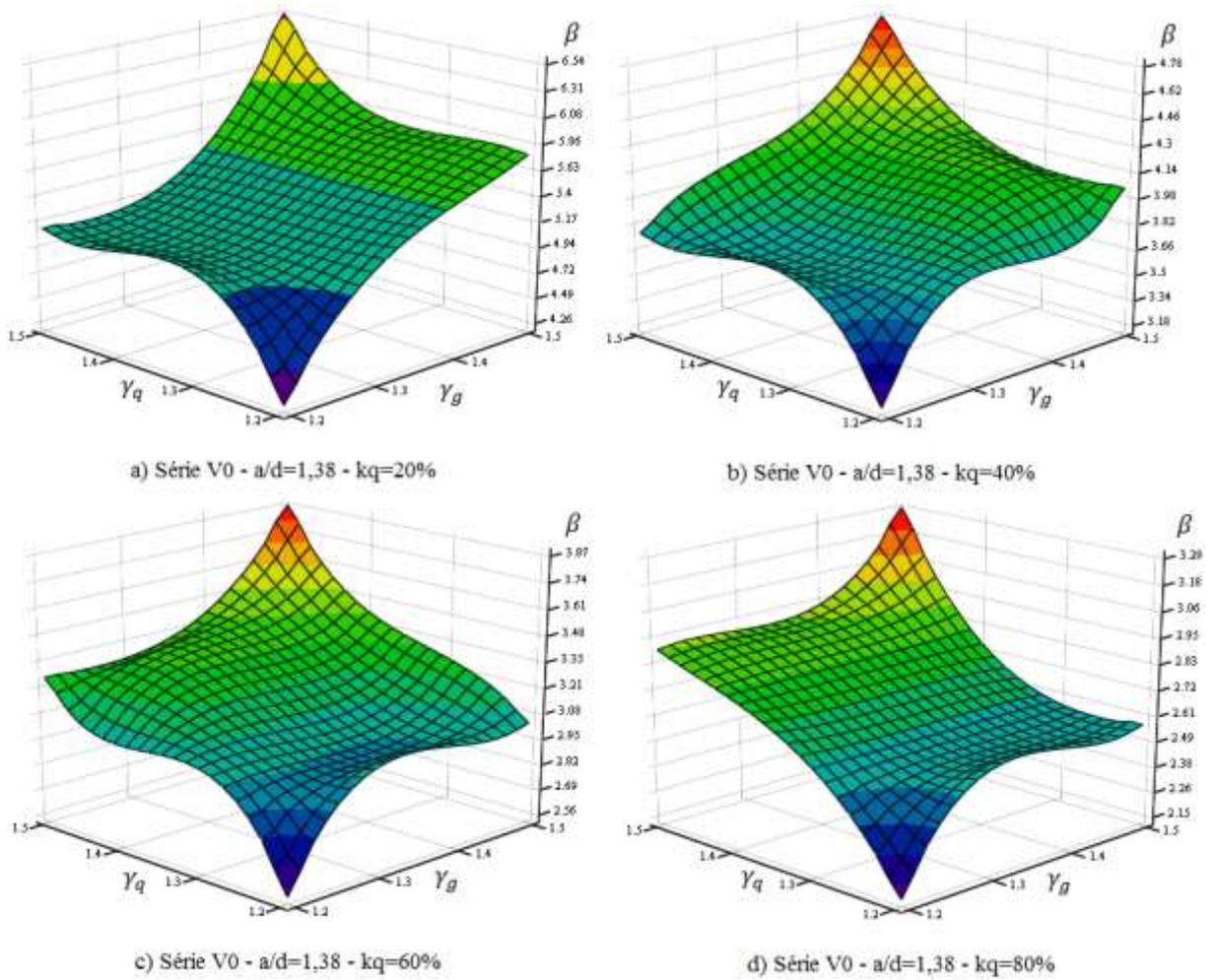


Figura 0.25 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série V0 – $a/d = 1,38$.

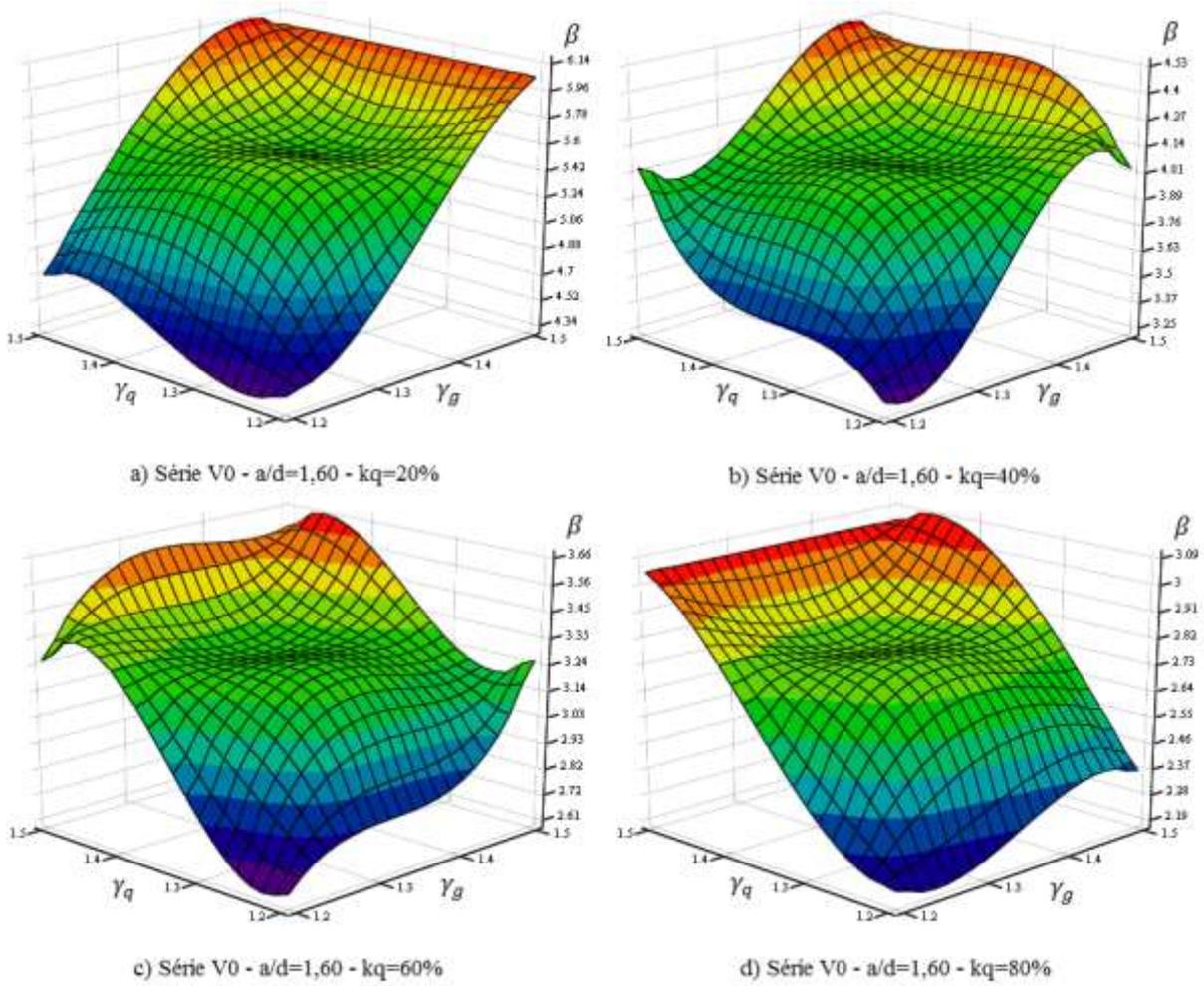


Figura 0.26 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série V0 – $a/d = 1,60$.

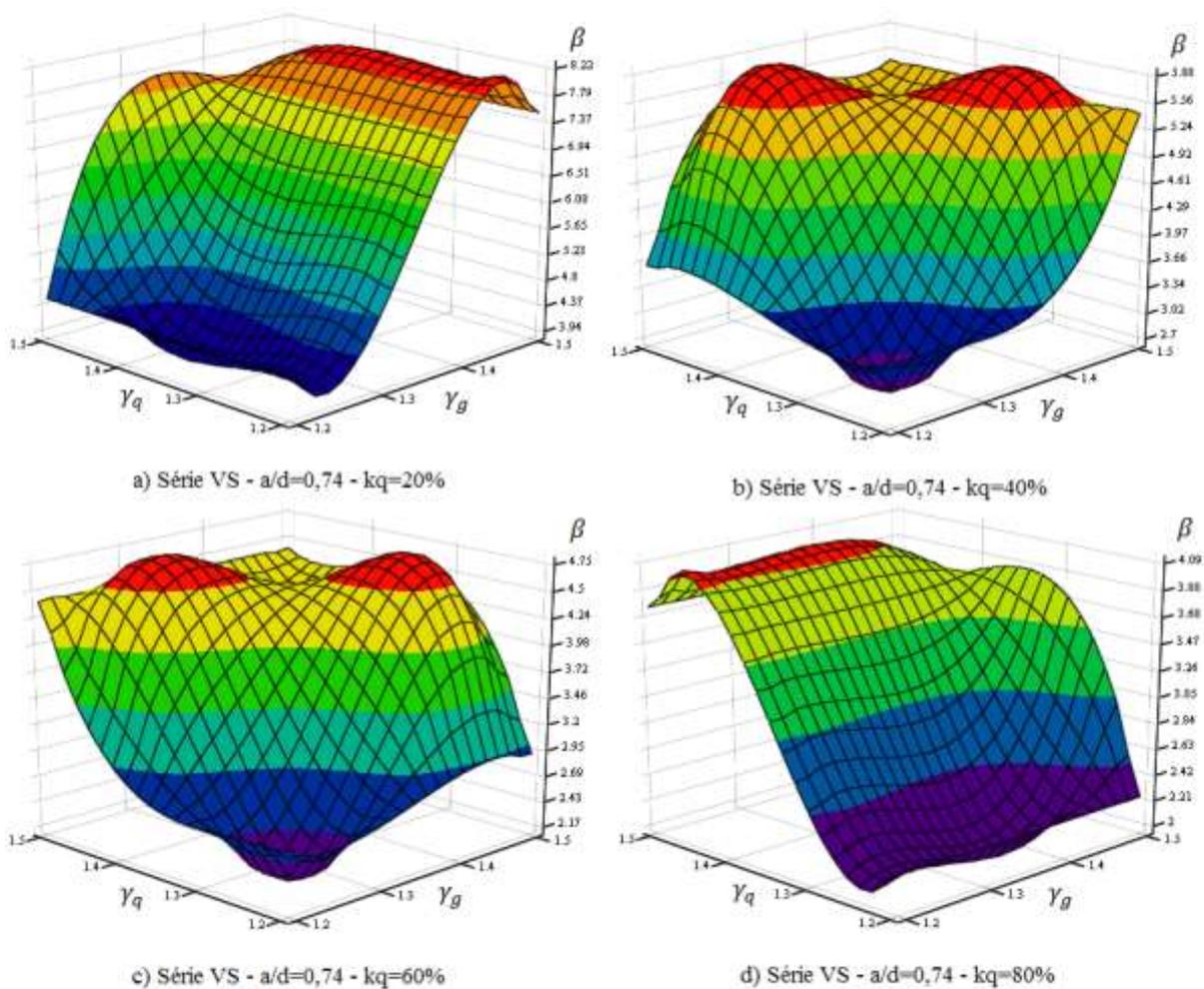


Figura 0.27 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série VS – $a/d = 0,74$.

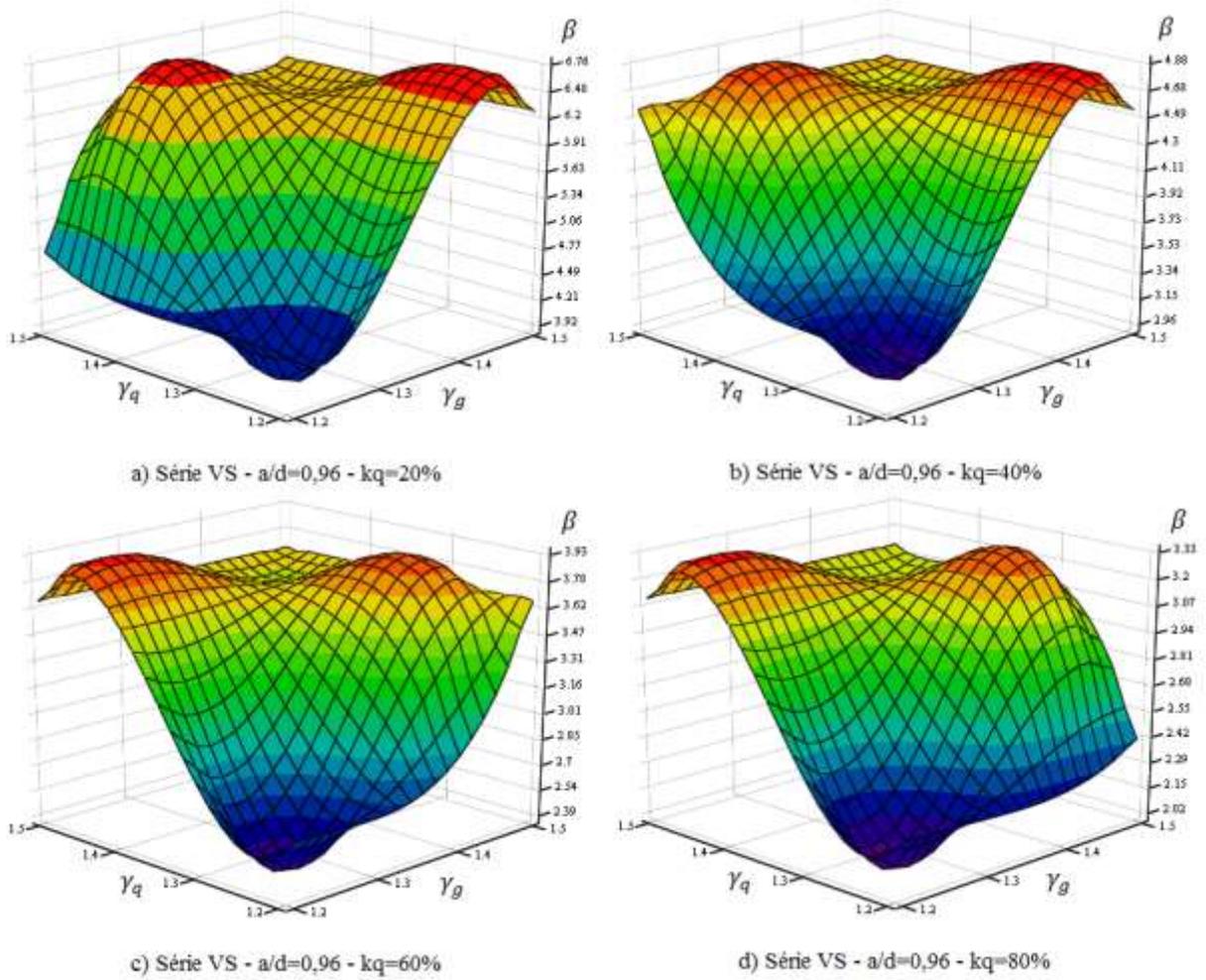


Figura 0.28 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série VS – $a/d = 0,96$.

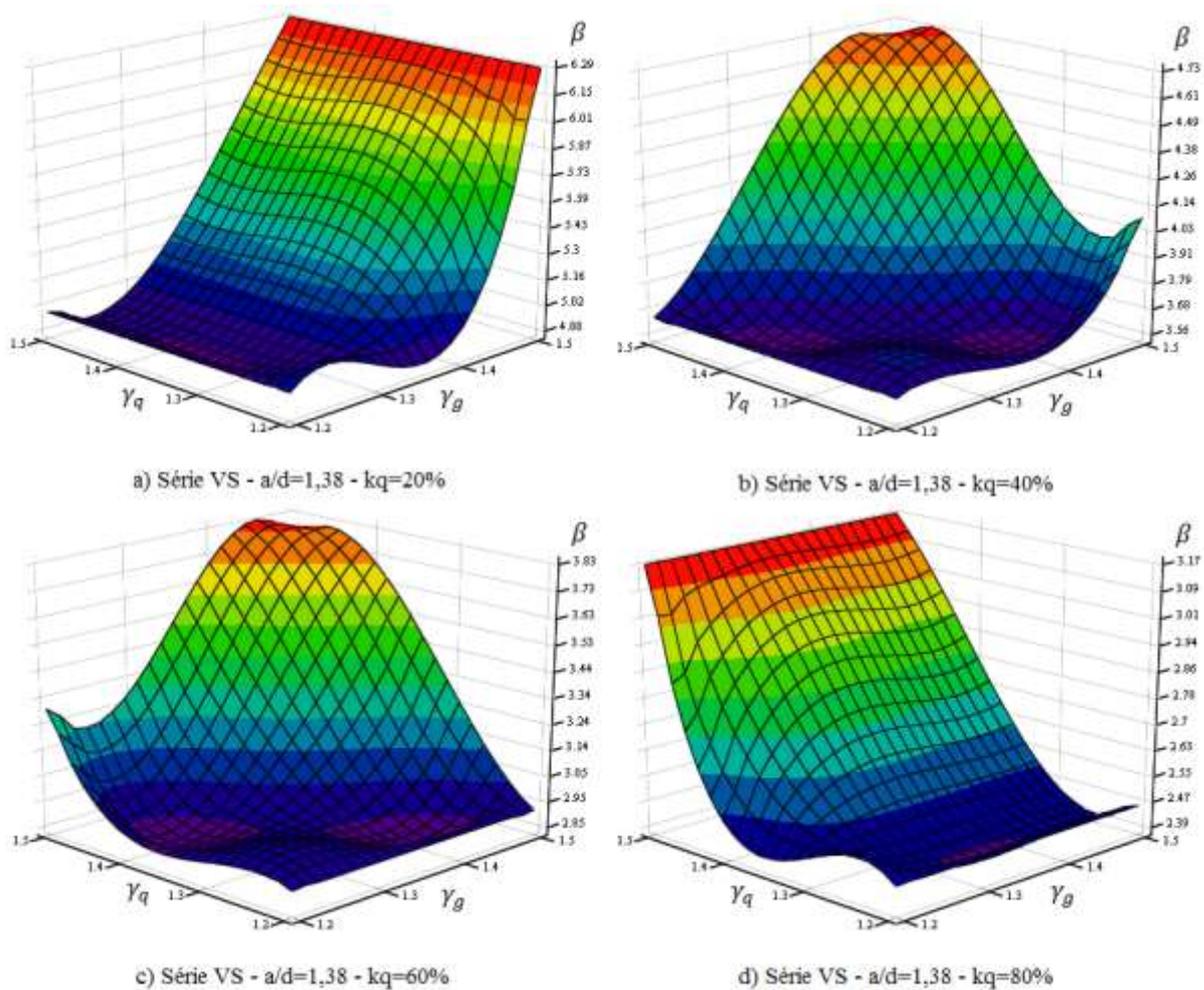


Figura 0.29 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série VS – $a/d = 1,38$.

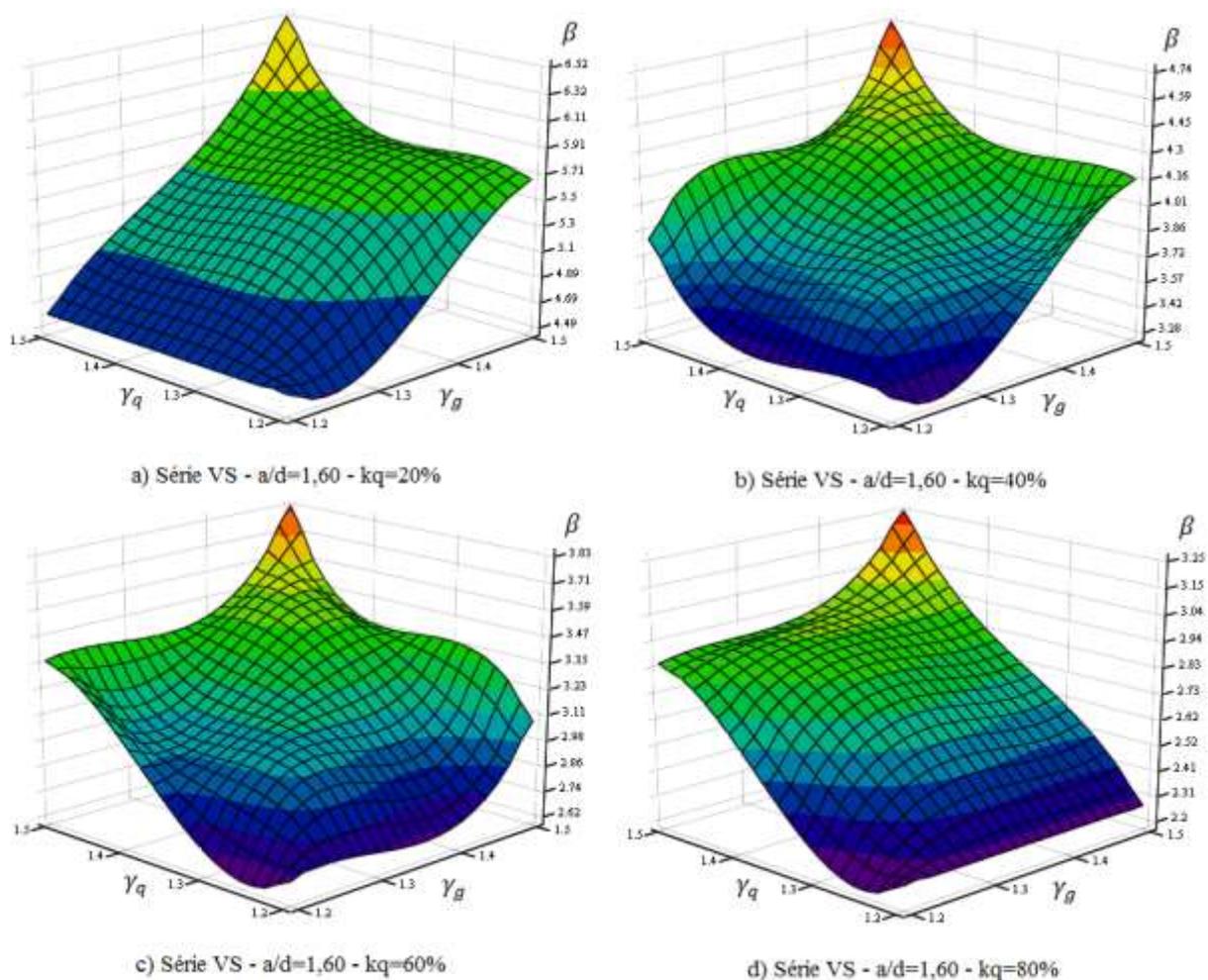


Figura 0.30 – Superfícies de resposta em termos de índice de confiabilidade, série VS – $a/d = 1,60$.

Em todos os casos estudados o comportamento “estranho” das superfícies de resposta se deve ao fato do processo de transformação da área de aço em bitolas comerciais, o que conduziu a variações bruscas no índice de confiabilidade do sistema em alguns trechos da superfície de resposta.

A transformação de área de aço em bitolas comerciais se fez necessário, pois a geometria do modelo teórico adotado muda em função da posição do centro de gravidade das armaduras, que é função da quantidade e distribuição transversal das barras longitudinais.

Observou-se também que em todos os casos estudados o aumento do percentual de carga variável conduziu a uma diminuição generalizada do índice de confiabilidade do sistema.

Para a calibração dos coeficientes parciais de segurança aplicados às solicitações fez-se necessária a definição das frequências relativas de carregamento w_{k_q} , referente a todas as razões de carga variável k_q analisadas.

Segundo SOUZA (2011) os percentuais de carga variável mais frequentes são 40%, 50% e 60%. Assim, neste exemplo as frequências relativas de carregamento w_{k_q} , referente a todas as razões de carga variável k_q analisadas, foram representadas por uma função de densidade de probabilidade Normal com média $\mu = 0,5$ e desvio padrão $\sigma = 0,12$, conforme adotado por SOUZA (2011).

A Figura 0.31 apresenta a função de densidade de probabilidade adotada para a frequência do carregamento variável, e a Tabela 0.16 apresenta a frequência relativa do carregamento variável.

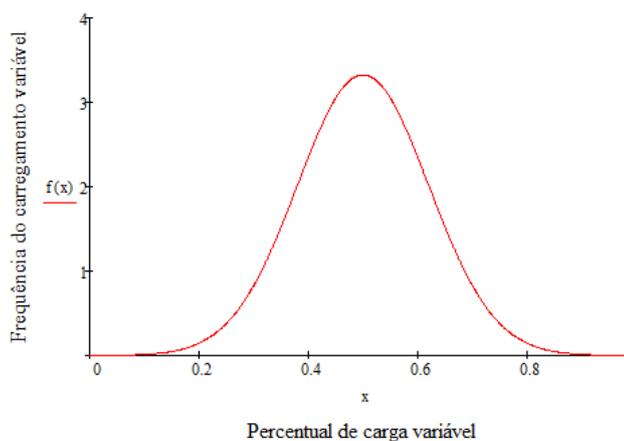


Figura 0.31 – Função de densidade de probabilidade da frequência de carregamento variável.

Analisando-se os dados da Tabela 0.16 observa-se que o somatório das frequências relativas do carregamento variável, cujo percentual k_q situa-se entre 0,2 e 0,8, e 0,4 e 0,6 são, respectivamente, iguais a 0,998 e 0,80. Os valores das frequências relativas para os carregamentos cujo percentual de carga variável são menores ou maiores, respectivamente, que 0,2 e 0,8, são desconsiderados nesta análise por apresentarem valores muito próximos de zero.

Tabela 0.16 – Frequência relativa do carregamento variável.

k_q	w_{k_q}
0,2	0,015
0,4	0,235
0,6	0,235
0,8	0,015

A calibração dos coeficientes parciais de segurança aplicados às solicitações é definida a partir de um problema de otimização. Esses coeficientes são calibrados de tal forma que os índices de confiabilidade do sistema em série apresentem-se o mais próximo possível do índice de confiabilidade de referência $\beta_r = 3,8$. O problema de otimização é expresso por:

$$\min W(\gamma_g, \gamma_q) = \sum_{i=1}^4 w_{k_{q_i}} \left(\phi \beta_{sist_{k_{q_i}}}(\gamma_{g_j}, \gamma_{q_k}) - \beta_r \right) \quad (0.30)$$

onde

$W(\gamma_g, \gamma_q)$ – superfície de erro obtida em função dos fatores parciais de segurança;

$w_{k_{q_i}}$ – fator de frequência do carregamento variável, conforme a Tabela 0.16.

O mínimo da expressão (0.30) foi obtido testando-se valores para os coeficientes parciais de segurança aplicados às solicitações. Os valores testados foram considerados pertencentes aos intervalos $1,2 \leq \gamma_g \leq 1,5$ e $1,2 \leq \gamma_q \leq 1,5$, variando-se cada valor de 0,01.

Os resultados para o mínimo da expressão (0.30), assim como os valores dos coeficientes parciais de segurança aplicados às solicitações que conduziram a esse valor mínimo, para cada razão a/d das vigas das séries V0 e VS são apresentados na Tabela 0.17.

Tabela 0.17 – Coeficientes parciais de segurança calibrados e erro mínimo.

Série	$\frac{a}{d}$	$\min W(\gamma_g, \gamma_q)$	γ_g	γ_q
V0	0,74	0,077375	1,36	1,50
V0	0,96	0,084370	1,28	1,50
V0	1,38	0,151710	1,29	1,43
V0	1,60	0,131500	1,22	1,46
VS	0,74	0,047145	1,20	1,47
VS	0,96	0,030720	1,20	1,44
VS	1,38	0,172870	1,25	1,50
VS	1,60	0,134025	1,20	1,50

Observando-se os dados da Tabela 0.17, os valores obtidos diferem dos valores utilizados no dimensionamento semi-probabilístico segundo a NBR 6118 (2014) e segundo a ACI 318 (2014). Os valores para os coeficientes parciais de segurança adotados pela ACI 318 (2014) são mais próximos dos resultados obtidos na Tabela 0.17, principalmente para as vigas

da série VS. Já, os coeficientes parciais de segurança adotados pela NBR 6118 (2014) são maiores para as cargas permanentes e menores para as cargas variáveis, quando comparados com os resultados apresentados na Tabela 0.17.

A Figura 0.32 mostra o desenvolvimento da superfície de erro, na qual observa-se a variação do erro existente entre os valores dos índices de confiabilidade do sistema obtidos em função dos vários coeficientes parciais de segurança $\phi\beta_{sist\kappa_{q_i}}(\gamma_{g_j}, \gamma_{q_k})$ e o índice de confiabilidade de referência $\beta_r = 3,8$. Desse modo ratifica-se o valor mínimo da função e os valores dos coeficientes parciais de segurança que o define.

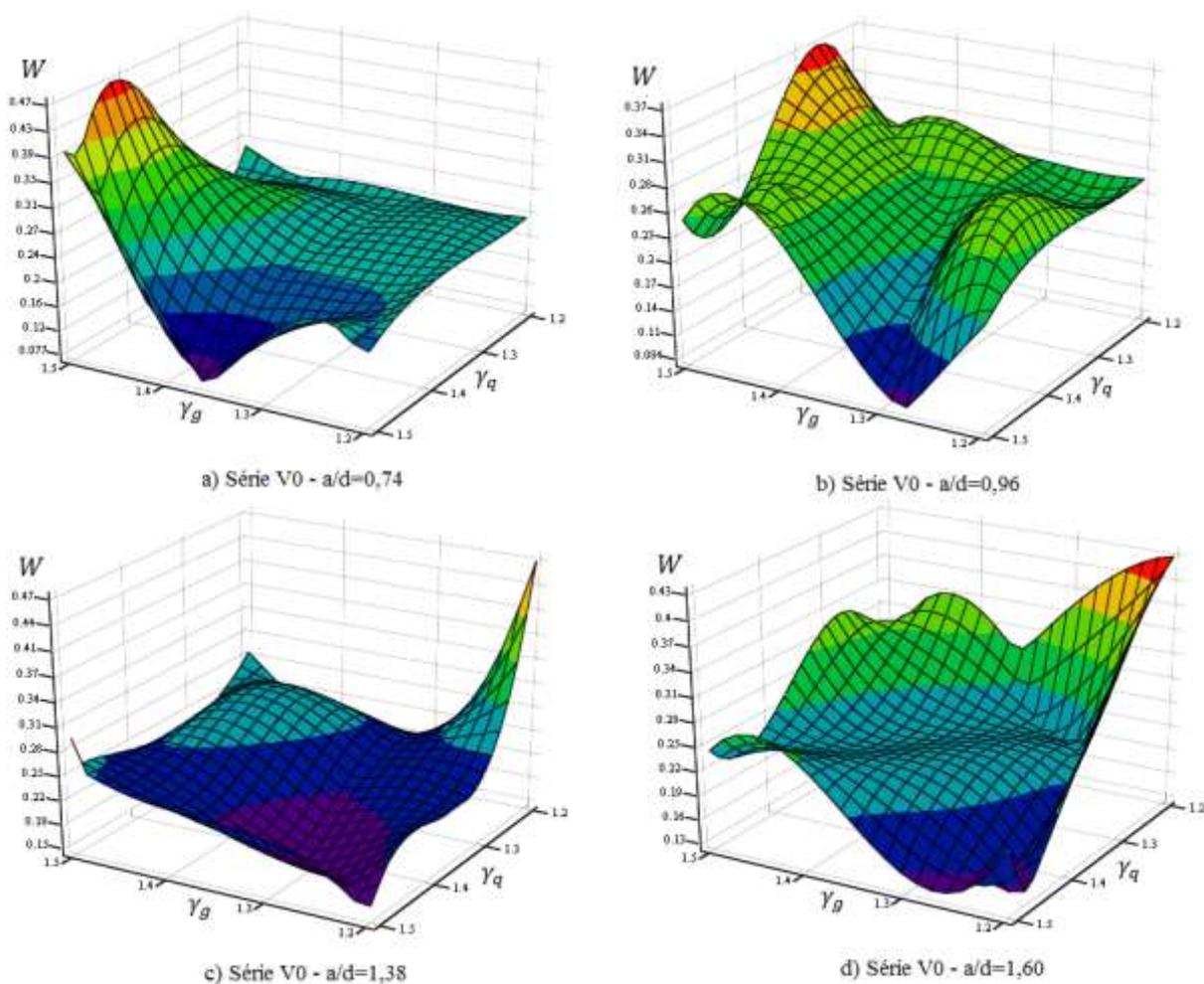


Figura 0.32 – Superfícies de erros, série – V0.

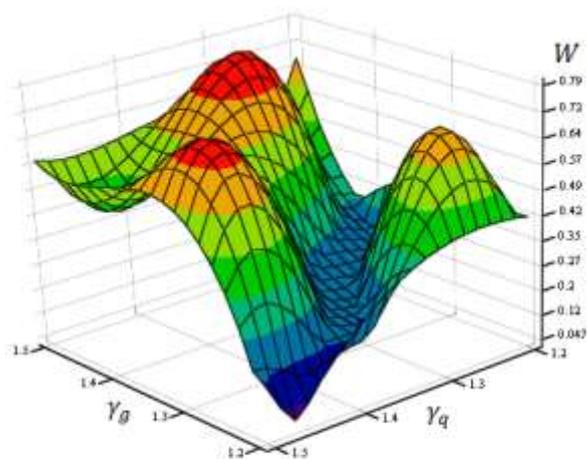
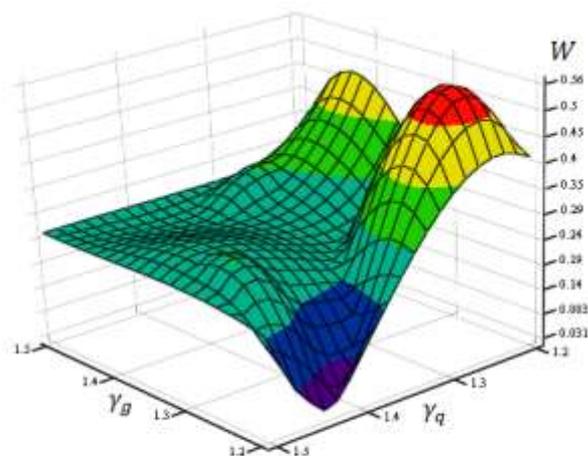
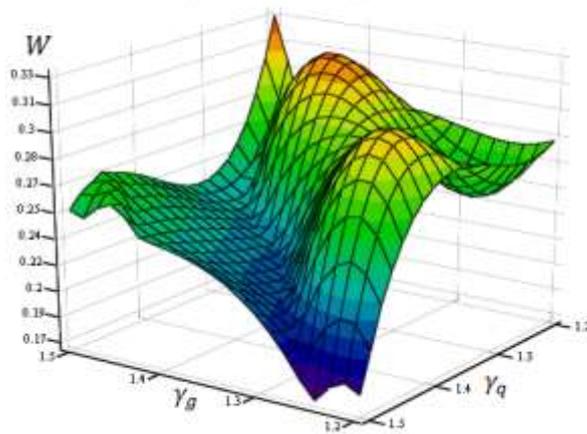
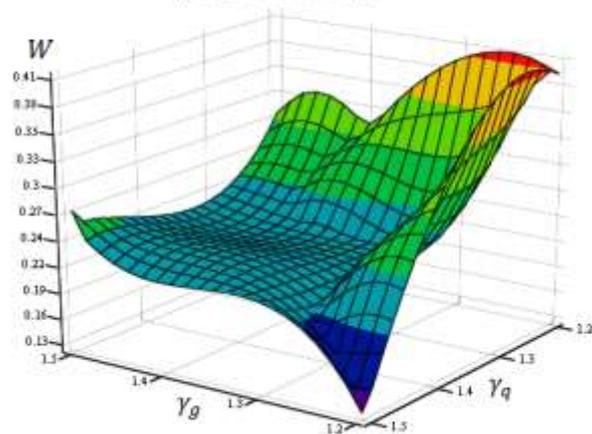
a) Série VS - $a/d=0,74$ b) Série VS - $a/d=0,96$ c) Série VS - $a/d=1,38$ d) Série VS - $a/d=1,60$

Figura 0.33 – Superfícies de erros, série – VS.

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

Em conformidade com os objetivos desse trabalho confrontou-se os resultados experimentais obtidos por BUSCH (2011) com o modelo de bielas e tirantes apresentado no item 0, sendo os resultados mostrados no item 0. A Tabela 4.1 resume os resultados encontrados.

Tabela 4.1 – Comparação entre os ensaios realizados por BUSCH (2011) e o modelo de bielas e tirantes adotado.

Item	Série V0	Série VS
Razão de tensão nas armaduras longitudinais	Sem correlação	Correlação regular
Razão de tensão nas bielas	Boa correlação	Baixa correlação
Razão de tensão nas armaduras transversais	–	Sem correlação
Razão entre as inclinações da biela do modelo teórico adotado e as inclinações das fissuras principais	Sem correlação	Boa correlação
Razão entre as inclinações das tensões principais de compressão e as inclinações das fissuras principais	Sem correlação	Baixa correlação
Razão entre as inclinações da biela do modelo teórico adotado e as entre as inclinações das tensões principais de compressão	Houve uma melhor correlação	Sem correlação

Também foram elaborados exemplos de análise de confiabilidade do modelo de bielas e tirantes, definidos no item 0, aplicados às vigas curtas de concreto armado com e sem estribos transversais, sendo os resultados apresentados no item 0. A partir desses resultados pôde-se obter conclusões relevantes inerentes à segurança das estruturas, conforme a seguir:

Exemplo I:

No exemplo I estudou-se os índices de confiabilidade inerentes a cada função de falha, o índice de confiabilidade do sistema, os fatores de importância relativa das variáveis aleatórias envolvidas e a dispersão dos valores da ação variável em relação à sua média. Esses estudos foram realizados para diferentes percentuais de carga variável e para diferentes razões a/d de vigas curtas.

Para a série de vigas V0 as funções de falha G1 e G3 associadas, respectivamente, ao escoamento da armadura longitudinal e à perda de aderência na ancoragem foram as que governaram o sistema de falha.

Para a série de vigas VS a função de falha G2, associada ao escoamento da armadura transversal governou o sistema de falha para razões a/d até 1,38. Para a razão $a/d = 1,60$ o sistema passou a ser governado pela função de falha G1, associada ao escoamento da armadura longitudinal.

Para as séries de vigas V0 e VS o índice de confiabilidade de cada função de falha e do sistema de falha decresceram à medida que se aumentou o percentual de carga variável. Os índices de confiabilidade do sistema β_{sist} apresentaram pouquíssima variação em relação à razão a/d , para um mesmo percentual de carga variável.

O índice de confiabilidade de referência β_r foi alcançado quando o percentual de carga variável estava entre 40% e 50%. Isso possibilitou concluir que o tratamento semi-probabilístico adotado pela NBR 6118 (2014) fornece índices de confiabilidade aceitáveis para estruturas solicitadas por carregamentos constituídos por percentual de carga variável entre 40% e 50% do seu valor total.

Para as vigas da série V0 e VS o fator de importância associado à carga variável apresentou nível de significância superior às demais variáveis.

Para as vigas da série V0, com exceção da função de falha G1, o fator de importância associado à resistência à compressão do concreto apresentou o segundo maior nível de significância.

No item 0 foram apresentados as condições para as quais algumas variáveis aleatórias podem ser consideradas como determinísticas, segundo o critério de nível de significância inferior a 5%.

Quando da análise do coeficiente de variação associado à carga variável observou-se que o índice de confiabilidade, em todos os casos estudados, decresceu à medida que o coeficiente de variação associado à carga variável aumentou.

Exemplo II:

No exemplo II estudou-se os índices de confiabilidade inerentes a cada função de falha, os índices de confiabilidade do sistema e os fatores de importância relativa das variáveis aleatórias envolvidas quando da introdução dos fatores de modelagem aplicados às solicitações e às resistências.

O modelo C.F.M. produziu índices de confiabilidade que apresentam uma variação mais suave quando comparado com o modelo S.F.M., em relação à variação do percentual de carga variável, para todas as razões a/d estudadas.

O modelo C.F.M. produziu valores menores para o índice de confiabilidade do sistema para percentuais de carga variável inferiores a 40% em relação ao modelo S.F.M., para todas as razões a/d estudadas.

O modelo C.F.M. produziu valores para o índice de confiabilidade do sistema próximos aos obtidos com o modelo S.F.M., para percentuais de carga variável maiores que 40%, para todas as razões a/d estudadas.

O fator de importância associado ao fator de modelagem aplicado à resistência apresentou nível de significância superior às demais variáveis, para os percentuais de carga variável inferiores a 60%.

O fator de importância associado ao fator de modelagem aplicado à resistência apresentou comportamento decrescente com em relação ao percentual de carga variável.

O fator de importância associado ao percentual de carga variável apresentou um comportamento crescente com relação ao percentual de carga variável.

Os fatores de importância associado ao percentual de carga permanente, à resistência do concreto e ao fator de modelagem aplicado às solicitações apresentaram comportamento decrescente com o percentual de carga variável.

O fator de modelagem associado à tensão de escoamento do aço das armaduras, longitudinal e transversal, podem ser considerados como variáveis determinísticas, para todos os percentuais de carga variável estudados.

No item 0 foram apresentados as condições para as quais algumas variáveis aleatórias podem ser consideradas como determinísticas, segundo o critério de nível de significância inferior a 5%.

Exemplo III:

No exemplo III estudou-se a utilização das funções densidade de probabilidade normal para as resistências do aço e do concreto.

Para todas as funções de falha e razões a/d , e para todos os percentuais de carga estudados, houve pouca variação no índice de confiabilidade das funções de falha β_i , sendo registrada a diferença máxima de $-4,55\%$ para a série V0 e $-3,74\%$ para a série VS.

Para todas as razões a/d e todos os percentuais de carga estudados houve pouca variação para o índice de confiabilidade do sistema β_{sist} , sendo registrada a diferença máxima de $-0,18\%$ para a série V0 e $-0,09\%$ para a série VS.

As maiores variações para o índice de confiabilidade, tanto para as funções de falha como para o sistema de falha, foram obtidos para percentuais de carga variável menores.

Exemplo IV:

No exemplo IV realizou-se um dimensionamento baseado em análise de confiabilidade, com o intuito de se obter um índice de confiabilidade alvo de 3,8. Calculou-se os coeficientes parciais de segurança aplicados a cada variável aleatória, que aplicados segundo um enfoque semi-probabilísticos fornecessem o mesmo índice de confiabilidade de 3,8.

Observou-se a necessidade de uma área maior de aço da armadura longitudinal à medida que a razão a/d crescia, bem como à medida que o percentual de carga variável k_q aumentava. Para as vigas da série VS o índice de confiabilidade de referência foi atingido para uma menor área de aço da armadura longitudinal em relação às vigas da série V0, sem armadura transversal. Com relação à armadura transversal observou-se o mesmo comportamento que a armadura longitudinal, entretanto, com variações mais suaves com o crescimento da razão a/d ou com o crescimento do percentual de carga variável k_q .

Para as vigas da série V0 e para a maioria das vigas da série VS, a função de falha relacionada ao escoamento da armadura longitudinal governou o sistema de falha. Para algumas vigas da série VS a função de falha relacionada ao escoamento da armadura transversal governou o sistema. Esse fato se deve ao comportamento discreto do problema em análise.

Para as vigas da série V0 e VS, em todos os casos, a resistência de projeto do concreto f_c^* se mostrou superior ao valor característico em aproximadamente 20%.

Para as vigas da série V0 e VS a resistência de projeto do aço da armadura longitudinal apresentou comportamento conforme o percentual de carga variável, assumindo valores superiores ao valor característico entre 1% e 2% para $k_q = 0,2$, 5,6% para $k_q = 0,4$, 6,9% para $k_q = 0,6$ e 7,4% para $k_q = 0,8$; em todos os casos sendo os coeficientes parciais de segurança inferiores aos valores adotados pela NBR 8681 (2003).

Para as vigas da série VS, quando a função de falha associada ao escoamento da armadura transversal governou o sistema de falha, a resistência de projeto da armadura transversal apresentou valores, em média, 4% superiores ao valor característico.

Para as vigas da série V0 e VS os valores de projeto para as ações permanentes apresentaram comportamento conforme o percentual de carga variável, assumindo valores superiores aos valores característicos em torno de 19% para $k_q = 0,2$, 7% para $k_q = 0,4$, 3% para $k_q = 0,6$ e 1% para $k_q = 0,8$.

Para as vigas da série V0 e VS, em todos os casos, os valores de projeto para as ações variáveis apresentaram valores muito superiores aos valores característicos; os coeficientes parciais de segurança obtidos foram muito superiores aos valores adotados pela NBR 8681 (2003).

Exemplo V:

No exemplo V procurou-se calibrar os coeficientes parciais de segurança aplicados às solicitações permanentes e variáveis, de modo a minimizar o erro entre o índice de confiabilidade devido ao dimensionamento semi-probabilístico e o índice de confiabilidade de referência de 3,8.

Em todos os casos estudados o comportamento “estranho” das superfícies de resposta deve-se ao fato do processo de transformação da área de aço em bitolas comerciais, o que conduziu a variações bruscas no índice de confiabilidade do sistema em alguns trechos da superfície de resposta.

Observou-se também que em todos os casos estudados o aumento do percentual de carga variável conduziu a uma diminuição generalizada do índice de confiabilidade do sistema.

Os coeficientes parciais de segurança aplicados às solicitações permanentes e variáveis foram calibrados, sendo os resultados apresentados na Tabela 0.17. Esses resultados apresentaram variações de acordo com a presença ou ausência de armaduras transversais, bem como a razão a/d .

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados ao tema com o emprego da metodologia proposta são descritos a seguir.

- Validar os resultados experimentais encontrados por BUSCH (2011) utilizando-se outros modelos teóricos, tanto estáticos como cinemáticos.
- Realizar análises de confiabilidade aplicadas a outros modelos de bielas e tirantes adotados para vigas curtas de concreto armado, com e sem armaduras transversais.

- Realizar análises de confiabilidade aplicadas a outros modelos de bielas e tirantes adotados para vigas curtas de concreto armado, com e sem armaduras transversais estudando diferentes razões a/d .
- Calibrar os coeficientes parciais de segurança aplicados às solicitações permanentes e variáveis utilizando-se uma faixa de variação de γ_g e γ_q mais ampla do que a faixa adotada neste trabalho.
- Realizar análises de confiabilidade aplicadas à modelos de bielas e tirantes adotados para vigas curtas de concreto armado, com e sem armaduras transversais, quando da presença de reforços externos com materiais compósitos.

5 REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. “*ACI 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete*”. 2014.
- ASHOUR, A. F.; MORLEY, C. T. “*Effectiveness Factor of Concrete in Continuous Deep Beams*”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 122, 2, pp 169-178, 1996.
- ASHOUR, A. F. “*Upper Bound Analysis for Reinforced Concrete Deep Beams with Fixed End Supports*”, *ACI Structural Journal*, 96, 2, pp 167-173, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ações e segurança nas estruturas – Procedimento: NBR 8681. Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Preparo, controle e recebimento: NBR 12655. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos: NBR 6118. Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- BECK, A. T. “*Apostila de Confiabilidade Estrutural*”. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2016.
- BUSCH, D. VACA-DÍEZ. “*Estudo Teórico e Experimental do Reforço à Força Cortante com Compósitos de Fibras de Carbono em Vigas Curtas de Concreto Armado*”. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2011.
- DILEEP KUMAR, P. “*Shear strength of R.C.C beams without web Reinforcement*”, 2008. From Edutalks: <http://www.edutalks.org/technical%20articles/dILEEP%20KUMAR.pdf> – visitado em 28/10/2011.
- EL-ARISS, B. “*Shear mechanism in cracked concrete*”. *International Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2 (3), 24-31, 2006.
- ELLINGWOOD, B. R.; GALAMBOS, T. V.; MACGREGOR, J. C.; CORNELL, C. A. “*Development of a Probability Based Load Criteria for American National Standard A58, NBS Special Publication No. 577*”. National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Washington, DC, 1980.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). “*Eurocode: Basis of Structural Design – EN 1990*”, Brussels, 2002.
- FOSTER, S. J.; MALIK, A. R. “*Evaluation of Efficiency Factor Models used in Strut-and-Tie Modeling of Nonflexural Members*”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 128, 5, pp 569-577, 2002.
- FUSCO, P. B. “*Estruturas de concreto armado: Solicitações normais*”. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1981.
- JENNEWEIN, M.; SCHÄFER, K. “*Standardisierte Nachweise von häufigen D – Bereichen*“. *DafStb*, Hef 430. Berlin, 1992.

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

KANI, G. N. J. “*The Riddle of Shear Failure and Its Solutions*”. ACI Journal , 61 (4), 441-467, 1964.

KANI, G. N. J. “*Basic Facts Concerning Shear Failure*”. Journal of the American Concrete Institute, p.675 - 692, 1966.

KIM, J.; PARK, Y. “*Prediction of shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement*”. ACI Materials Journal , 93 (3), 213-222, 1996.

KONG, F. K., EVANS, R. H. “*Reinforced and Prestressed Concrete*”. University Press, Cambridge, 1998.

LEONHARDT, F.; WALTER, R. “*Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung*”. DAfStb, Heft 1551, 1962.

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

MacGREGOR, J. G. “*Reinforced Concrete – Mechanics and Design*”. Prentice Hall, 1988.

MELCHERS, J. M. “*Structural Reliability Analysis and Prediction*”. New York, John Wiley & Sons, 2002.

NIELSEN M. P. “*Limit Analysis and Concrete Plasticity*”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 420pp, 1984.

NIELSEN, M. P.; BRÆSTRUP, M. W. “*Shear Strength of Prestressed Concrete Beams without Web Reinforcement*”, Magazine of Concrete Research, 30, 104, pp 119-128, 1978.

NIELSEN, M. P.; HOANG. “*Recent Developments in Plasticity Approach to Shear*”; Engenharia Estudo e Pesquisa, v. 2, n.2 , p. 9-39 , Juiz de Fora, 1999.

NOWAK, A. S.; COLLINS, K. R. “*Reliability of Structures*”. McGraw Hill Higher Education, 2000.

OESTERLE, R. G., ARISTIZABAL-OCHOA, J. D., SHIU, K. N.; CORLEY, W. G. “*Web Crushing of Reinforced Concrete Structural Walls*”, ACI Structural Journal, 81, 3, pp 231-241, 1984.

ROGOWSKY, D. M.; MACGREGOR, J. G. “*Design of Reinforced Concrete Deep Beams*”, Concrete International: Design and Construction, 8, 8, pp 49-58, 1986.

RUSSO, G., ZINGONE, G., PULERI, G. “*Flexure-Shear Interaction Model for Longitudinally Reinforced Beams*”. ACI Structural Journal , 88 (1), 60-68, 1991.

SAGRILO, L. V. “*Apostila de Confiabilidade Estrutural*”. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SÁNCHEZ, E. “Uma Reavaliação do Conceito de Fator de Efetividade do Concreto e as Mais Recentes Prescrições das Normas Internacionais”. IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto – 44º Congresso Brasileiro, 2002.

SCHLAICH, J.; SCHÄFER, K. “Design and Detailing of Structural Concrete Using Strut-and-Tie Models”, The Structural Engineer, 69, 6, pp. 113-125, 1991.

SCHLAICH, J., SCHÄFER, K.; JENNEWEIN, M. “Toward a Consistent Design of Structural Concrete”, Journal of the Prestressed Concrete Institute, 32, 3, pp. 74-150, 1987.

SHERWOOD, E., BENTZ, E., COLLINS, M. “Effect of aggregate size on beam-shear strength of thick slabs”. ACI Structural Journal , 104 (2), 180-190, 2007.

SOUZA, O. L. C. “Aplicação da Teoria da Confiabilidade às Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Torção com Compósito de Fibras de Carbono”. Tese de Doutorado (Universidade Federal Fluminense). Niterói, 2011.

TAERWE, L., “Behavior of RC Beams Strengthened in Shear by External CFRP Sheets”. In: Proceedings of the Third International Symposium of Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, v. 2, p. 559-566, Japan, october, 1997.

TJHIN, T. N.; KUCHMA, D. A. “Computer-Based Tools for Design by Strut-and-Tie Method: Advances and Challenges”. ACI Structural Journal, V.99, No. 5, 2002.

VAZ, L. E. “Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas”. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Elsevier, 2010.

VECCHIO F. J.; COLLINS M. P. “Compression Response of Cracked Reinforced Concrete”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 119, 12, pp 3590-3610, 1993.

ZIARA, M. M. “The influence of confining the compression zone in the design of structural concrete beams”. Heriot-Watt University, 1993.

ANEXOS

ANEXO – A

Dados de entrada utilizados para a resolução do exemplo I.

$a_1 = 10$	cm	Comprimento do apoio.	$H_2 = 12.13$	Hipotenusa considerada para o nó do apoio, série VS.																									
$a_2 = 10$	cm	Comprimento do console de aplicação da carga.	$H_1 = 11.46$	Hipotenusa considerada para o nó do apoio, série V0.																									
$b = 20$	cm	Largura da viga	<table border="1"> <tr> <th>"a/d"</th> <th>n_e</th> <th>$A_{s,w}$</th> <th>a</th> <th>a_L</th> </tr> <tr> <td>0.74</td> <td>3</td> <td>1.87</td> <td>35</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>0.96</td> <td>4</td> <td>2.494</td> <td>45</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>1.38</td> <td>6</td> <td>3.741</td> <td>65</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>1.6</td> <td>7</td> <td>4.364</td> <td>75</td> <td>65</td> </tr> </table>		"a/d"	n_e	$A_{s,w}$	a	a_L	0.74	3	1.87	35	25	0.96	4	2.494	45	35	1.38	6	3.741	65	55	1.6	7	4.364	75	65
"a/d"	n_e	$A_{s,w}$	a	a_L																									
0.74	3	1.87	35	25																									
0.96	4	2.494	45	35																									
1.38	6	3.741	65	55																									
1.6	7	4.364	75	65																									
$h = 30$	cm	Altura da viga	n_e	Número de estribos ao longo do comprimento a_L para cada razão a/d.																									
$\xi_s = 2$	cm	Cobrimento.	$A_{s,w}$	Área da armadura transversal compreendida no comprimento a_L .																									
$n = 4$		Quantidade de barras da armadura longitudinal.	a	Distância entre o centro do apoio ao centro da placa de aplicação da carga, para as vigas da série V0 e VS.																									
$\phi_w = 0.63$	cm	Diâmetro dos estribos das vigas da série VS.	a_L	Distância entre a face interna do apoio e a face da placa de aplicação da carga, para as vigas da série V0 e VS.																									
$\phi_l = 1.6$	cm	Diâmetro da armadura longitudinal.	Os parâmetros listados abaixo variam de acordo com as variáveis aleatórias:																										
$\eta_1 = 1$		Coefficiente relacionado à ancoragem função do tipo e barra (lisa, nervurada ou entalhada).	i	cm	Altura da linha neutra.																								
$\eta_2 = 2.25$		Coefficiente relacionado à ancoragem função da posição da barra (região de boa ou má aderência).	d	cm	Altura útil.																								
$\eta_3 = 1$		Coefficiente relacionado à ancoragem função do diâmetro da barra.	z	cm	Braco de alavanca.																								
$I_a = 22$	cm	Comprimento de ancoragem medido da face interna do apoio até o fim do gancho 90°.	θ	°	Inclinação da biela.																								
$\alpha_b = 0.7$		Coefficiente aplicável ao coeficiente de ancoragem para considerar o efeito favorável da presença do gancho.	H_0	cm	Hipotenusa considerada para o nó abaixo da placa de aplicação de carga.																								
$A_{s,l} = 0.042$	cm²	Área da armadura longitudinal par as vigas das séries V0 e VS.																											

Os Quadros A.1 à A.8 resumem todas as informações encontradas quando da realização dos objetivos a, b, c e d, definidos no exemplo I. Os resultados apresentados em vermelho foram obtidos com o programa ComRel.

Série	a/d	G_i	k_g	k_q	β_i	$p_{f,i}$	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	β_{sist}	$p_{f,sist}$	$\beta_{sist,MC}$	$p_{f,sist,MC}$	$\Delta\beta_{sist,F-MC}(\%)$	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5				
V0	0.74	G1	0.8	0.2	5.48	2.094E-08	-3.591E-01	-8.538E-01	5.232E-02	3.732E-01	0.000E+00	5.16	1.206E-07	5.07	2.000E-07	1.85%	13%	73%	0%	14%	0%				
V0	0.74	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.8	0.2	5.20	1.017E-07	-3.715E-01	-7.227E-01	5.816E-01	-3.768E-02	0.000E+00						14%	52%	34%	0%	0%				
V0	0.74	G4	0.8	0.2	6.06	6.655E-10	-3.203E-01	-6.562E-01	6.832E-01	-7.099E-03	0.000E+00						10%	43%	47%	0%	0%				
V0	0.74	G5	0.8	0.2	8.37	2.848E-17	-2.393E-01	-7.471E-01	6.199E-01	1.712E-02	0.000E+00						6%	56%	38%	0%	0%				
V0	0.74	G1	0.6	0.4	4.02	2.853E-05	-1.801E-01	-9.474E-01	3.835E-02	2.617E-01	0.000E+00	3.90	4.865E-05	3.88	5.290E-05	0.52%	3%	90%	0%	7%	0%				
V0	0.74	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.6	0.4	4.02	2.929E-05	-1.792E-01	-8.937E-01	4.106E-01	-2.293E-02	0.000E+00						3%	80%	17%	0%	0%				
V0	0.74	G4	0.6	0.4	4.86	5.895E-07	-1.503E-01	-8.453E-01	5.126E-01	-4.792E-03	0.000E+00						2%	71%	26%	0%	0%				
V0	0.74	G5	0.6	0.4	6.57	2.545E-11	-1.138E-01	-8.647E-01	4.891E-01	1.023E-02	0.000E+00						1%	75%	24%	0%	0%				
V0	0.74	G1	0.4	0.6	3.25	5.846E-04	-9.693E-02	-9.713E-01	3.199E-02	2.149E-01	0.000E+00	3.16	7.902E-04	3.15	8.249E-04	0.40%	1%	94%	0%	5%	0%				
V0	0.74	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.4	0.6	3.30	4.829E-04	-9.505E-02	-9.359E-01	3.388E-01	-1.786E-02	0.000E+00						1%	88%	11%	0%	0%				
V0	0.74	G4	0.4	0.6	4.08	2.257E-05	-7.862E-02	-8.969E-01	4.351E-01	-3.860E-03	0.000E+00						1%	80%	19%	0%	0%				
V0	0.74	G5	0.4	0.6	5.52	1.660E-08	-5.969E-02	-9.039E-01	4.235E-01	7.871E-03	0.000E+00						0%	82%	18%	0%	0%				
V0	0.74	G1	0.2	0.8	2.75	2.976E-03	-4.181E-02	-9.811E-01	2.806E-02	1.870E-01	0.000E+00	2.69	3.583E-03	2.67	3.805E-03	0.75%	0%	96%	0%	3%	0%				
V0	0.74	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.2	0.8	2.82	2.368E-03	-4.071E-02	-9.542E-01	2.959E-01	-1.513E-02	0.000E+00						0%	91%	9%	0%	0%				
V0	0.74	G4	0.2	0.8	3.55	1.941E-04	-3.343E-02	-9.216E-01	3.867E-01	-3.327E-03	0.000E+00						0%	85%	15%	0%	0%				
V0	0.74	G5	0.2	0.8	4.83	6.864E-07	-2.539E-02	-9.243E-01	3.807E-01	6.617E-03	0.000E+00						0%	85%	14%	0%	0%				

Quadro A.1 – Resultados exemplo I, série V0 – a/d = 0,74.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	β _{sist,MC}	p _{f,sist,MC}	Δβ _{sist,F-MC} (%)	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅					
VO	0.96	G1	0.8	0.2	5.48	2.114E-08	-3.592E-01	-8.538E-01	5.233E-02	3.732E-01	0.000E+00	5.16	1.217E-07	---	---	---	13%	73%	0%	14%	0%					
VO	0.96	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
VO	0.96	G3	0.8	0.2	5.19	1.025E-07	-3.716E-01	-7.226E-01	5.816E-01	-3.768E-02	0.000E+00						14%	52%	34%	0%	0%					
VO	0.96	G4	0.8	0.2	7.49	3.481E-14	-2.654E-01	-7.165E-01	6.451E-01	2.766E-03	0.000E+00						7%	51%	42%	0%	0%					
VO	0.96	G5	0.8	0.2	10.61	1.340E-26	-1.926E-01	-7.658E-01	6.130E-01	2.702E-02	0.000E+00						4%	59%	38%	0%	0%					
VO	0.96	G1	0.6	0.4	4.02	2.867E-05	-1.802E-01	-9.474E-01	3.836E-02	2.617E-01	0.000E+00	3.89	4.929E-05	3.89	5.110E-05	0.23%	3%	90%	0%	7%	0%					
VO	0.96	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	
VO	0.96	G3	0.6	0.4	4.02	2.943E-05	-1.792E-01	-8.937E-01	4.106E-01	-2.293E-02	0.000E+00						3%	80%	17%	0%	0%					
VO	0.96	G4	0.6	0.4	5.92	1.596E-09	-1.254E-01	-8.570E-01	4.998E-01	1.150E-03	0.000E+00						2%	73%	25%	0%	0%					
VO	0.96	G5	0.6	0.4	8.32	4.271E-17	-9.078E-02	-8.611E-01	5.000E-01	1.581E-02	0.000E+00						1%	74%	25%	0%	0%					
VO	0.96	G1	0.4	0.6	3.25	5.866E-04	-9.696E-02	-9.713E-01	3.199E-02	2.149E-01	0.000E+00	3.15	8.126E-04	3.15	8.273E-04	0.17%	1%	94%	0%	5%	0%					
VO	0.96	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	
VO	0.96	G3	0.4	0.6	3.30	4.845E-04	-9.508E-02	-9.359E-01	3.389E-01	-1.786E-02	0.000E+00						1%	88%	11%	0%	0%					
VO	0.96	G4	0.4	0.6	4.98	3.189E-07	-6.568E-02	-9.006E-01	4.297E-01	7.350E-04	0.000E+00						0%	81%	18%	0%	0%					
VO	0.96	G5	0.4	0.6	7.04	9.460E-13	-4.743E-02	-8.963E-01	4.408E-01	1.205E-02	0.000E+00						0%	80%	19%	0%	0%					
VO	0.96	G1	0.2	0.8	2.75	2.983E-03	-4.182E-02	-9.811E-01	2.806E-02	1.870E-01	0.000E+00	2.67	3.770E-03	2.67	3.830E-03	0.20%	0%	96%	0%	3%	0%					
VO	0.96	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	
VO	0.96	G3	0.2	0.8	2.82	2.375E-03	-4.072E-02	-9.542E-01	2.959E-01	-1.513E-02	0.000E+00						0%	91%	9%	0%	0%					
VO	0.96	G4	0.2	0.8	4.35	6.890E-06	-2.793E-02	-9.226E-01	3.847E-01	5.504E-04	0.000E+00						0%	85%	15%	0%	0%					
VO	0.96	G5	0.2	0.8	6.19	2.926E-10	-2.011E-02	-9.160E-01	4.005E-01	1.007E-02	0.000E+00						0%	84%	16%	0%	0%					

Quadro A.2 – Resultados exemplo I, série VO – a/d = 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	β _{sist,MC}	p _{f,sist,MC}	Δβ _{sist,F-MC} (%)	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅					
VO	1.38	G1	0.8	0.2	5.48	2.108E-08	-3.592E-01	-8.538E-01	5.233E-02	3.732E-01	0.000E+00	5.16	1.214E-07	5.03	2.500E-07	2.65%	13%	73%	0%	14%	0%					
VO	1.38	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
VO	1.38	G3	0.8	0.2	5.20	1.023E-07	-3.716E-01	-7.227E-01	5.816E-01	-3.768E-02	0.000E+00						14%	52%	34%	0%	0%					
VO	1.38	G4	0.8	0.2	10.24	6.463E-25	-1.978E-01	-7.623E-01	6.159E-01	2.049E-02	0.000E+00						4%	58%	38%	0%	0%					
VO	1.38	G5	0.8	0.2	14.42	2.190E-47	-1.449E-01	-7.700E-01	6.192E-01	5.202E-02	0.000E+00						2%	59%	38%	0%	0%					
VO	1.38	G1	0.6	0.4	4.02	2.863E-05	-1.801E-01	-9.474E-01	3.836E-02	2.617E-01	0.000E+00	3.89	4.922E-05	3.89	5.100E-05	0.22%	3%	90%	0%	7%	0%					
VO	1.38	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	
VO	1.38	G3	0.6	0.4	4.02	2.939E-05	-1.792E-01	-8.937E-01	4.106E-01	-2.293E-02	0.000E+00						3%	80%	17%	0%	0%					
VO	1.38	G4	0.6	0.4	8.05	4.286E-16	-9.376E-02	-8.596E-01	5.022E-01	1.171E-02	0.000E+00						1%	74%	25%	0%	0%					
VO	1.38	G5	0.6	0.4	11.39	2.400E-30	-6.802E-02	-8.412E-01	5.357E-01	2.981E-02	0.000E+00						0%	71%	29%	0%	0%					
VO	1.38	G1	0.4	0.6	3.25	5.860E-04	-9.695E-02	-9.713E-01	3.199E-02	2.149E-01	0.000E+00	3.15	8.121E-04	3.15	8.271E-04	0.17%	1%	94%	0%	5%	0%					
VO	1.38	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	
VO	1.38	G3	0.4	0.6	3.30	4.840E-04	-9.507E-02	-9.359E-01	3.389E-01	-1.786E-02	0.000E+00						1%	88%	11%	0%	0%					
VO	1.38	G4	0.4	0.6	6.81	5.016E-12	-4.900E-02	-8.959E-01	4.414E-01	8.823E-03	0.000E+00						0%	80%	19%	0%	0%					
VO	1.38	G5	0.4	0.6	9.74	1.060E-22	-3.509E-02	-8.740E-01	4.842E-01	2.223E-02	0.000E+00						0%	76%	23%	0%	0%					
VO	1.38	G1	0.2	0.8	2.75	2.981E-03	-4.182E-02	-9.811E-01	2.806E-02	1.870E-01	0.000E+00	2.67	3.774E-03	2.67	3.811E-03	0.12%	0%	96%	0%	3%	0%					
VO	1.38	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	
VO	1.38	G3	0.2	0.8	2.82	2.373E-03	-4.071E-02	-9.542E-01	2.959E-01	-1.513E-02	0.000E+00						0%	91%	9%	0%	0%					
VO	1.38	G4	0.2	0.8	5.98	1.089E-09	-2.078E-02	-9.160E-01	4.005E-01	7.325E-03	0.000E+00						0%	84%	16%	0%	0%					
VO	1.38	G5	0.2	0.8	8.64	2.755E-18	-1.457E-02	-8.960E-01	4.435E-01	1.807E-02	0.000E+00						0%	80%	20%	0%	0%					

Quadro A.3 – Resultados exemplo I, série VO – a/d = 1,38.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	β _{sist,MC}	p _{f,sist,MC}	Δβ _{sist,F-MC} (%)	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅					
VO	1.6	G1	0.8	0.2	5.48	2.121E-08	-3.593E-01	-8.537E-01	5.233E-02	3.732E-01	0.000E+00	5.16	1.221E-07	5.07	2.000E-07	1.80%	13%	73%	0%	14%	0%					
VO	1.6	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
VO	1.6	G3	0.8	0.2	5.19	1.029E-07	-3.717E-01	-7.226E-01	5.816E-01	-3.768E-02	0.000E+00						14%	52%	34%	0%	0%					
VO	1.6	G4	0.8	0.2	11.54	4.340E-31	-1.781E-01	-7.665E-01	6.163E-01	2.944E-02	0.000E+00						3%	59%	38%	0%	0%					
VO	1.6	G5	0.8	0.2	16.10	1.300E-58	-1.308E-01	-7.681E-01	6.233E-01	6.679E-02	0.000E+00						2%	59%	39%	0%	0%					
VO	1.6	G1	0.6	0.4	4.02	2.873E-05	-1.802E-01	-9.474E-01	3.836E-02	2.618E-01	0.000E+00	3.89	4.938E-05	3.88	5.320E-05	0.47%	3%	90%	0%	7%	0%					
VO	1.6	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	
VO	1.6	G3	0.6	0.4	4.02	2.949E-05	-1.793E-01	-8.937E-01	4.107E-01	-2.293E-02	0.000E+00						3%	80%	17%	0%	0%					
VO	1.6	G4	0.6	0.4	9.07	5.929E-20	-8.243E-02	-8.591E-01	5.049E-01	1.650E-02	0.000E+00						1%	74%	25%	0%	0%					
VO	1.6	G5	0.6	0.4	12.77	1.210E-37	-6.111E-02	-8.317E-01	5.506E-01	3.789E-02	0.000E+00						0%	69%	30%	0%	0%					
VO	1.6	G1	0.4	0.6	3.24	5.874E-04	-9.696E-02	-9.713E-01	3.199E-02	2.149E-01	0.000E+00	3.15	8.139E-04	3.15	8.289E-04	0.17%	1%	94%	0%	5%	0%					
VO	1.6	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	
VO	1.6	G3	0.4	0.6	3.30	4.851E-04	-9.509E-02	-9.358E-01	3.389E-01	-1.786E-02	0.000E+00						1%	88%	11%	0%	0%					
VO	1.6	G4	0.4	0.6	7.70	6.847E-15	-4.353E-02	-8.907E-01	4.524E-01	1.261E-02	0.000E+00						0%	79%	20%	0%	0%					
VO	1.6	G5	0.4	0.6	10.97	2.850E-28	-3.138E-02	-8.631E-01	5.032E-01	2.801E-02	0.000E+00						0%	74%	25%	0%	0%					
VO	1.6	G1	0.2	0.8	2.75	2.986E-03	-4.182E-02	-9.811E-01	2.806E-02	1.871E-01	0.000E+00	2.67	3.780E-03	2.67	3.842E-03	0.20%	0%	96%	0%	3%	0%					
VO	1.6	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---						---	---	---	---	---	---	---	---	---	
VO	1.6	G3	0.2	0.8	2.82	2.377E-03	-4.072E-02	-9.542E-01	2.959E-01	-1.513E-02	0.000E+00						0%	91%	9%	0%	0%					
VO	1.6	G4	0.2	0.8	6.79	5.593E-12	-1.843E-02	-9.105E-01	4.129E-01	1.046E-02	0.000E+00						0%	83%	17%	0%	0%					
VO	1.6	G5	0.2	0.8	9.77	7.760E-23	-1.313E-02	-8.833E-01	4.681E-01	2.290E-02	0.000E+00						0%	78%	22%	0%	0%					

Quadro A.4 – Resultados exemplo I, série VO – a/d = 1,60.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	β _{sist,MC}	p _{f,sist,MC}	Δβ _{sist,F-MC} (%)	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	
VS	0.74	G1	0.8	0.2	17.95	2.650E-72	-1.200E-01	-8.753E-01	4.880E-02	4.660E-01	0.000E+00						1%	77%	0%	22%	0%	
VS	0.74	G2	0.8	0.2	5.25	7.569E-08	-3.740E-01	-8.605E-01	0.000E+00	0.000E+00	3.460E-01						14%	74%	0%	0%	12%	
VS	0.74	G3	0.8	0.2	12.24	1.040E-34	-1.689E-01	-7.830E-01	5.954E-01	-6.231E-02	0.000E+00		5.25	7.569E-08	5.07	2.000E-07	3.46%	3%	61%	35%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.8	0.2	10.83	1.350E-27	-1.886E-01	-7.337E-01	6.527E-01	-6.832E-03	0.000E+00						4%	54%	43%	0%	0%	
VS	0.74	G5	0.8	0.2	13.71	4.550E-43	-1.516E-01	-7.578E-01	6.339E-01	3.085E-02	0.000E+00						2%	57%	40%	0%	0%	
VS	0.74	G1	0.6	0.4	13.39	3.610E-41	-5.903E-02	-9.291E-01	4.527E-02	3.623E-01	0.000E+00						0%	86%	0%	13%	0%	
VS	0.74	G2	0.6	0.4	3.84	6.232E-05	-1.880E-01	-9.520E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.415E-01						4%	91%	0%	0%	6%	
VS	0.74	G3	0.6	0.4	9.48	1.250E-21	-8.098E-02	-8.831E-01	4.608E-01	-3.502E-02	0.000E+00		3.84	6.232E-05	3.83	6.355E-05	0.13%	1%	78%	21%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.6	0.4	8.61	3.553E-18	-8.778E-02	-8.415E-01	5.331E-01	-5.305E-03	0.000E+00						1%	71%	28%	0%	0%	
VS	0.74	G5	0.6	0.4	10.88	7.520E-28	-7.098E-02	-8.371E-01	5.422E-01	1.718E-02	0.000E+00						1%	70%	29%	0%	0%	
VS	0.74	G1	0.4	0.6	11.12	5.160E-29	-3.118E-02	-9.501E-01	4.114E-02	3.076E-01	0.000E+00						0%	90%	0%	9%	0%	
VS	0.74	G2	0.4	0.6	3.08	1.019E-03	-1.013E-01	-9.750E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.979E-01						1%	95%	0%	0%	4%	
VS	0.74	G3	0.4	0.6	7.97	8.190E-16	-4.249E-02	-9.178E-01	3.939E-01	-2.618E-02	0.000E+00		3.08	1.019E-03	3.08	1.028E-03	0.09%	0%	84%	16%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.4	0.6	7.34	1.098E-13	-4.558E-02	-8.812E-01	4.706E-01	-4.419E-03	0.000E+00						0%	78%	22%	0%	0%	
VS	0.74	G5	0.4	0.6	9.31	6.760E-21	-3.661E-02	-8.721E-01	4.878E-01	1.270E-02	0.000E+00						0%	76%	24%	0%	0%	
VS	0.74	G1	0.2	0.8	9.69	1.650E-22	-1.330E-02	-9.614E-01	3.776E-02	2.724E-01	0.000E+00						0%	92%	0%	7%	0%	
VS	0.74	G2	0.2	0.8	2.61	4.571E-03	-4.368E-02	-9.841E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.720E-01						0%	97%	0%	0%	3%	
VS	0.74	G3	0.2	0.8	6.98	1.500E-12	-1.807E-02	-9.360E-01	3.510E-01	-2.165E-02	0.000E+00		2.61	4.571E-03	2.61	4.578E-03	0.02%	0%	88%	12%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.2	0.8	6.48	4.571E-11	-1.926E-02	-9.034E-01	4.284E-01	-3.860E-03	0.000E+00						0%	82%	18%	0%	0%	
VS	0.74	G5	0.2	0.8	8.26	7.346E-17	-1.525E-02	-8.945E-01	4.466E-01	1.032E-02	0.000E+00						0%	80%	20%	0%	0%	

Quadro A.5 – Resultados exemplo I, série VS – a/d = 0,74.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	β _{sist,MC}	p _{f,sist,MC}	Δβ _{sist,F-MC} (%)	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	
VS	0.96	G1	0.8	0.2	13.17	6.900E-40	-1.594E-01	-8.995E-01	4.931E-02	4.037E-01	0.000E+00						3%	81%	0%	16%	0%	
VS	0.96	G2	0.8	0.2	5.25	7.477E-08	-3.739E-01	-8.606E-01	0.000E+00	0.000E+00	3.459E-01						14%	74%	0%	0%	12%	
VS	0.96	G3	0.8	0.2	10.31	3.360E-25	-1.985E-01	-7.975E-01	5.675E-01	-5.070E-02	0.000E+00		5.25	7.477E-08	5.33	5.000E-08	-1.40%	4%	64%	32%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.8	0.2	10.12	2.268E-24	-1.988E-01	-7.484E-01	6.327E-01	5.208E-03	0.000E+00						4%	56%	40%	0%	0%	
VS	0.96	G5	0.8	0.2	13.78	1.720E-43	-1.509E-01	-7.642E-01	6.259E-01	3.922E-02	0.000E+00						2%	58%	39%	0%	0%	
VS	0.96	G1	0.6	0.4	9.68	1.940E-22	-7.984E-02	-9.489E-01	4.140E-02	3.025E-01	0.000E+00						1%	90%	0%	9%	0%	
VS	0.96	G2	0.6	0.4	3.84	6.192E-05	-1.880E-01	-9.520E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.415E-01						4%	91%	0%	0%	6%	
VS	0.96	G3	0.6	0.4	7.91	1.300E-15	-9.611E-02	-8.968E-01	4.309E-01	-2.950E-02	0.000E+00		3.84	6.192E-05	3.84	6.230E-05	0.04%	1%	80%	19%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.6	0.4	8.00	6.356E-16	-9.427E-02	-8.521E-01	5.148E-01	2.222E-03	0.000E+00						1%	73%	27%	0%	0%	
VS	0.96	G5	0.6	0.4	10.91	5.600E-28	-7.084E-02	-8.406E-01	5.365E-01	2.218E-02	0.000E+00						1%	71%	29%	0%	0%	
VS	0.96	G1	0.4	0.6	7.96	8.796E-16	-4.216E-02	-9.665E-01	3.578E-02	2.506E-01	0.000E+00						0%	93%	0%	6%	0%	
VS	0.96	G2	0.4	0.6	3.09	1.014E-03	-1.012E-01	-9.750E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.979E-01						1%	95%	0%	0%	4%	
VS	0.96	G3	0.4	0.6	6.60	2.080E-11	-5.075E-02	-9.293E-01	3.652E-01	-2.243E-02	0.000E+00		3.09	1.014E-03	3.08	1.022E-03	0.07%	0%	86%	13%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.4	0.6	6.78	5.998E-12	-4.916E-02	-8.906E-01	4.522E-01	1.435E-03	0.000E+00						0%	79%	20%	0%	0%	
VS	0.96	G5	0.4	0.6	9.32	5.970E-21	-3.656E-02	-8.747E-01	4.829E-01	1.649E-02	0.000E+00						0%	77%	23%	0%	0%	
VS	0.96	G1	0.2	0.8	6.89	2.844E-12	-1.823E-02	-9.744E-01	3.232E-02	2.217E-01	0.000E+00						0%	95%	0%	5%	0%	
VS	0.96	G2	0.2	0.8	2.61	4.556E-03	-4.366E-02	-9.841E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.720E-01						0%	97%	0%	0%	3%	
VS	0.96	G3	0.2	0.8	5.75	4.512E-09	-2.162E-02	-9.459E-01	3.231E-01	-1.869E-02	0.000E+00		2.61	4.556E-03	2.61	4.569E-03	0.04%	0%	89%	10%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.2	0.8	5.97	1.196E-09	-2.083E-02	-9.118E-01	4.101E-01	1.081E-03	0.000E+00						0%	83%	17%	0%	0%	
VS	0.96	G5	0.2	0.8	8.27	6.945E-17	-1.525E-02	-8.967E-01	4.421E-01	1.344E-02	0.000E+00						0%	80%	20%	0%	0%	

Quadro A.6 – Resultados exemplo I, série VS – a/d = 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	β _{sist,MC}	p _{f,sist,MC}	Δβ _{sist,F-MC} (%)	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	
VS	1.38	G1	0.8	0.2	7.21	2.818E-13	-2.782E-01	-8.902E-01	4.968E-02	3.572E-01	0.000E+00						8%	79%	0%	13%	0%	
VS	1.38	G2	0.8	0.2	5.25	7.604E-08	-3.741E-01	-8.605E-01	0.000E+00	0.000E+00	3.460E-01						14%	74%	0%	0%	12%	
VS	1.38	G3	0.8	0.2	6.98	1.509E-12	-2.851E-01	-7.825E-01	5.521E-01	-3.967E-02	0.000E+00		5.25	7.604E-08	5.20	1.000E-07	0.97%	8%	61%	30%	0%	0%
VS	1.38	G4	0.8	0.2	9.31	6.434E-21	-2.163E-01	-7.581E-01	6.149E-01	1.949E-02	0.000E+00						5%	57%	38%	0%	0%	
VS	1.38	G5	0.8	0.2	13.81	1.230E-43	-1.508E-01	-7.723E-01	6.151E-01	4.975E-02	0.000E+00						2%	60%	38%	0%	0%	
VS	1.38	G1	0.6	0.4	5.25	7.428E-08	-1.412E-01	-9.554E-01	3.769E-02	2.565E-01	0.000E+00						2%	91%	0%	7%	0%	
VS	1.38	G2	0.6	0.4	3.84	6.247E-05	-1.881E-01	-9.520E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.415E-01						4%	91%	0%	0%	6%	
VS	1.38	G3	0.6	0.4	5.33	4.924E-08	-1.388E-01	-9.046E-01	4.024E-01	-2.401E-02	0.000E+00		3.84	6.246E-05	3.83	6.305E-05	0.06%	2%	82%	16%	0%	0%
VS	1.38	G4	0.6	0.4	7.30	1.419E-13	-1.029E-01	-8.633E-01	4.940E-01	1.132E-02	0.000E+00						1%	75%	24%	0%	0%	
VS	1.38	G5	0.6	0.4	10.89	7.000E-28	-7.099E-02	-8.457E-01	5.281E-01	2.871E-02	0.000E+00						1%	72%	28%	0%	0%	
VS	1.38	G1	0.4	0.6	4.26	1.017E-05	-7.624E-02	-9.737E-01	3.179E-02	2.121E-01	0.000E+00						1%	95%	0%	5%	0%	
VS	1.38	G2	0.4	0.6	3.08	1.020E-03																

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	P _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	P _{f,sist}	β _{sist,MC}	P _{f,sist,MC}	Δβ _{sist,F-MC} (%)	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
VS	1.6	G1	0.8	0.2	5.48	2.095E-08	-3.592E-01	-8.539E-01	5.311E-02	3.728E-01	0.000E+00						13%	73%	0%	14%	0%
VS	1.6	G2	0.8	0.2	5.78	3.787E-09	-3.427E-01	-8.766E-01	0.000E+00	0.000E+00	3.379E-01						12%	77%	0%	0%	11%
VS	1.6	G3	0.8	0.2	5.98	1.113E-09	-3.284E-01	-7.564E-01	5.644E-01	-3.850E-02	0.000E+00	5.45	2.460E-08	---	---	---	11%	57%	32%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.8	0.2	9.51	9.181E-22	-2.120E-01	-7.641E-01	6.088E-01	2.469E-02	0.000E+00						4%	58%	37%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.8	0.2	14.28	1.480E-46	-1.462E-01	-7.737E-01	6.139E-01	5.578E-02	0.000E+00						2%	60%	38%	0%	0%
VS	1.6	G1	0.6	0.4	4.02	2.856E-05	-1.801E-01	-9.475E-01	3.892E-02	2.615E-01	0.000E+00						3%	90%	0%	7%	0%
VS	1.6	G2	0.6	0.4	4.21	1.299E-05	-1.733E-01	-9.557E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.379E-01						3%	91%	0%	0%	6%
VS	1.6	G3	0.6	0.4	4.59	2.215E-06	-1.592E-01	-9.003E-01	4.044E-01	-2.339E-02	0.000E+00	3.99	3.316E-05	3.97	3.575E-05	0.45%	3%	81%	16%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.6	0.4	7.45	4.709E-14	-1.010E-01	-8.653E-01	4.908E-01	1.457E-02	0.000E+00						1%	75%	24%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.6	0.4	11.26	1.030E-29	-6.875E-02	-8.443E-01	5.305E-01	3.223E-02	0.000E+00						0%	71%	28%	0%	0%
VS	1.6	G1	0.4	0.6	3.25	5.852E-04	-9.694E-02	-9.713E-01	3.246E-02	2.147E-01	0.000E+00						1%	94%	0%	5%	0%
VS	1.6	G2	0.4	0.6	3.39	3.521E-04	-9.350E-02	-9.762E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.955E-01						1%	95%	0%	0%	4%
VS	1.6	G3	0.4	0.6	3.78	7.923E-05	-8.459E-02	-9.380E-01	3.355E-01	-1.821E-02	0.000E+00	3.23	6.261E-04	3.20	6.881E-04	0.84%	1%	88%	11%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.4	0.6	6.28	1.690E-10	-5.290E-02	-9.017E-01	4.291E-01	1.112E-02	0.000E+00						0%	81%	18%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.4	0.6	9.62	3.410E-22	-3.550E-02	-8.767E-01	4.791E-01	2.412E-02	0.000E+00						0%	77%	23%	0%	0%
VS	1.6	G1	0.2	0.8	2.75	2.978E-03	-4.181E-02	-9.811E-01	2.847E-02	1.868E-01	0.000E+00						0%	96%	0%	3%	0%
VS	1.6	G2	0.2	0.8	2.87	2.050E-03	-4.040E-02	-9.846E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.703E-01						0%	97%	0%	0%	3%
VS	1.6	G3	0.2	0.8	3.24	5.901E-04	-3.628E-02	-9.550E-01	2.941E-01	-1.543E-02	0.000E+00	2.76	2.905E-03	2.70	3.420E-03	1.95%	0%	91%	9%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.2	0.8	5.51	1.830E-08	-2.248E-02	-9.214E-01	3.878E-01	9.301E-03	0.000E+00						0%	85%	15%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.2	0.8	8.53	7.345E-18	-1.475E-02	-8.981E-01	4.392E-01	1.964E-02	0.000E+00						0%	81%	19%	0%	0%

Quadro A.8 – Resultados exemplo I, série VS – a/d = 1,60.

As Figuras A1 e A2 apresentam a variação dos fatores de importância em relação ao percentual de carga variável, para cada função de falha, para cada razão a/d e para as vigas da série V0 e VS, referentes ao objetivo “d” do exemplo I.

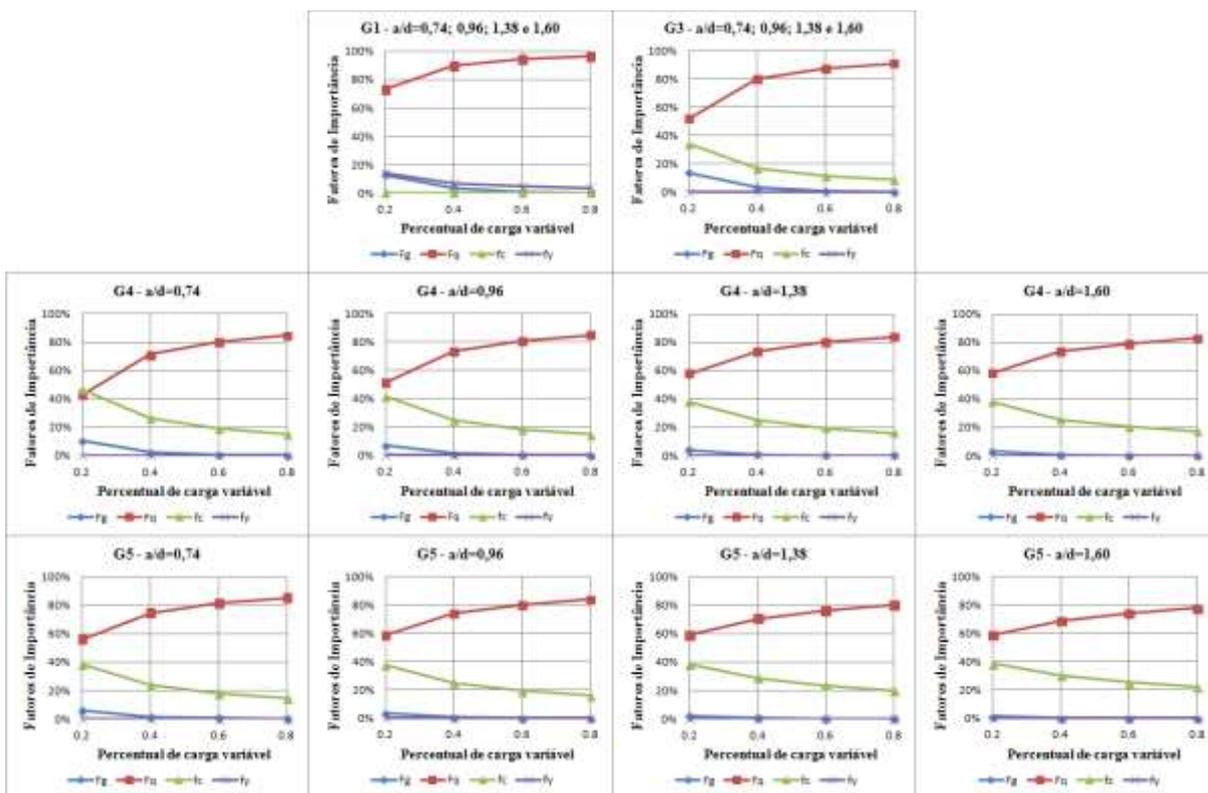


Figura A.1 – Variação dos fatores de importância em relação ao percentual de carga variável, série V0.

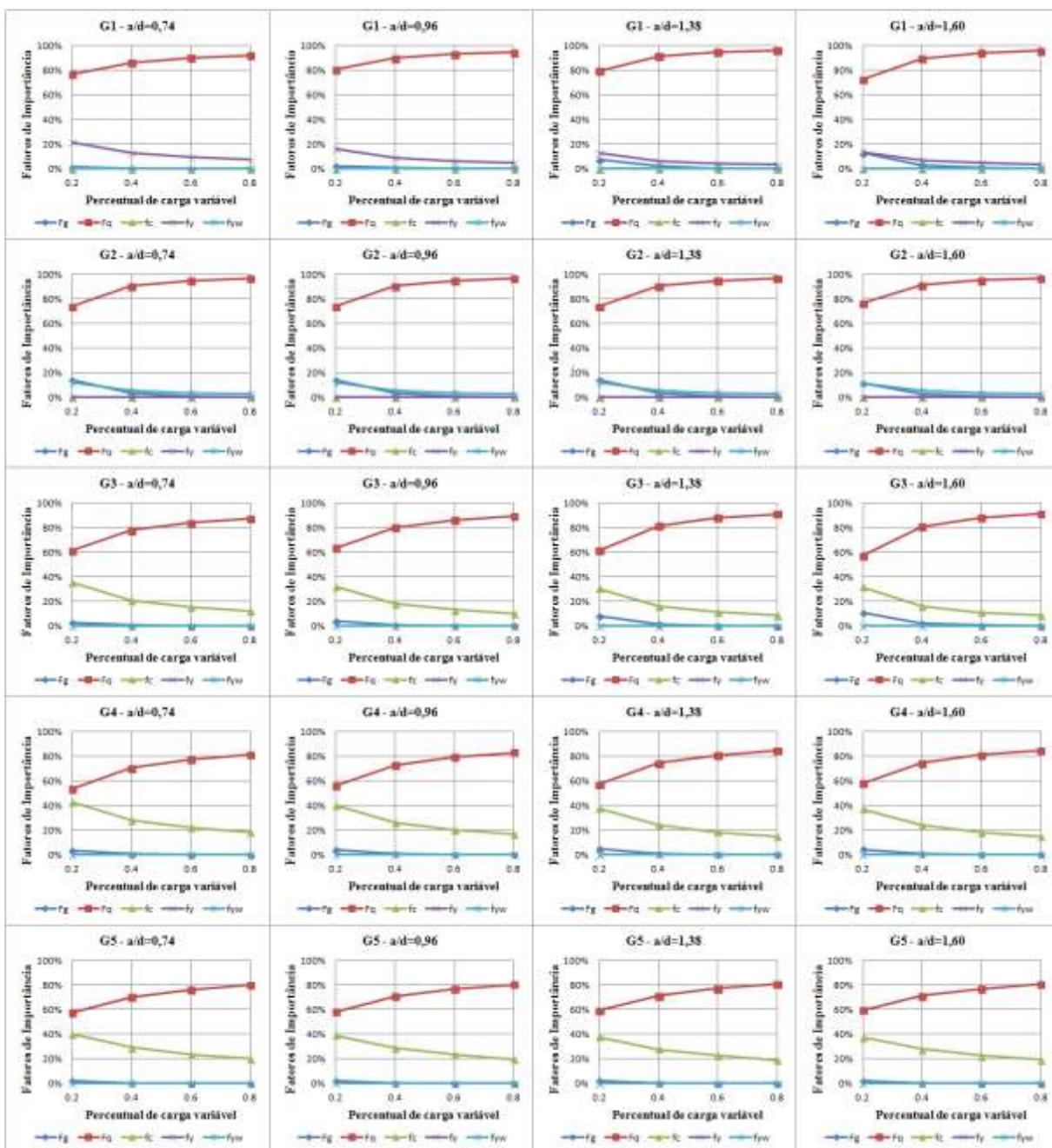


Figura A.2 – Variação dos fatores de importância em relação ao percentual de carga variável, série VS.

Os Quadros A.9 à A.16 apresentam os resultados obtidos quando da análise da dispersão dos valores da carga variável em torno da média, expresso pelo coeficiente de variação da carga variável δ_i , objetivo e do exemplo I. Os resultados apresentados em vermelho foram obtidos com o programa ComRel.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	δ _i	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	
V0	0.74	G1	0.2	0.8	0.10	4.59E+00	2.17E-06	-6.66E-02	-9.55E-01	4.15E-02	2.87E-01	0.00E+00	4.44	4.595E-06	0%	91%	0%	8%	0%	
V0	0.74	G2	0.2	0.8	0.10	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.2	0.8	0.10	4.53E+00	2.96E-06	-6.71E-02	-8.91E-01	4.49E-01	-2.61E-02	0.00E+00			0%	79%	20%	0%	0%	
V0	0.74	G4	0.2	0.8	0.10	5.38E+00	3.81E-08	-5.70E-02	-8.31E-01	5.53E-01	-5.35E-03	0.00E+00			0%	69%	31%	0%	0%	
V0	0.74	G5	0.2	0.8	0.10	7.23E+00	2.38E-13	-4.32E-02	-8.51E-01	5.23E-01	1.19E-02	0.00E+00			0%	72%	27%	0%	0%	
V0	0.74	G1	0.2	0.8	0.20	3.14E+00	8.49E-04	-4.68E-02	-9.77E-01	3.10E-02	2.08E-01	0.00E+00	3.06	1.118E-03	0%	95%	0%	4%	0%	
V0	0.74	G2	0.2	0.8	0.20	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.74	G3	0.2	0.8	0.20	3.20E+00	6.92E-04	-4.58E-02	-9.43E-01	3.28E-01	-1.72E-02	0.00E+00			0%	89%	11%	0%	0%	
V0	0.74	G4	0.2	0.8	0.20	3.96E+00	3.68E-05	-3.78E-02	-9.05E-01	4.23E-01	-3.73E-03	0.00E+00			0%	82%	18%	0%	0%	
V0	0.74	G5	0.2	0.8	0.20	5.37E+00	3.96E-08	-2.87E-02	-9.10E-01	4.13E-01	7.56E-03	0.00E+00			0%	83%	17%	0%	0%	
V0	0.74	G1	0.2	0.8	0.30	2.46E+00	6.94E-03	-3.81E-02	-9.84E-01	2.58E-02	1.71E-01	0.00E+00	2.42	7.817E-03	0%	97%	0%	3%	0%	
V0	0.74	G2	0.2	0.8	0.30	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.74	G3	0.2	0.8	0.30	2.54E+00	5.53E-03	-3.70E-02	-9.62E-01	2.71E-01	-1.37E-02	0.00E+00			0%	92%	7%	0%	0%	
V0	0.74	G4	0.2	0.8	0.30	3.23E+00	6.27E-04	-3.03E-02	-9.33E-01	3.59E-01	-3.03E-03	0.00E+00			0%	87%	13%	0%	0%	
V0	0.74	G5	0.2	0.8	0.30	4.41E+00	5.10E-06	-2.30E-02	-9.34E-01	3.55E-01	5.96E-03	0.00E+00			0%	87%	13%	0%	0%	
V0	0.74	G1	0.2	0.8	0.40	2.05E+00	2.02E-02	-3.27E-02	-9.88E-01	2.24E-02	1.48E-01	0.00E+00	2.05	2.022E-02	0%	98%	0%	2%	0%	
V0	0.74	G2	0.2	0.8	0.40	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.74	G3	0.2	0.8	0.40	2.13E+00	1.64E-02	-3.16E-02	-9.71E-01	2.35E-01	-1.16E-02	0.00E+00			0%	94%	6%	0%	0%	
V0	0.74	G4	0.2	0.8	0.40	2.75E+00	2.94E-03	-2.59E-02	-9.48E-01	3.17E-01	-2.62E-03	0.00E+00			0%	90%	10%	0%	0%	
V0	0.74	G5	0.2	0.8	0.40	3.80E+00	7.13E-05	-1.97E-02	-9.48E-01	3.17E-01	5.07E-03	0.00E+00			0%	90%	10%	0%	0%	

Quadro A.9 – Resultados exemplo I, série V0 – a/d = 0,74.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	δ _i	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	
V0	0.96	G1	0.2	0.8	0.10	4.59E+00	2.19E-06	-6.66E-02	-9.55E-01	4.15E-02	2.87E-01	0.00E+00	4.43	4.652E-06	0%	91%	0%	8%	0%	
V0	0.96	G2	0.2	0.8	0.10	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---
V0	0.96	G3	0.2	0.8	0.10	4.53E+00	2.98E-06	-6.71E-02	-8.91E-01	4.49E-01	-2.61E-02	0.00E+00			0%	79%	20%	0%	0%	
V0	0.96	G4	0.2	0.8	0.10	6.53E+00	3.37E-11	-4.76E-02	-8.43E-01	5.37E-01	1.49E-03	0.00E+00			0%	71%	29%	0%	0%	
V0	0.96	G5	0.2	0.8	0.10	9.12E+00	3.90E-20	-3.45E-02	-8.47E-01	5.31E-01	1.84E-02	0.00E+00			0%	72%	28%	0%	0%	
V0	0.96	G1	0.2	0.8	0.20	3.14E+00	8.52E-04	-4.68E-02	-9.77E-01	3.10E-02	2.08E-01	0.00E+00	3.05	1.157E-03	0%	95%	0%	4%	0%	
V0	0.96	G2	0.2	0.8	0.20	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.2	0.8	0.20	3.20E+00	6.94E-04	-4.58E-02	-9.43E-01	3.28E-01	-1.72E-02	0.00E+00			0%	89%	11%	0%	0%	
V0	0.96	G4	0.2	0.8	0.20	4.84E+00	6.50E-07	-3.16E-02	-9.07E-01	4.19E-01	6.87E-04	0.00E+00			0%	82%	18%	0%	0%	
V0	0.96	G5	0.2	0.8	0.20	6.85E+00	3.66E-12	-2.28E-02	-9.02E-01	4.31E-01	1.16E-02	0.00E+00			0%	81%	19%	0%	0%	
V0	0.96	G1	0.2	0.8	0.30	2.46E+00	6.95E-03	-3.81E-02	-9.84E-01	2.58E-02	1.71E-01	0.00E+00	2.39	8.394E-03	0%	97%	0%	3%	0%	
V0	0.96	G2	0.2	0.8	0.30	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.2	0.8	0.30	2.54E+00	5.54E-03	-3.70E-02	-9.62E-01	2.71E-01	-1.37E-02	0.00E+00			0%	92%	7%	0%	0%	
V0	0.96	G4	0.2	0.8	0.30	3.97E+00	3.64E-05	-2.53E-02	-9.33E-01	3.58E-01	4.64E-04	0.00E+00			0%	87%	13%	0%	0%	
V0	0.96	G5	0.2	0.8	0.30	5.69E+00	6.46E-09	-1.82E-02	-9.26E-01	3.76E-01	9.03E-03	0.00E+00			0%	86%	14%	0%	0%	
V0	0.96	G1	0.2	0.8	0.40	2.05E+00	2.02E-02	-3.27E-02	-9.88E-01	2.24E-02	1.48E-01	0.00E+00	2.00	2.297E-02	0%	98%	0%	2%	0%	
V0	0.96	G2	0.2	0.8	0.40	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.2	0.8	0.40	2.13E+00	1.65E-02	-3.16E-02	-9.71E-01	2.35E-01	-1.16E-02	0.00E+00			0%	94%	6%	0%	0%	
V0	0.96	G4	0.2	0.8	0.40	3.41E+00	3.25E-04	-2.17E-02	-9.48E-01	3.19E-01	3.60E-04	0.00E+00			0%	90%	10%	0%	0%	
V0	0.96	G5	0.2	0.8	0.40	4.94E+00	3.86E-07	-1.56E-02	-9.41E-01	3.38E-01	7.65E-03	0.00E+00			0%	89%	11%	0%	0%	

Quadro A.10 – Resultados exemplo I, série V0 – a/d = 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	δ _i	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅		
V0	1.38	G1	0.2	0.8	0.10	4.59E+00	2.18E-06	-6.66E-02	-9.55E-01	4.15E-02	2.87E-01	0.00E+00	4.43	4.632E-06	0%	91%	0%	8%	0%		
V0	1.38	G2	0.2	0.8	0.10	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.2	0.8	0.10	4.53E+00	2.97E-06	-6.71E-02	-8.91E-01	4.49E-01	-2.61E-02	0.00E+00			0%	79%	20%	0%	0%		
V0	1.38	G4	0.2	0.8	0.10	8.81E+00	6.03E-19	-3.58E-02	-8.45E-01	5.34E-01	1.38E-02	0.00E+00			0%	71%	29%	0%	0%		
V0	1.38	G5	0.2	0.8	0.10	1.24E+01	1.57E-35	-0.026182	-0.826309	0.561501	0.035295	0			0%	68%	32%	0%	0%		
V0	1.38	G1	0.2	0.8	0.20	3.14E+00	8.51E-04	-4.68E-02	-9.77E-01	3.10E-02	2.08E-01	0.00E+00	3.05	1.155E-03	0%	95%	0%	4%	0%		
V0	1.38	G2	0.2	0.8	0.20	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	
V0	1.38	G3	0.2	0.8	0.20	3.20E+00	6.93E-04	-4.58E-02	-9.43E-01	3.28E-01	-1.72E-02	0.00E+00			0%	89%	11%	0%	0%		
V0	1.38	G4	0.2	0.8	0.20	6.62E+00	1.78E-11	-2.36E-02	-9.02E-01	4.32E-01	8.45E-03	0.00E+00			0%	81%	19%	0%	0%		
V0	1.38	G5	0.2	0.8	0.20	9.49E+00	1.19E-21	-0.016857	-0.879138	0.475795	0.021253	0			0%	77%	23%	0%	0%		
V0	1.38	G1	0.2	0.8	0.30	2.46E+00	6.95E-03	-3.81E-02	-9.84E-01	2.58E-02	1.71E-01	0.00E+00	2.39	8.429E-03	0%	97%	0%	3%	0%		
V0	1.38	G2	0.2	0.8	0.30	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	
V0	1.38	G3	0.2	0.8	0.30	2.54E+00	5.54E-03	-3.70E-02	-9.62E-01	2.71E-01	-1.37E-02	0.00E+00			0%	92%	7%	0%	0%		
V0	1.38	G4	0.2	0.8	0.30	5.49E+00	1.99E-08	-1.88E-02	-9.27E-01	3.76E-01	6.55E-03	0.00E+00			0%	86%	14%	0%	0%		
V0	1.38	G5	0.2	0.8	0.30	7.99E+00	6.93E-16	-1.31E-02	-9.07E-01	4.22E-01	1.61E-02	0.00E+00			0%	82%	18%	0%	0%		
V0	1.38	G1	0.2	0.8	0.40	2.05E+00	2.02E-02	-3.27E-02	-9.88E-01	2.24E-02	1.48E-01	0.00E+00	1.99	2.330E-02	0%	98%	0%	2%	0%		
V0	1.38	G2	0.2	0.8	0.40	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	
V0	1.38	G3	0.2	0.8	0.40	2.13E+00	1.65E-02	-3.16E-02	-9.71E-01	2.35E-01	-1.16E-02	0.00E+00			0%	94%	6%	0%	0%		
V0	1.38	G4	0.2	0.8	0.40	4.77E+00	9.26E-07	-1.61E-02	-9.41E-01	3.38E-01	5.52E-03	0.00E+00			0%	89%	11%	0%	0%		
V0	1.38	G5	0.2	0.8	0.40	7.02E+00	1.13E-12	-1.12E-02	-9.23E-01	3.85E-01	1.35E-02	0.00E+00			0%	85%	15%	0%	0%		

Quadro A.11 – Resultados exemplo I, série V0 – a/d = 1,38.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	δ _i	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	
V0	1.6	G1	0.2	0.8	0.10	4.59E+00	2.19E-06	-6.66E-02	-9.55E-01	4.15E-02	2.87E-01	0.00E+00	4.43	4.652E-06	0%	91%	0%	8%	0%	
V0	1.6	G2	0.2	0.8	0.10	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.2	0.8	0.10	4.53E+00	2.98E-06	-6.71E-02	-8.91E-01	4.49E-01	-2.61E-02	0.00E+00			0%	79%	20%	0%	0%	
V0	1.6	G4	0.2	0.8	0.10	9.92E+00	1.83E-23	-0.032261	-0.839061	0.542714	0.019924	0			0%	70%	29%	0%	0%	
V0	1.6	G5	0.2	0.8	0.10	1.39E+01	6.06E-44	-0.023586	-0.817428	0.573779	0.045078	0			0%	67%	33%	0%	0%	
V0	1.6	G1	0.2	0.8	0.20	3.14E+00	8.53E-04	-4.68E-02	-9.77E-01	3.10E-02	2.08E-01	0.00E+00	3.05	1.159E-03	0%	95%	0%	4%	0%	
V0	1.6	G2	0.2	0.8	0.20	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.2	0.8	0.20	3.20E+00	6.95E-04	-4.58E-02	-9.43E-01	3.28E-01	-1.72E-02	0.00E+00			0%	89%	11%	0%	0%	
V0	1.6	G4	0.2	0.8	0.20	7.49E+00	3.35E-14	-2.09E-02	-8.96E-01	4.43E-01	1.21E-02	0.00E+00			0%	80%	20%	0%	0%	
V0	1.6	G5	0.2	0.8	0.20	1.07E+01	5.57E-27	-0.015062	-0.868155	0.495343	0.02674	0			0%	75%	25%	0%	0%	
V0	1.6	G1	0.2	0.8	0.30	2.46E+00	6.96E-03	-3.81E-02	-9.84E-01	2.58E-02	1.71E-01	0.00E+00	2.39	8.449E-03	0%	97%	0%	3%	0%	
V0	1.6	G2	0.2	0.8	0.30	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.2	0.8	0.30	2.54E+00	5.55E-03	-3.70E-02	-9.62E-01	2.71E-01	-1.37E-02	0.00E+00			0%	92%	7%	0%	0%	
V0	1.6	G4	0.2	0.8	0.30	6.25E+00	2.10E-10	-1.66E-02	-9.21E-01	3.89E-01	9.34E-03	0.00E+00			0%	85%	15%	0%	0%	
V0	1.6	G5	0.2	0.8	0.30	9.051	7.22E-20	-0.011761	-0.894956	0.445539	0.020258	0			0%	80%	20%	0%	0%	
V0	1.6	G1	0.2	0.8	0.40	2.05E+00	2.02E-02	-3.27E-02	-9.88E-01	2.24E-02	1.48E-01	0.00E+00	1.99	2.330E-02	0%	98%	0%	2%	0%	
V0	1.6	G2	0.2	0.8	0.40	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.2	0.8	0.40	2.13E+00	1.65E-02	-3.16E-02	-9.71E-01	2.35E-01	-1.16E-02	0.00E+00			0%	94%	6%	0%	0%	
V0	1.6	G4	0.2	0.8	0.40	5.45E+00	2.58E-08	-1.42E-02	-9.36E-01	3.51E-01	7.87E-03	0.00E+00			0%	88%	12%	0%	0%	
V0	1.6	G5	0.2	0.8	0.40	7.98E+00	7.10E-16	-9.86E-03	-9.13E-01	4.08E-01	1.67E-02	0.00E+00			0%	83%	17%	0%	0%	

Quadro A.12 – Resultados exemplo I, série V0 – a/d = 1,60.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	δ _i	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
VS	0.74	G1	0.2	0.8	0.10	1.481E+01	7.160E-50	-2.242E-02	-9.177E-01	4.690E-02	3.937E-01	0.000E+00	4.40	5.521E-06	0%	84%	0%	16%	0%
VS	0.74	G2	0.2	0.8	0.10	4.396E+00	5.521E-06	-6.941E-02	-9.619E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.646E-01			0%	93%	0%	0%	7%
VS	0.74	G3	0.2	0.8	0.10	1.041E+01	1.100E-25	-3.087E-02	-8.651E-01	4.989E-01	-4.149E-02	0.000E+00			0%	75%	25%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.2	0.8	0.10	9.391E+00	2.960E-21	-3.378E-02	-8.227E-01	5.674E-01	-5.808E-03	0.000E+00			0%	68%	32%	0%	0%
VS	0.74	G5	0.2	0.8	0.10	1.183E+01	1.500E-32	-2.733E-02	-8.210E-01	5.700E-01	2.048E-02	0.000E+00			0%	67%	32%	0%	0%
VS	0.74	G1	0.2	0.8	0.20	1.079E+01	1.990E-27	-1.504E-02	-9.532E-01	4.040E-02	2.994E-01	0.000E+00	2.98	1.435E-03	0%	91%	0%	9%	0%
VS	0.74	G2	0.2	0.8	0.20	2.981E+00	1.435E-03	-4.890E-02	-9.803E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.915E-01			0%	96%	0%	0%	4%
VS	0.74	G3	0.2	0.8	0.20	7.742E+00	4.930E-15	-2.047E-02	-9.229E-01	3.838E-01	-2.505E-02	0.000E+00			0%	85%	15%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.2	0.8	0.20	7.144E+00	4.538E-13	-2.192E-02	-8.873E-01	4.607E-01	-4.286E-03	0.000E+00			0%	79%	21%	0%	0%
VS	0.74	G5	0.2	0.8	0.20	9.055E+00	6.846E-20	-1.621E-02	-8.950E-01	4.456E-01	1.116E-02	0.000E+00			0%	80%	20%	0%	0%
VS	0.74	G1	0.2	0.8	0.30	8.865E+00	3.870E-19	-1.205E-02	-9.671E-01	3.555E-02	2.517E-01	0.000E+00	2.33	9.970E-03	0%	94%	0%	6%	0%
VS	0.74	G2	0.2	0.8	0.30	2.327E+00	9.970E-03	-3.976E-02	-9.868E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.571E-01			0%	97%	0%	0%	2%
VS	0.74	G3	0.2	0.8	0.30	6.393E+00	8.190E-11	-1.635E-02	-9.451E-01	3.258E-01	-1.931E-02	0.000E+00			0%	89%	11%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.2	0.8	0.30	5.965E+00	1.222E-09	-1.737E-02	-9.152E-01	4.026E-01	-3.539E-03	0.000E+00			0%	84%	16%	0%	0%
VS	0.74	G5	0.2	0.8	0.30	7.631E+00	1.168E-14	-1.373E-02	-9.060E-01	4.230E-01	9.171E-03	0.000E+00			0%	82%	18%	0%	0%
VS	0.74	G1	0.2	0.8	0.40	7.676E+00	8.206E-15	-1.027E-02	-9.749E-01	3.186E-02	2.201E-01	0.000E+00	1.93	2.657E-02	0%	95%	0%	5%	0%
VS	0.74	G2	0.2	0.8	0.40	1.934E+00	2.657E-02	-3.406E-02	-9.902E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.352E-01			0%	98%	0%	0%	2%
VS	0.74	G3	0.2	0.8	0.40	5.540E+00	1.516E-08	-1.400E-02	-9.573E-01	2.883E-01	-1.622E-02	0.000E+00			0%	92%	8%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.2	0.8	0.40	5.204E+00	9.768E-08	-1.482E-02	-9.316E-01	3.633E-01	-3.083E-03	0.000E+00			0%	87%	13%	0%	0%
VS	0.74	G5	0.2	0.8	0.40	6.701E+00	1.038E-11	-1.167E-02	-9.224E-01	3.859E-01	7.666E-03	0.000E+00			0%	85%	15%	0%	0%

Quadro A.13 – Resultados exemplo I, série VS – $a/d = 0,74$.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	δ _i	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
VS	0.96	G1	0.2	0.8	0.10	1.078E+01	2.270E-27	-3.008E-02	-9.420E-01	4.402E-02	3.314E-01	0.000E+00	4.40	5.478E-06	0%	89%	0%	11%	0%
VS	0.96	G2	0.2	0.8	0.10	4.397E+00	5.478E-06	-6.938E-02	-9.619E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.645E-01			0%	93%	0%	0%	7%
VS	0.96	G3	0.2	0.8	0.10	8.735E+00	1.240E-18	-3.645E-02	-8.821E-01	4.683E-01	-3.453E-02	0.000E+00			0%	78%	22%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.2	0.8	0.10	8.748E+00	1.083E-18	-3.601E-02	-8.360E-01	5.476E-01	2.871E-03	0.000E+00			0%	70%	30%	0%	0%
VS	0.96	G5	0.2	0.8	0.10	1.186E+01	9.570E-33	-2.726E-02	-8.251E-01	5.637E-01	2.633E-02	0.000E+00			0%	68%	32%	0%	0%
VS	0.96	G1	0.2	0.8	0.20	7.711E+00	6.258E-15	-2.044E-02	-9.688E-01	3.506E-02	2.443E-01	0.000E+00	2.98	1.429E-03	0%	94%	0%	6%	0%
VS	0.96	G2	0.2	0.8	0.20	2.983E+00	1.429E-03	-4.888E-02	-9.803E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.915E-01			0%	96%	0%	0%	4%
VS	0.96	G3	0.2	0.8	0.20	6.406E+00	7.490E-11	-2.446E-02	-9.342E-01	3.553E-01	-2.151E-02	0.000E+00			0%	87%	13%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.2	0.8	0.20	6.598E+00	2.084E-11	-2.366E-02	-8.965E-01	4.423E-01	1.343E-03	0.000E+00			0%	80%	20%	0%	0%
VS	0.96	G5	0.2	0.8	0.20	9.080E+00	5.500E-20	-1.757E-02	-8.801E-01	4.742E-01	1.576E-02	0.000E+00			0%	77%	22%	0%	0%
VS	0.96	G1	0.2	0.8	0.30	6.269E+00	1.821E-10	-1.663E-02	-9.782E-01	3.015E-02	2.046E-01	0.000E+00	2.33	9.943E-03	0%	96%	0%	4%	0%
VS	0.96	G2	0.2	0.8	0.30	2.329E+00	9.943E-03	-3.974E-02	-9.868E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.571E-01			0%	97%	0%	0%	2%
VS	0.96	G3	0.2	0.8	0.30	5.246E+00	7.765E-08	-1.964E-02	-9.538E-01	2.993E-01	-1.679E-02	0.000E+00			0%	91%	9%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.2	0.8	0.30	5.481E+00	2.110E-08	-1.881E-02	-9.229E-01	3.846E-01	9.133E-04	0.000E+00			0%	85%	15%	0%	0%
VS	0.96	G5	0.2	0.8	0.30	7.634E+00	1.135E-14	-1.372E-02	-9.079E-01	4.189E-01	1.195E-02	0.000E+00			0%	82%	18%	0%	0%
VS	0.96	G1	0.2	0.8	0.40	5.385E+00	3.624E-08	-1.440E-02	-9.832E-01	2.687E-02	1.799E-01	0.000E+00	1.93	2.652E-02	0%	97%	0%	3%	0%
VS	0.96	G2	0.2	0.8	0.40	1.935E+00	2.652E-02	-3.405E-02	-9.902E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.352E-01			0%	98%	0%	0%	2%
VS	0.96	G3	0.2	0.8	0.40	4.518E+00	3.117E-06	-1.692E-02	-9.641E-01	2.646E-01	-1.425E-02	0.000E+00			0%	93%	7%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.2	0.8	0.40	4.764E+00	9.488E-07	-1.609E-02	-9.381E-01	3.459E-01	7.122E-04	0.000E+00			0%	88%	12%	0%	0%
VS	0.96	G5	0.2	0.8	0.40	6.701E+00	1.037E-11	-1.167E-02	-9.240E-01	3.822E-01	1.001E-02	0.000E+00			0%	85%	15%	0%	0%

Quadro A.14 – Resultados exemplo I, série VS – $a/d = 0,96$.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	δ _i	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
VS	1.38	G1	0.2	0.8	0.10	5.941E+00	1.416E-09	-5.244E-02	-9.573E-01	4.075E-02	2.813E-01	0.000E+00	4.40	5.538E-06	0%	92%	0%	8%	0%
VS	1.38	G2	0.2	0.8	0.10	4.395E+00	5.538E-06	-6.942E-02	-9.619E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.646E-01			0%	93%	0%	0%	7%
VS	1.38	G3	0.2	0.8	0.10	5.952E+00	1.321E-09	-5.215E-02	-8.965E-01	4.391E-01	-2.757E-02	0.000E+00			0%	80%	19%	0%	0%
VS	1.38	G4	0.2	0.8	0.10	8.019E+00	5.319E-16	-3.917E-02	-8.490E-01	5.267E-01	1.324E-02	0.000E+00			0%	72%	28%	0%	0%
VS	1.38	G5	0.2	0.8	0.10	1.185E+01	1.080E-32	-2.729E-02	-8.309E-01	5.547E-01	3.390E-02	0.000E+00			0%	69%	31%	0%	0%
VS	1.38	G1	0.2	0.8	0.20	4.122E+00	1.881E-05	-3.685E-02	-9.775E-01	3.088E-02	2.056E-01	0.000E+00	2.98	1.432E-03	0%	96%	0%	4%	0%
VS	1.38	G2	0.2	0.8	0.20	2.981E+00	1.437E-03	-4.890E-02	-9.803E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.915E-01			0%	96%	0%	0%	4%
VS	1.38	G3	0.2	0.8	0.20	4.264E+00	1.005E-05	-3.562E-02	-9.445E-01	3.260E-01	-1.793E-02	0.000E+00			0%	89%	11%	0%	0%
VS	1.38	G4	0.2	0.8	0.20	5.987E+00	1.066E-09	-2.595E-02	-9.065E-01	4.212E-01	8.230E-03	0.000E+00			0%	82%	18%	0%	0%
VS	1.38	G5	0.2	0.8	0.20	9.042E+00	7.684E-20	-1.693E-02	-8.911E-01	4.530E-01	1.970E-02	0.000E+00			0%	79%	21%	0%	0%
VS	1.38	G1	0.2	0.8	0.30	3.274E+00	5.307E-04	-3.013E-02	-9.846E-01	2.593E-02	1.705E-01	0.000E+00	2.34	9.762E-03	0%	97%	0%	3%	0%
VS	1.38	G2	0.2	0.8	0.30	2.327E+00	9.980E-03	-3.976E-02	-9.868E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.571E-01			0%	97%	0%	0%	2%
VS	1.38	G3	0.2	0.8	0.30	3.432E+00	2.996E-04	-2.883E-02	-9.617E-01	2.723E-01	-1.426E-02	0.000E+00			0%	92%	7%	0%	0%
VS	1.38	G4	0.2	0.8	0.30	4.944E+00	3.825E-07	-2.072E-02	-9.311E-01	3.642E-01	6.415E-03	0.000E+00			0%	87%	13%	0%	0%
VS	1.38	G5	0.2	0.8	0.30	7.596E+00	1.526E-14	-1.379E-02	-9.108E-01	4.123E-01	1.568E-02	0.000E+00			0%	83%	17%	0%	0%
VS	1.38	G1	0.2	0.8	0.40	2.757E+00	2.915E-03	-2.611E-02	-9.883E-01	2.278E-02	1.488E-01	0.000E+00	1.96	2.513E-02	0%	98%	0%	2%	0%
VS	1.38	G2	0.2	0.8	0.40	1.933E+00	2.659E-02	-3.406E-02	-9.902E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.352E-01			0%	98%	0%	0%	2%
VS	1.38	G3	0.2	0.8	0.40	2.914E+00	1.786E-03	-2.488E-02	-9.707E-01	2.388E-01	-1.219E-02	0.000E+00			0%	94%	6%	0%	0%
VS	1.38	G4	0.2	0.8	0.40	4.278E+00	9.433E-06	-1.776E-02	-9.451E-01	3.264E-01	5.428E-03	0.000E+00			0%	89%	11%	0%	0%
VS	1.38	G5	0.2	0.8	0.40	6.662E+00	1.352E-11	-1.174E-02	-9.264E-01	3.761E-01	1.317E-02	0.000E+00			0%	86%	14%	0%	0%

Quadro A.15 – Resultados exemplo I, série VS – a/d = 1,38.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	δ _i	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
VS	1.6	G1	0.2	0.8	0.10	4.594E+00	2.176E-06	-6.663E-02	-9.548E-01	4.216E-02	2.865E-01	0.000E+00	4.56	2.577E-06	0%	91%	0%	8%	0%
VS	1.6	G2	0.2	0.8	0.10	4.800E+00	7.918E-07	-6.403E-02	-9.633E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.607E-01			0%	93%	0%	0%	7%
VS	1.6	G3	0.2	0.8	0.10	5.150E+00	1.300E-07	-5.966E-02	-8.947E-01	4.418E-01	-2.675E-02	0.000E+00			0%	80%	20%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.2	0.8	0.10	8.181E+00	1.408E-16	-3.843E-02	-8.513E-01	5.230E-01	1.697E-02	0.000E+00			0%	72%	27%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.2	0.8	0.10	1.226E+01	7.850E-35	-2.645E-02	-8.297E-01	5.562E-01	3.807E-02	0.000E+00			0%	69%	31%	0%	0%
VS	1.6	G1	0.2	0.8	0.20	3.138E+00	8.500E-04	-4.680E-02	-9.766E-01	3.147E-02	2.078E-01	0.000E+00	3.12	8.930E-04	0%	95%	0%	4%	0%
VS	1.6	G2	0.2	0.8	0.20	3.275E+00	5.290E-04	-4.516E-02	-9.809E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.892E-01			0%	96%	0%	0%	4%
VS	1.6	G3	0.2	0.8	0.20	3.661E+00	1.257E-04	-4.079E-02	-9.446E-01	3.253E-01	-1.751E-02	0.000E+00			0%	89%	11%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.2	0.8	0.20	6.107E+00	5.090E-10	-2.547E-02	-9.074E-01	4.193E-01	1.067E-02	0.000E+00			0%	82%	18%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.2	0.8	0.20	9.371E+00	3.650E-21	-1.706E-02	-8.818E-01	4.707E-01	2.307E-02	0.000E+00			0%	78%	22%	0%	0%
VS	1.6	G1	0.2	0.8	0.30	2.460E+00	6.943E-03	-3.809E-02	-9.842E-01	2.615E-02	1.710E-01	0.000E+00	2.50	6.294E-03	0%	97%	0%	3%	0%
VS	1.6	G2	0.2	0.8	0.30	2.569E+00	5.104E-03	-3.685E-02	-9.871E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.559E-01			0%	97%	0%	0%	2%
VS	1.6	G3	0.2	0.8	0.30	2.927E+00	1.713E-03	-3.300E-02	-9.621E-01	2.705E-01	-1.394E-02	0.000E+00			0%	93%	7%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.2	0.8	0.30	5.044E+00	2.281E-07	-2.034E-02	-9.316E-01	3.629E-01	8.347E-03	0.000E+00			0%	87%	13%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.2	0.8	0.30	7.879E+00	1.656E-15	-1.332E-02	-9.088E-01	4.166E-01	1.755E-02	0.000E+00			0%	83%	17%	0%	0%
VS	1.6	G1	0.2	0.8	0.40	2.050E+00	2.019E-02	-3.271E-02	-9.882E-01	2.270E-02	1.476E-01	0.000E+00	2.15	1.592E-02	0%	98%	0%	2%	0%
VS	1.6	G2	0.2	0.8	0.40	2.142E+00	1.610E-02	-3.172E-02	-9.903E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.349E-01			0%	98%	0%	0%	2%
VS	1.6	G3	0.2	0.8	0.40	2.470E+00	6.753E-03	-2.839E-02	-9.713E-01	2.361E-01	-1.190E-02	0.000E+00			0%	94%	6%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.2	0.8	0.40	4.366E+00	6.332E-06	-1.743E-02	-9.454E-01	3.255E-01	7.079E-03	0.000E+00			0%	89%	11%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.2	0.8	0.40	6.917E+00	2.311E-12	-1.132E-02	-9.245E-01	3.807E-01	1.473E-02	0.000E+00			0%	85%	14%	0%	0%

Quadro A.16 – Resultados exemplo I, série VS – a/d = 1,60.

ANEXO – B

Os Quadros B.1 à B.8 apresentam os resultados do exemplo II, obtidos da análise das vigas curtas das séries V0 e VS, quando da aplicação dos fatores de modelagem de efeito de sollicitação ϕ_S e de resistência ϕ_R .

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β_i	$p_{f,i}$	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	β_{sist}	$p_{f,sist}$	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	
V0	0.74	G1	0.8	0.2	3.26	5.525E-04	-2.581E-01	-1.791E-01	2.620E-02	1.751E-01	0.000E+00	-3.502E-01	8.645E-01	3.20	6.865E-04	7%	3%	0%	3%	0%	12%	75%	
V0	0.74	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.8	0.2	3.32	4.439E-04	-2.520E-01	-1.746E-01	2.781E-01	-1.436E-02	0.000E+00	-3.418E-01	8.436E-01			6%	3%	8%	0%	0%	12%	71%	
V0	0.74	G4	0.8	0.2	4.00	3.175E-05	-2.403E-01	-1.738E-01	3.680E-01	-3.190E-03	0.000E+00	-3.309E-01	8.168E-01			6%	3%	14%	0%	0%	11%	67%	
V0	0.74	G5	0.8	0.2	5.21	9.657E-08	-2.338E-01	-1.882E-01	3.513E-01	6.099E-03	0.000E+00	-3.330E-01	8.219E-01			5%	4%	12%	0%	0%	11%	68%	
V0	0.74	G1	0.6	0.4	3.17	7.542E-04	-1.700E-01	-4.136E-01	2.473E-02	1.649E-01	0.000E+00	-3.300E-01	8.145E-01	3.12	9.061E-04	3%	17%	0%	3%	0%	11%	66%	
V0	0.74	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.6	0.4	3.24	6.033E-04	-1.665E-01	-4.045E-01	2.625E-01	-1.344E-02	0.000E+00	-3.229E-01	7.971E-01			3%	16%	7%	0%	0%	10%	64%	
V0	0.74	G4	0.6	0.4	3.88	5.166E-05	-1.532E-01	-4.176E-01	3.450E-01	-2.961E-03	0.000E+00	-3.103E-01	7.660E-01			2%	17%	12%	0%	0%	10%	59%	
V0	0.74	G5	0.6	0.4	5.00	2.928E-07	-1.344E-01	-4.727E-01	3.211E-01	5.410E-03	0.000E+00	-3.040E-01	7.503E-01			2%	22%	10%	0%	0%	9%	56%	
V0	0.74	G1	0.4	0.6	2.98	1.463E-03	-9.114E-02	-5.816E-01	2.242E-02	1.490E-01	0.000E+00	-2.982E-01	7.361E-01	2.94	1.653E-03	1%	34%	0%	2%	0%	9%	54%	
V0	0.74	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.4	0.6	3.04	1.171E-03	-8.932E-02	-5.720E-01	2.377E-01	-1.201E-02	0.000E+00	-2.928E-01	7.228E-01			1%	33%	6%	0%	0%	9%	52%	
V0	0.74	G4	0.4	0.6	3.64	1.355E-04	-7.952E-02	-5.798E-01	3.123E-01	-2.638E-03	0.000E+00	-2.810E-01	6.936E-01			1%	34%	10%	0%	0%	8%	48%	
V0	0.74	G5	0.4	0.6	4.64	1.702E-06	-6.663E-02	-6.110E-01	2.911E-01	4.743E-03	0.000E+00	-2.753E-01	6.795E-01			0%	37%	8%	0%	0%	8%	46%	
V0	0.74	G1	0.2	0.8	2.76	2.877E-03	-3.777E-02	-6.724E-01	2.056E-02	1.363E-01	0.000E+00	-2.727E-01	6.732E-01	2.74	3.065E-03	0%	45%	0%	2%	0%	7%	45%	
V0	0.74	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.2	0.8	2.83	2.323E-03	-3.698E-02	-6.633E-01	2.176E-01	-1.087E-02	0.000E+00	-2.685E-01	6.626E-01			0%	44%	5%	0%	0%	7%	44%	
V0	0.74	G4	0.2	0.8	3.39	3.476E-04	-3.256E-02	-6.625E-01	2.882E-01	-2.403E-03	0.000E+00	-2.593E-01	6.401E-01			0%	44%	8%	0%	0%	7%	41%	
V0	0.74	G5	0.2	0.8	4.32	7.821E-06	-2.700E-02	-6.773E-01	2.715E-01	4.321E-03	0.000E+00	-2.566E-01	6.333E-01			0%	46%	7%	0%	0%	7%	40%	

Quadro B.1 – Resultados exemplo II, série V0 – a/d = 0,74.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β_i	$p_{f,i}$	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	β_{sist}	$p_{f,sist}$	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7		
V0	0.96	G1	0.8	0.2	3.26	5.541E-04	-2.581E-01	-1.790E-01	2.620E-02	1.751E-01	0.000E+00	-3.502E-01	8.645E-01	3.19	7.172E-04	7%	3%	0%	3%	0%	12%	75%		
V0	0.96	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.96	G3	0.8	0.2	3.32	4.452E-04	-2.520E-01	-1.746E-01	2.781E-01	-1.436E-02	0.000E+00	-3.418E-01	8.436E-01			6%	3%	8%	0%	0%	12%	71%		
V0	0.96	G4	0.8	0.2	4.76	9.824E-07	-2.360E-01	-1.819E-01	3.613E-01	5.264E-04	0.000E+00	-3.318E-01	8.189E-01			6%	3%	13%	0%	0%	11%	67%		
V0	0.96	G5	0.8	0.2	6.43	6.520E-11	-2.254E-01	-2.068E-01	3.465E-01	8.426E-03	0.000E+00	-3.329E-01	8.218E-01			5%	4%	12%	0%	0%	11%	68%		
V0	0.96	G1	0.6	0.4	3.17	7.562E-04	-1.700E-01	-4.136E-01	2.473E-02	1.649E-01	0.000E+00	-3.300E-01	8.145E-01	3.10	9.554E-04	3%	17%	0%	3%	0%	11%	66%		
V0	0.96	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.6	0.4	3.24	6.049E-04	-1.665E-01	-4.044E-01	2.625E-01	-1.344E-02	0.000E+00	-3.229E-01	7.971E-01			3%	16%	7%	0%	0%	10%	64%		
V0	0.96	G4	0.6	0.4	4.59	2.257E-06	-1.414E-01	-4.523E-01	3.334E-01	4.508E-04	0.000E+00	-3.060E-01	7.554E-01			2%	20%	11%	0%	0%	9%	57%		
V0	0.96	G5	0.6	0.4	6.10	5.408E-10	-1.160E-01	-5.116E-01	3.104E-01	7.222E-03	0.000E+00	-2.976E-01	7.347E-01			1%	26%	10%	0%	0%	9%	54%		
V0	0.96	G1	0.4	0.6	2.97	1.466E-03	-9.115E-02	-5.815E-01	2.242E-02	1.490E-01	0.000E+00	-2.982E-01	7.361E-01	2.91	1.779E-03	1%	34%	0%	2%	0%	9%	54%		
V0	0.96	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.4	0.6	3.04	1.174E-03	-8.933E-02	-5.720E-01	2.377E-01	-1.201E-02	0.000E+00	-2.928E-01	7.228E-01			1%	33%	6%	0%	0%	9%	52%		
V0	0.96	G4	0.4	0.6	4.28	9.500E-06	-7.103E-02	-6.010E-01	3.015E-01	3.701E-04	0.000E+00	-2.767E-01	6.829E-01			1%	36%	9%	0%	0%	8%	47%		
V0	0.96	G5	0.4	0.6	5.65	8.197E-09	-5.655E-02	-6.235E-01	2.847E-01	6.381E-03	0.000E+00	-2.726E-01	6.728E-01			0%	39%	8%	0%	0%	7%	45%		
V0	0.96	G1	0.2	0.8	2.76	2.883E-03	-3.777E-02	-6.723E-01	2.056E-02	1.363E-01	0.000E+00	-2.727E-01	6.732E-01	2.71	3.377E-03	0%	45%	0%	2%	0%	7%	45%		
V0	0.96	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.2	0.8	2.83	2.327E-03	-3.699E-02	-6.633E-01	2.176E-01	-1.087E-02	0.000E+00	-2.685E-01	6.627E-01			0%	44%	5%	0%	0%	7%	44%		
V0	0.96	G4	0.2	0.8	3.98	3.473E-05	-2.886E-02	-6.729E-01	2.800E-01	3.196E-04	0.000E+00	-2.569E-01	6.341E-01			0%	45%	8%	0%	0%	7%	40%		
V0	0.96	G5	0.2	0.8	5.26	7.313E-08	-2.281E-02	-6.784E-01	2.684E-01	5.862E-03	0.000E+00	-2.567E-01	6.335E-01			0%	46%	7%	0%	0%	7%	40%		

Quadro B.2 – Resultados exemplo II, série V0 – a/d = 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇		
V0	1.38	G1	0.8	0.2	3.26	5.536E-04	-2.581E-01	-1.790E-01	2.620E-02	1.751E-01	0.000E+00	-3.502E-01	8.645E-01	3.19	7.177E-04	7%	3%	0%	3%	0%	12%	75%		
V0	1.38	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.8	0.2	3.32	4.448E-04	-2.520E-01	-1.746E-01	2.781E-01	-1.436E-02	0.000E+00	-3.418E-01	8.436E-01			6%	3%	8%	0%	0%	12%	71%		
V0	1.38	G4	0.8	0.2	6.24	2.121E-10	-2.265E-01	-2.032E-01	3.506E-01	6.223E-03	0.000E+00	-3.326E-01	8.209E-01			5%	4%	12%	0%	0%	11%	67%		
V0	1.38	G5	0.8	0.2	8.40	2.255E-17	-2.079E-01	-2.548E-01	3.373E-01	1.203E-02	0.000E+00	-3.312E-01	8.175E-01			4%	6%	11%	0%	0%	11%	67%		
V0	1.38	G1	0.6	0.4	3.17	7.556E-04	-1.700E-01	-4.136E-01	2.473E-02	1.649E-01	0.000E+00	-3.300E-01	8.145E-01	3.10	9.570E-04	3%	17%	0%	3%	0%	11%	66%		
V0	1.38	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.6	0.4	3.24	6.044E-04	-1.665E-01	-4.045E-01	2.625E-01	-1.344E-02	0.000E+00	-3.229E-01	7.971E-01			3%	16%	7%	0%	0%	10%	64%		
V0	1.38	G4	0.6	0.4	5.94	1.466E-09	-1.185E-01	-5.064E-01	3.148E-01	5.337E-03	0.000E+00	-2.981E-01	7.359E-01			1%	26%	10%	0%	0%	9%	54%		
V0	1.38	G5	0.6	0.4	7.84	2.170E-15	-9.337E-02	-5.405E-01	2.997E-01	1.003E-02	0.000E+00	-2.931E-01	7.234E-01			1%	29%	9%	0%	0%	9%	52%		
V0	1.38	G1	0.4	0.6	2.97	1.465E-03	-9.115E-02	-5.816E-01	2.242E-02	1.490E-01	0.000E+00	-2.982E-01	7.361E-01	2.91	1.787E-03	1%	34%	0%	2%	0%	9%	54%		
V0	1.38	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.4	0.6	3.04	1.173E-03	-8.932E-02	-5.720E-01	2.377E-01	-1.201E-02	0.000E+00	-2.928E-01	7.228E-01			1%	33%	6%	0%	0%	9%	52%		
V0	1.38	G4	0.4	0.6	5.50	1.905E-08	-5.785E-02	-6.219E-01	2.882E-01	4.691E-03	0.000E+00	-2.725E-01	6.727E-01			0%	39%	8%	0%	0%	7%	45%		
V0	1.38	G5	0.4	0.6	7.26	1.917E-13	-4.508E-02	-6.234E-01	2.804E-01	9.008E-03	0.000E+00	-2.735E-01	6.751E-01			0%	39%	8%	0%	0%	7%	46%		
V0	1.38	G1	0.2	0.8	2.76	2.881E-03	-3.777E-02	-6.723E-01	2.056E-02	1.363E-01	0.000E+00	-2.727E-01	6.732E-01	2.71	3.410E-03	0%	45%	0%	2%	0%	7%	45%		
V0	1.38	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.2	0.8	2.83	2.326E-03	-3.699E-02	-6.633E-01	2.176E-01	-1.087E-02	0.000E+00	-2.685E-01	6.626E-01			0%	44%	5%	0%	0%	7%	44%		
V0	1.38	G4	0.2	0.8	5.12	1.531E-07	-2.335E-02	-6.782E-01	2.712E-01	4.294E-03	0.000E+00	-2.563E-01	6.326E-01			0%	46%	7%	0%	0%	7%	40%		
V0	1.38	G5	0.2	0.8	6.79	5.687E-12	-1.808E-02	-6.666E-01	2.681E-01	8.374E-03	0.000E+00	-2.610E-01	6.443E-01			0%	44%	7%	0%	0%	7%	42%		

Quadro B.3 – Resultados exemplo II, série V0 – a/d = 1,38.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇		
V0	1.6	G1	0.8	0.2	3.26	5.547E-04	-2.581E-01	-1.790E-01	2.620E-02	1.751E-01	0.000E+00	-3.502E-01	8.645E-01	3.19	7.190E-04	7%	3%	0%	3%	0%	12%	75%		
V0	1.6	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.8	0.2	3.32	4.456E-04	-2.520E-01	-1.746E-01	2.781E-01	-1.436E-02	0.000E+00	-3.418E-01	8.436E-01			6%	3%	8%	0%	0%	12%	71%		
V0	1.6	G4	0.8	0.2	6.93	2.051E-12	-2.214E-01	-2.165E-01	3.463E-01	8.296E-03	0.000E+00	-3.325E-01	8.207E-01			5%	5%	12%	0%	0%	11%	67%		
V0	1.6	G5	0.8	0.2	9.22	1.543E-20	-1.985E-01	-2.817E-01	3.330E-01	1.332E-02	0.000E+00	-3.297E-01	8.134E-01			4%	8%	11%	0%	0%	11%	66%		
V0	1.6	G1	0.6	0.4	3.17	7.569E-04	-1.701E-01	-4.136E-01	2.473E-02	1.649E-01	0.000E+00	-3.300E-01	8.145E-01	3.10	9.586E-04	3%	17%	0%	3%	0%	11%	66%		
V0	1.6	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.6	0.4	3.24	6.054E-04	-1.665E-01	-4.044E-01	2.625E-01	-1.344E-02	0.000E+00	-3.229E-01	7.971E-01			3%	16%	7%	0%	0%	10%	64%		
V0	1.6	G4	0.6	0.4	6.55	2.897E-11	-1.093E-01	-5.222E-01	3.087E-01	7.017E-03	0.000E+00	-2.957E-01	7.298E-01			1%	27%	10%	0%	0%	9%	53%		
V0	1.6	G5	0.6	0.4	8.57	5.264E-18	-8.617E-02	-5.446E-01	2.971E-01	1.110E-02	0.000E+00	-2.927E-01	7.224E-01			1%	30%	9%	0%	0%	9%	52%		
V0	1.6	G1	0.4	0.6	2.97	1.467E-03	-9.115E-02	-5.815E-01	2.242E-02	1.490E-01	0.000E+00	-2.982E-01	7.361E-01	2.91	1.790E-03	1%	34%	0%	2%	0%	9%	54%		
V0	1.6	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.4	0.6	3.04	1.175E-03	-8.933E-02	-5.720E-01	2.377E-01	-1.201E-02	0.000E+00	-2.928E-01	7.228E-01			1%	33%	6%	0%	0%	9%	52%		
V0	1.6	G4	0.4	0.6	6.06	6.740E-10	-5.311E-02	-6.250E-01	2.847E-01	6.214E-03	0.000E+00	-2.722E-01	6.719E-01			0%	39%	8%	0%	0%	7%	45%		
V0	1.6	G5	0.4	0.6	7.94	1.026E-15	-4.149E-02	-6.194E-01	2.799E-01	1.003E-02	0.000E+00	-2.749E-01	6.787E-01			0%	38%	8%	0%	0%	8%	46%		
V0	1.6	G1	0.2	0.8	2.76	2.885E-03	-3.777E-02	-6.723E-01	2.056E-02	1.363E-01	0.000E+00	-2.727E-01	6.732E-01	2.71	3.414E-03	0%	45%	0%	2%	0%	7%	45%		
V0	1.6	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.2	0.8	2.83	2.329E-03	-3.699E-02	-6.633E-01	2.176E-01	-1.087E-02	0.000E+00	-2.685E-01	6.627E-01			0%	44%	5%	0%	0%	7%	44%		
V0	1.6	G4	0.2	0.8	5.65	8.063E-09	-2.139E-02	-6.762E-01	2.694E-01	5.721E-03	0.000E+00	-2.573E-01	6.351E-01			0%	46%	7%	0%	0%	7%	40%		
V0	1.6	G5	0.2	0.8	7.44	5.224E-14	-1.661E-02	-6.592E-01	2.689E-01	9.357E-03	0.000E+00	-2.636E-01	6.506E-01			0%	43%	7%	0%	0%	7%	42%		

Quadro B.4 – Resultados exemplo II, série V0 – a/d = 1,60.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇
VS	0.74	G1	0.8	0.2	8.94	1.964E-19	-2.058E-01	-2.981E-01	2.510E-02	1.723E-01	0.000E+00	-3.440E-01	8.486E-01	3.13	8.767E-04	4%	9%	0%	3%	0%	12%	72%
VS	0.74	G2	0.8	0.2	3.13	8.767E-04	-2.597E-01	-1.785E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.600E-01	-3.513E-01	8.670E-01			7%	3%	0%	0%	3%	12%	75%
VS	0.74	G3	0.8	0.2	7.06	8.476E-13	-2.240E-01	-2.276E-01	2.810E-01	-1.648E-02	0.000E+00	-3.398E-01	8.387E-01			5%	5%	8%	0%	0%	12%	70%
VS	0.74	G4	0.8	0.2	6.68	1.195E-11	-2.221E-01	-2.085E-01	3.671E-01	-3.238E-03	0.000E+00	-3.300E-01	8.146E-01			5%	4%	13%	0%	0%	11%	66%
VS	0.74	G5	0.8	0.2	8.12	2.403E-16	-2.106E-01	-2.446E-01	3.467E-01	7.107E-03	0.000E+00	-3.307E-01	8.162E-01			4%	6%	12%	0%	0%	11%	67%
VS	0.74	G1	0.6	0.4	8.26	7.287E-17	-8.936E-02	-5.636E-01	2.237E-02	1.516E-01	0.000E+00	-3.029E-01	7.477E-01	3.05	1.157E-03	1%	32%	0%	2%	0%	9%	56%
VS	0.74	G2	0.6	0.4	3.05	1.157E-03	-1.724E-01	-4.092E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.510E-01	-3.316E-01	8.185E-01			3%	17%	0%	0%	2%	11%	67%
VS	0.74	G3	0.6	0.4	6.64	1.618E-11	-1.084E-01	-5.358E-01	2.472E-01	-1.397E-02	0.000E+00	-3.004E-01	7.414E-01			1%	29%	6%	0%	0%	9%	55%
VS	0.74	G4	0.6	0.4	6.33	1.221E-10	-1.123E-01	-5.132E-01	3.278E-01	-2.818E-03	0.000E+00	-2.948E-01	7.277E-01			1%	26%	11%	0%	0%	9%	53%
VS	0.74	G5	0.6	0.4	7.60	1.496E-14	-9.605E-02	-5.369E-01	3.077E-01	5.913E-03	0.000E+00	-2.927E-01	7.225E-01			1%	29%	9%	0%	0%	9%	

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇
VS	0,96	G1	0,8	0,2	6,94	1,932E-12	-2,292E-01	-2,350E-01	2,577E-02	1,743E-01	0,000E+00	-3,484E-01	8,601E-01	3,13	8,735E-04	5%	6%	0%	3%	0%	12%	74%
VS	0,96	G2	0,8	0,2	3,13	8,735E-04	-2,597E-01	-1,785E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,600E-01	-3,513E-01	8,670E-01			7%	3%	0%	0%	3%	12%	75%
VS	0,96	G3	0,8	0,2	6,02	8,466E-10	-2,327E-01	-2,069E-01	2,807E-01	-1,595E-02	0,000E+00	-3,408E-01	8,413E-01			5%	4%	8%	0%	0%	12%	71%
VS	0,96	G4	0,8	0,2	6,23	2,278E-10	-2,259E-01	-2,019E-01	3,601E-01	8,917E-04	0,000E+00	-3,313E-01	8,178E-01			5%	4%	13%	0%	0%	11%	67%
VS	0,96	G5	0,8	0,2	8,12	2,380E-16	-2,107E-01	-2,454E-01	3,429E-01	9,254E-03	0,000E+00	-3,311E-01	8,174E-01			4%	6%	12%	0%	0%	11%	67%
VS	0,96	G1	0,6	0,4	6,51	3,840E-11	-1,106E-01	-5,463E-01	2,285E-02	1,531E-01	0,000E+00	-3,063E-01	7,560E-01	3,05	1,153E-03	1%	30%	0%	2%	0%	9%	57%
VS	0,96	G2	0,6	0,4	3,05	1,153E-03	-1,724E-01	-4,093E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,510E-01	-3,316E-01	8,185E-01			3%	17%	0%	0%	2%	11%	67%
VS	0,96	G3	0,6	0,4	5,72	5,388E-09	-1,227E-01	-5,132E-01	2,501E-01	-1,381E-02	0,000E+00	-3,048E-01	7,523E-01			2%	26%	6%	0%	0%	9%	57%
VS	0,96	G4	0,6	0,4	5,93	1,529E-09	-1,186E-01	-5,041E-01	3,234E-01	7,241E-04	0,000E+00	-2,974E-01	7,340E-01			1%	25%	10%	0%	0%	9%	54%
VS	0,96	G5	0,6	0,4	7,60	1,505E-14	-9,607E-02	-5,376E-01	3,044E-01	7,714E-03	0,000E+00	-2,930E-01	7,233E-01			1%	29%	9%	0%	0%	9%	52%
VS	0,96	G1	0,4	0,6	5,99	1,060E-09	-5,388E-02	-6,455E-01	2,110E-02	1,405E-01	0,000E+00	-2,810E-01	6,937E-01	2,86	2,112E-03	0%	42%	0%	2%	0%	8%	48%
VS	0,96	G2	0,4	0,6	2,86	2,112E-03	-9,311E-02	-5,778E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,367E-01	-3,001E-01	7,408E-01			1%	33%	0%	0%	2%	9%	55%
VS	0,96	G3	0,4	0,6	5,28	6,302E-08	-6,001E-02	-6,315E-01	2,269E-01	-1,223E-02	0,000E+00	-2,774E-01	6,848E-01			0%	40%	5%	0%	0%	8%	47%
VS	0,96	G4	0,4	0,6	5,50	1,948E-08	-5,787E-02	-6,203E-01	2,958E-01	6,048E-04	0,000E+00	-2,719E-01	6,711E-01			0%	38%	9%	0%	0%	7%	45%
VS	0,96	G5	0,4	0,6	7,03	1,014E-12	-4,642E-02	-6,238E-01	2,840E-01	6,902E-03	0,000E+00	-2,728E-01	6,735E-01			0%	39%	8%	0%	0%	7%	45%
VS	0,96	G1	0,2	0,8	5,56	1,367E-08	-2,177E-02	-6,954E-01	1,998E-02	1,324E-01	0,000E+00	-2,650E-01	6,540E-01	2,66	3,955E-03	0%	48%	0%	2%	0%	7%	43%
VS	0,96	G2	0,2	0,8	2,66	3,955E-03	-3,869E-02	-6,705E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,249E-01	-2,742E-01	6,769E-01			0%	45%	0%	0%	2%	8%	46%
VS	0,96	G3	0,2	0,8	4,91	4,626E-07	-2,428E-02	-6,888E-01	2,123E-01	-1,124E-02	0,000E+00	-2,601E-01	6,419E-01			0%	47%	5%	0%	0%	7%	41%
VS	0,96	G4	0,2	0,8	5,12	1,548E-07	-2,335E-02	-6,769E-01	2,783E-01	5,340E-04	0,000E+00	-2,557E-01	6,312E-01			0%	46%	8%	0%	0%	7%	40%
VS	0,96	G5	0,2	0,8	6,57	2,505E-11	-1,863E-02	-6,684E-01	2,710E-01	6,400E-03	0,000E+00	-2,600E-01	6,418E-01			0%	45%	7%	0%	0%	7%	41%

Quadro B.6 – Resultados exemplo II, série VS – a/d = 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇
VS	1,38	G1	0,8	0,2	4,10	2,082E-05	-2,521E-01	-1,874E-01	2,643E-02	1,750E-01	0,000E+00	-3,502E-01	8,645E-01	3,13	8,707E-04	6%	4%	0%	3%	0%	12%	75%
VS	1,38	G2	0,8	0,2	3,13	8,778E-04	-2,597E-01	-1,785E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,600E-01	-3,513E-01	8,670E-01			7%	3%	0%	0%	3%	12%	75%
VS	1,38	G3	0,8	0,2	4,24	1,126E-05	-2,457E-01	-1,831E-01	2,794E-01	-1,503E-02	0,000E+00	-3,416E-01	8,433E-01			6%	3%	8%	0%	0%	12%	71%
VS	1,38	G4	0,8	0,2	5,73	5,168E-09	-2,303E-01	-1,951E-01	3,507E-01	6,362E-03	0,000E+00	-3,329E-01	8,216E-01			5%	4%	12%	0%	0%	11%	68%
VS	1,38	G5	0,8	0,2	8,08	3,139E-16	-2,113E-01	-2,454E-01	3,377E-01	1,218E-02	0,000E+00	-3,318E-01	8,191E-01			4%	6%	11%	0%	0%	11%	67%
VS	1,38	G1	0,6	0,4	3,95	3,849E-05	-1,562E-01	-4,521E-01	2,452E-02	1,618E-01	0,000E+00	-3,240E-01	7,997E-01	3,05	1,144E-03	2%	20%	0%	3%	0%	10%	64%
VS	1,38	G2	0,6	0,4	3,05	1,158E-03	-1,724E-01	-4,092E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,510E-01	-3,316E-01	8,186E-01			3%	17%	0%	0%	2%	11%	67%
VS	1,38	G3	0,6	0,4	4,09	2,125E-05	-1,519E-01	-4,453E-01	2,586E-01	-1,372E-02	0,000E+00	-3,167E-01	7,818E-01			2%	20%	7%	0%	0%	10%	61%
VS	1,38	G4	0,6	0,4	5,47	2,283E-08	-1,262E-01	-4,913E-01	3,174E-01	5,539E-03	0,000E+00	-3,009E-01	7,426E-01			2%	24%	10%	0%	0%	9%	55%
VS	1,38	G5	0,6	0,4	7,57	1,929E-14	-9,645E-02	-5,382E-01	2,999E-01	1,018E-02	0,000E+00	-2,935E-01	7,245E-01			1%	29%	9%	0%	0%	9%	52%
VS	1,38	G1	0,4	0,6	3,68	1,176E-04	-8,004E-02	-6,102E-01	2,210E-02	1,452E-01	0,000E+00	-2,908E-01	7,178E-01	2,87	2,069E-03	1%	37%	0%	2%	0%	8%	52%
VS	1,38	G2	0,4	0,6	2,86	2,120E-03	-9,313E-02	-5,778E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,367E-01	-3,001E-01	7,408E-01			1%	33%	0%	0%	2%	9%	55%
VS	1,38	G3	0,4	0,6	3,82	6,780E-05	-7,762E-02	-6,023E-01	2,323E-01	-1,210E-02	0,000E+00	-2,852E-01	7,040E-01			1%	36%	5%	0%	0%	8%	50%
VS	1,38	G4	0,4	0,6	5,07	1,961E-07	-6,198E-02	-6,178E-01	2,890E-01	4,854E-03	0,000E+00	-2,736E-01	6,753E-01			0%	38%	8%	0%	0%	7%	46%
VS	1,38	G5	0,4	0,6	7,00	1,269E-12	-4,662E-02	-6,247E-01	2,798E-01	9,124E-03	0,000E+00	-2,732E-01	6,742E-01			0%	39%	8%	0%	0%	7%	45%
VS	1,38	G1	0,2	0,8	3,41	3,302E-04	-3,276E-02	-6,880E-01	2,039E-02	1,335E-01	0,000E+00	-2,674E-01	6,601E-01	2,67	3,809E-03	0%	47%	0%	2%	0%	7%	44%
VS	1,38	G2	0,2	0,8	2,65	3,968E-03	-3,870E-02	-6,704E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,249E-01	-2,742E-01	6,769E-01			0%	45%	0%	0%	2%	8%	46%
VS	1,38	G3	0,2	0,8	4,91	1,991E-04	-3,171E-02	-6,797E-01	2,140E-01	-1,099E-02	0,000E+00	-2,631E-01	6,495E-01			0%	46%	5%	0%	0%	7%	42%
VS	1,38	G4	0,2	0,8	4,72	1,184E-06	-2,506E-02	-6,787E-01	2,708E-01	4,430E-03	0,000E+00	-2,562E-01	6,323E-01			0%	46%	7%	0%	0%	7%	40%
VS	1,38	G5	0,2	0,8	6,54	3,079E-11	-1,872E-02	-6,694E-01	2,670E-01	8,468E-03	0,000E+00	-2,602E-01	6,423E-01			0%	45%	7%	0%	0%	7%	41%

Quadro B.7 – Resultados exemplo II, série VS – a/d = 1,38.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇
VS	1,6	G1	0,8	0,2	3,26	5,530E-04	-2,581E-01	-1,791E-01	2,658E-02	1,749E-01	0,000E+00	-3,502E-01	8,645E-01	3,26	5,540E-04	7%	3%	0%	3%	0%	12%	75%
VS	1,6	G2	0,8	0,2	3,38	3,680E-04	-2,580E-01	-1,807E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,600E-01	-3,513E-01	8,671E-01			7%	3%	0%	0%	3%	12%	75%
VS	1,6	G3	0,8	0,2	3,72	9,981E-05	-2,493E-01	-1,780E-01	2,789E-01	-1,477E-02	0,000E+00	-3,417E-01	8,435E-01			6%	3%	8%	0%	0%	12%	71%
VS	1,6	G4	0,8	0,2	5,82	2,912E-09	-2,299E-01	-1,969E-01	3,473E-01	8,201E-03	0,000E+00	-3,332E-01	8,226E-01			5%	4%	12%	0%	0%	11%	68%
VS	1,6	G5	0,8	0,2	8,31	4,738E-17	-2,090E-01	-2,526E-01	3,353E-01	1,323E-02	0,000E+00	-3,316E-01	8,185E-01			4%	6%	11%	0%	0%	11%	67%
VS	1,6	G1	0,6	0,4	3,17	7,549E-04	-1,700E-01	-4,136E-01	2,509E-02	1,648E-01	0,000E+00	-3,300E-01	8,145E-01	3,18	7,317E-04	3%	17%	0%	3%	0%	11%	66%
VS	1,6	G2	0,6	0,4	3,28	5,208E-04	-1,686E-01	-4,201E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,503E-01	-3,300E-01	8,146E-01			3%	18%	0%	0%	2%	11%	66%
VS	1,6	G3	0,6	0,4	3,61	1,533E-04	-1,604E-01	-4,217E-01	2,612E-01	-1,369E-02	0,000E+00	-3,204E-01	7,908E-01			3%	18%	7%	0%	0%	10%	63%
VS	1,6	G4	0,6	0,4	5,55	1,398E-08	-1,248E-01	-4,950E-01	3,138E-01	7,132E-03	0,000E+00	-3,006E-01	7,420E-01			2%	25%	10%	0%	0%	9%	55%
VS	1,6	G5	0,6	0,4	7,77	4,047E-15	-9,422E-02	-5,403E-01	2,979E-01	1,105E-02	0,000E+00	-2,933E-01	7,241E-01			1%	29%	9%	0%	0%	9%	52%
VS	1,6	G1	0,4	0,6	2,98	1,464E-03	-9,114E-02	-5,816E-01	2,275E-02	1,489E-01	0,000E+00	-2,982E-01	7,361E-01	3,01	1,327E-03	1%	34%	0%	2%	0%	9%	54%
VS	1,6	G2	0,4	0,6	3,07	1,070E-03	-8,969E-02	-5,874E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,356E-01	-2,977E-01	7,348E-01			1%	35%	0%	0%	2%	9%	54%
VS	1,6	G3	0,4	0,6	3,38	3,624E-04	-8,407E-02	-5,864E-01	2,354E-01	-1,214E-02	0,											

As Figuras B.1 e B.2 apresentam a variação dos fatores de importância em relação ao percentual de carga variável, para cada função de falha, para cada razão a/d , para as vigas da série V0 e VS, referentes ao exemplo II.

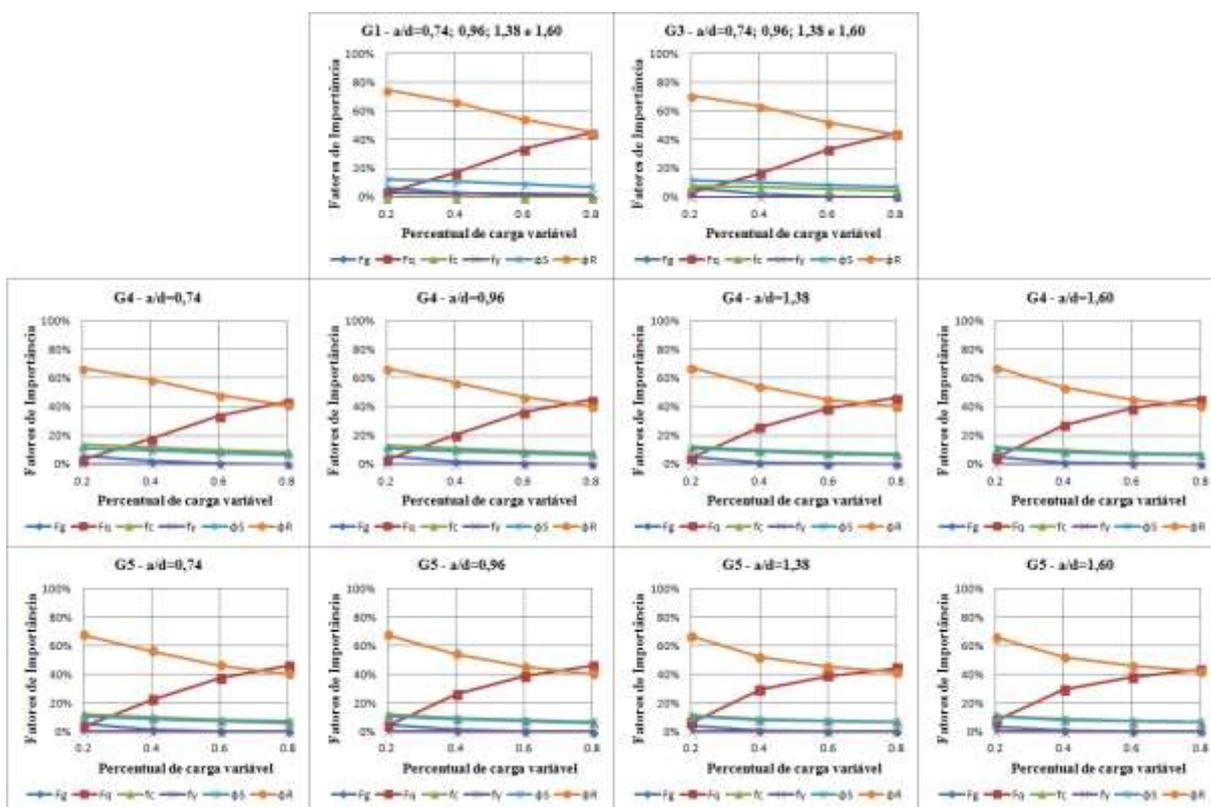


Figura B.1 – Variação dos fatores de importância em relação ao percentual de carga variável, série V0.

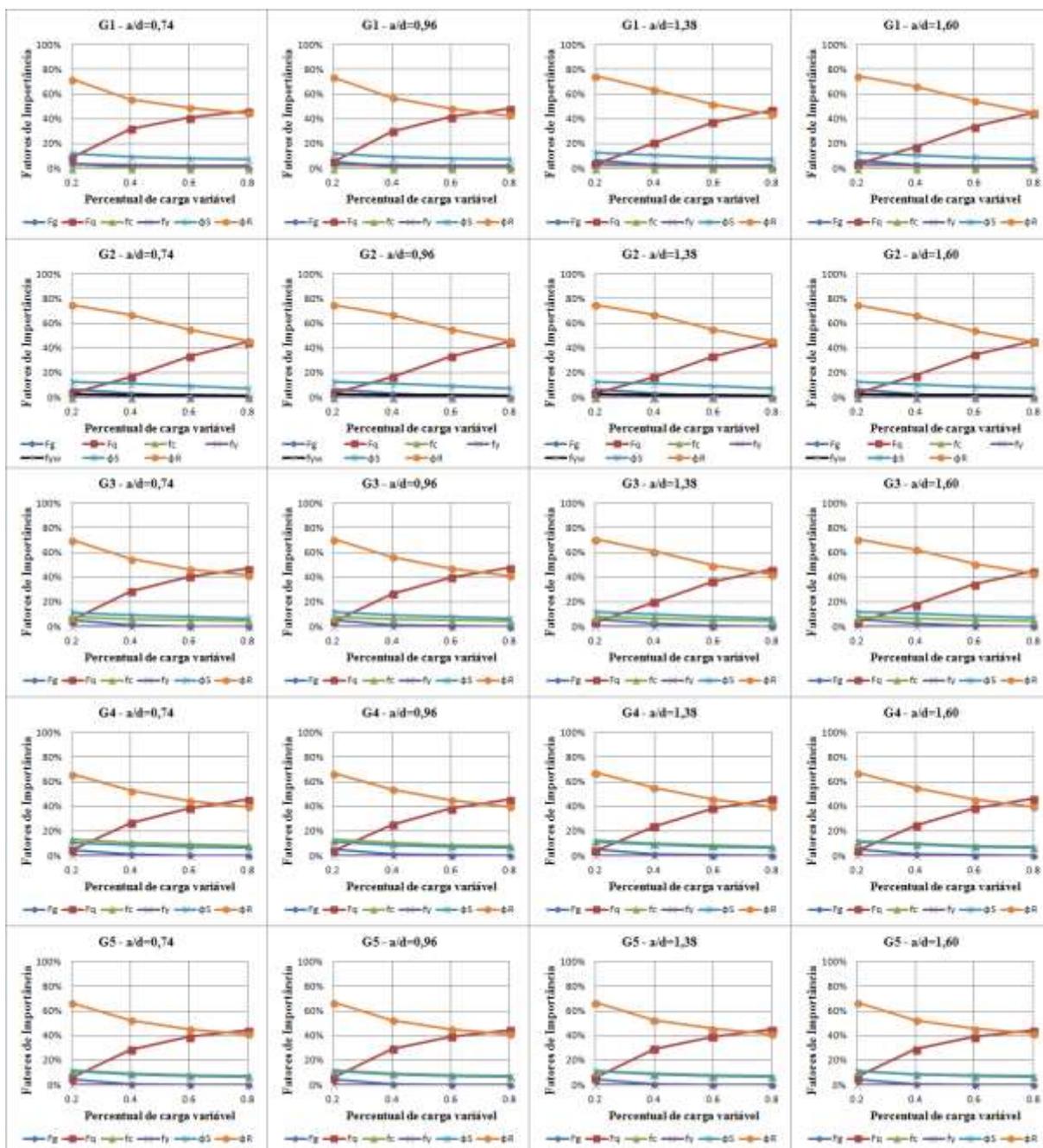


Figura B.2 – Variação dos fatores de importância em relação ao percentual de carga variável, série VS.

ANEXO – C

Os Quadros C.1 à C.12 apresentam os resultados para o exemplo III, obtidos da análise das vigas curtas das séries V0 e VS, quando da consideração da resistência do concreto e da tensão de escoamento dos aços como variáveis aleatórias com distribuição normal.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{f,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	
V0	0.74	G1	0.8	0.2	3.27	5.440E-04	-2.578E-01	-1.789E-01	2.633E-02	1.808E-01	0.000E+00	-3.499E-01	8.636E-01	3.20	6.989E-04	7%	3%	0%	3%	0%	12%	75%	
V0	0.74	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.8	0.2	3.32	4.467E-04	-2.495E-01	-1.724E-01	3.117E-01	-1.441E-02	0.000E+00	-3.381E-01	8.345E-01			6%	3%	10%	0%	0%	11%	70%	
V0	0.74	G4	0.8	0.2	3.96	3.757E-05	-2.331E-01	-1.663E-01	4.405E-01	-3.182E-03	0.000E+00	-3.195E-01	7.886E-01			5%	3%	19%	0%	0%	10%	62%	
V0	0.74	G5	0.8	0.2	5.13	1.456E-07	-2.253E-01	-1.762E-01	4.477E-01	6.469E-03	0.000E+00	-3.181E-01	7.852E-01			5%	3%	20%	0%	0%	10%	62%	
V0	0.74	G1	0.6	0.4	3.18	7.429E-04	-1.699E-01	-4.133E-01	2.485E-02	1.699E-01	0.000E+00	-3.297E-01	8.137E-01	3.12	9.166E-04	3%	17%	0%	3%	0%	11%	66%	
V0	0.74	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.6	0.4	3.24	6.015E-04	-1.655E-01	-3.998E-01	2.916E-01	-1.348E-02	0.000E+00	-3.203E-01	7.906E-01			3%	16%	9%	0%	0%	10%	63%	
V0	0.74	G4	0.6	0.4	3.86	5.775E-05	-1.512E-01	-4.004E-01	4.080E-01	-2.969E-03	0.000E+00	-3.028E-01	7.474E-01			2%	16%	17%	0%	0%	9%	56%	
V0	0.74	G5	0.6	0.4	4.95	3.742E-07	-1.337E-01	-4.494E-01	3.986E-01	5.695E-03	0.000E+00	-2.959E-01	7.305E-01			2%	20%	16%	0%	0%	9%	53%	
V0	0.74	G1	0.4	0.6	2.98	1.442E-03	-9.104E-02	-5.814E-01	2.251E-02	1.528E-01	0.000E+00	-2.980E-01	7.356E-01	2.94	1.659E-03	1%	34%	0%	2%	0%	9%	54%	
V0	0.74	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.4	0.6	3.05	1.155E-03	-8.899E-02	-5.681E-01	2.598E-01	-1.202E-02	0.000E+00	-2.913E-01	7.189E-01			1%	32%	7%	0%	0%	8%	52%	
V0	0.74	G4	0.4	0.6	3.63	1.420E-04	-7.919E-02	-5.667E-01	3.599E-01	-2.647E-03	0.000E+00	-2.767E-01	6.830E-01			1%	32%	13%	0%	0%	8%	47%	
V0	0.74	G5	0.4	0.6	4.62	1.910E-06	-6.663E-02	-5.968E-01	3.472E-01	4.902E-03	0.000E+00	-2.705E-01	6.676E-01			0%	36%	12%	0%	0%	7%	45%	
V0	0.74	G1	0.2	0.8	2.77	2.841E-03	-3.772E-02	-6.722E-01	2.063E-02	1.392E-01	0.000E+00	-2.726E-01	6.728E-01	2.74	3.062E-03	0%	45%	0%	2%	0%	7%	45%	
V0	0.74	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.2	0.8	2.84	2.280E-03	-3.688E-02	-6.605E-01	2.346E-01	-1.086E-02	0.000E+00	-2.674E-01	6.601E-01			0%	44%	6%	0%	0%	7%	44%	
V0	0.74	G4	0.2	0.8	3.39	3.523E-04	-3.247E-02	-6.535E-01	3.249E-01	-2.407E-03	0.000E+00	-2.564E-01	6.329E-01			0%	43%	11%	0%	0%	7%	40%	
V0	0.74	G5	0.2	0.8	4.31	8.263E-06	-2.700E-02	-6.674E-01	3.151E-01	4.416E-03	0.000E+00	-2.531E-01	6.248E-01			0%	45%	10%	0%	0%	6%	39%	

Quadro C.1 – Resultados exemplo III, série V0 – a/d = 0,74.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{f,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	
V0	0.96	G1	0.8	0.2	3.27	5.455E-04	-2.578E-01	-1.789E-01	2.633E-02	1.808E-01	0.000E+00	-3.499E-01	8.636E-01	3.18	7.310E-04	7%	3%	0%	3%	0%	12%	75%	
V0	0.96	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.96	G3	0.8	0.2	3.32	4.480E-04	-2.495E-01	-1.724E-01	3.117E-01	-1.440E-02	0.000E+00	-3.381E-01	8.345E-01			6%	3%	10%	0%	0%	11%	70%	
V0	0.96	G4	0.8	0.2	4.69	1.354E-06	-2.276E-01	-1.715E-01	4.509E-01	6.449E-04	0.000E+00	-3.176E-01	7.840E-01			5%	3%	20%	0%	0%	10%	61%	
V0	0.96	G5	0.8	0.2	6.29	1.604E-10	-2.145E-01	-1.850E-01	4.810E-01	9.509E-03	0.000E+00	-3.115E-01	7.690E-01			5%	3%	23%	0%	0%	10%	59%	
V0	0.96	G1	0.6	0.4	3.18	7.448E-04	-1.699E-01	-4.133E-01	2.485E-02	1.699E-01	0.000E+00	-3.297E-01	8.137E-01	3.10	9.671E-04	3%	17%	0%	3%	0%	11%	66%	
V0	0.96	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.96	G3	0.6	0.4	3.24	6.030E-04	-1.655E-01	-3.997E-01	2.916E-01	-1.348E-02	0.000E+00	-3.203E-01	7.906E-01			3%	16%	9%	0%	0%	10%	63%	
V0	0.96	G4	0.6	0.4	4.54	2.759E-06	-1.401E-01	-4.299E-01	4.079E-01	5.342E-04	0.000E+00	-2.978E-01	7.352E-01			2%	18%	17%	0%	0%	9%	54%	
V0	0.96	G5	0.6	0.4	6.02	8.776E-10	-1.163E-01	-4.825E-01	4.092E-01	7.904E-03	0.000E+00	-2.875E-01	7.096E-01			1%	23%	17%	0%	0%	8%	50%	
V0	0.96	G1	0.4	0.6	2.98	1.445E-03	-9.106E-02	-5.813E-01	2.251E-02	1.528E-01	0.000E+00	-2.980E-01	7.356E-01	2.91	1.785E-03	1%	34%	0%	2%	0%	9%	54%	
V0	0.96	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.96	G3	0.4	0.6	3.05	1.157E-03	-8.900E-02	-5.681E-01	2.598E-01	-1.202E-02	0.000E+00	-2.913E-01	7.189E-01			1%	32%	7%	0%	0%	8%	52%	
V0	0.96	G4	0.4	0.6	4.26	1.042E-05	-7.093E-02	-5.864E-01	3.560E-01	4.154E-04	0.000E+00	-2.719E-01	6.711E-01			1%	34%	13%	0%	0%	7%	45%	
V0	0.96	G5	0.4	0.6	5.60	1.051E-08	-5.674E-02	-6.070E-01	3.550E-01	6.745E-03	0.000E+00	-2.661E-01	6.569E-01			0%	37%	13%	0%	0%	7%	43%	
V0	0.96	G1	0.2	0.8	2.77	2.846E-03	-3.773E-02	-6.722E-01	2.063E-02	1.392E-01	0.000E+00	-2.726E-01	6.728E-01	2.71	3.371E-03	0%	45%	0%	2%	0%	7%	45%	
V0	0.96	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.96	G3	0.2	0.8	2.84	2.284E-03	-3.688E-02	-6.605E-01	2.346E-01	-1.086E-02	0.000E+00	-2.674E-01	6.601E-01			0%	44%	6%	0%	0%	7%	44%	
V0	0.96	G4	0.2	0.8	3.97	3.617E-05	-2.884E-02	-6.629E-01	3.221E-01	3.465E-04	0.000E+00	-2.536E-01	6.259E-01			0%	44%	10%	0%	0%	6%	39%	
V0	0.96	G5	0.2	0.8	5.23	8.415E-08	-2.286E-02	-6.667E-01	3.235E-01	6.089E-03	0.000E+00	-2.520E-01	6.219E-01			0%	44%	10%	0%	0%	6%	39%	

Quadro C.2 – Resultados exemplo III, série V0 – a/d = 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇		
V0	1.38	G1	0.8	0.2	3.27	5.451E-04	-2.578E-01	-1.789E-01	2.633E-02	1.808E-01	0.000E+00	-3.499E-01	8.636E-01	3.18	7.317E-04	7%	3%	0%	3%	0%	12%	75%		
V0	1.38	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.8	0.2	3.32	4.476E-04	-2.495E-01	-1.724E-01	3.117E-01	-1.440E-02	0.000E+00	-3.381E-01	8.345E-01			6%	3%	10%	0%	0%	11%	70%		
V0	1.38	G4	0.8	0.2	6.11	4.915E-10	-2.155E-01	-1.825E-01	4.820E-01	7.070E-03	0.000E+00	-3.114E-01	7.687E-01			5%	3%	23%	0%	0%	10%	59%		
V0	1.38	G5	0.8	0.2	8.10	2.806E-16	-1.919E-01	-1.909E-01	5.767E-01	1.705E-02	0.000E+00	-2.894E-01	7.143E-01			4%	4%	33%	0%	0%	8%	51%		
V0	1.38	G1	0.6	0.4	3.18	7.442E-04	-1.699E-01	-4.133E-01	2.485E-02	1.699E-01	0.000E+00	-3.297E-01	8.137E-01	3.10	9.691E-04	3%	17%	0%	3%	0%	11%	66%		
V0	1.38	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.6	0.4	3.24	6.025E-04	-1.655E-01	-3.997E-01	2.916E-01	-1.348E-02	0.000E+00	-3.203E-01	7.906E-01			3%	16%	9%	0%	0%	10%	63%		
V0	1.38	G4	0.6	0.4	5.86	2.323E-09	-1.189E-01	-4.761E-01	4.133E-01	5.886E-03	0.000E+00	-2.880E-01	7.109E-01			1%	23%	17%	0%	0%	8%	51%		
V0	1.38	G5	0.6	0.4	7.70	6.992E-15	-9.433E-02	-5.020E-01	4.443E-01	1.210E-02	0.000E+00	-2.763E-01	6.821E-01			1%	25%	20%	0%	0%	8%	47%		
V0	1.38	G1	0.4	0.6	2.98	1.445E-03	-9.105E-02	-5.813E-01	2.251E-02	1.528E-01	0.000E+00	-2.980E-01	7.356E-01	2.91	1.794E-03	1%	34%	0%	2%	0%	9%	54%		
V0	1.38	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.4	0.6	3.05	1.157E-03	-8.900E-02	-5.681E-01	2.598E-01	-1.202E-02	0.000E+00	-2.913E-01	7.189E-01			1%	32%	7%	0%	0%	8%	52%		
V0	1.38	G4	0.4	0.6	5.46	2.407E-08	-5.803E-02	-6.051E-01	3.578E-01	4.976E-03	0.000E+00	-2.661E-01	6.569E-01			0%	37%	13%	0%	0%	7%	43%		
V0	1.38	G5	0.4	0.6	7.17	3.673E-13	-4.545E-02	-6.017E-01	3.818E-01	1.009E-02	0.000E+00	-2.628E-01	6.488E-01			0%	36%	15%	0%	0%	7%	42%		
V0	1.38	G1	0.2	0.8	2.77	2.844E-03	-3.773E-02	-6.722E-01	2.063E-02	1.392E-01	0.000E+00	-2.726E-01	6.728E-01	2.71	3.405E-03	0%	45%	0%	2%	0%	7%	45%		
V0	1.38	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.2	0.8	2.84	2.283E-03	-3.688E-02	-6.605E-01	2.346E-01	-1.086E-02	0.000E+00	-2.674E-01	6.601E-01			0%	44%	6%	0%	0%	7%	44%		
V0	1.38	G4	0.2	0.8	5.09	1.744E-07	-2.340E-02	-6.665E-01	3.257E-01	4.470E-03	0.000E+00	-2.517E-01	6.212E-01			0%	44%	11%	0%	0%	6%	39%		
V0	1.38	G5	0.2	0.8	6.73	8.589E-12	-1.819E-02	-6.511E-01	3.480E-01	9.066E-03	0.000E+00	-2.532E-01	6.249E-01			0%	42%	12%	0%	0%	6%	39%		

Quadro C.3 – Resultados exemplo III, série V0 – a/d = 1,38.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇		
V0	1.6	G1	0.8	0.2	3.27	5.461E-04	-2.578E-01	-1.789E-01	2.633E-02	1.808E-01	0.000E+00	-3.499E-01	8.636E-01	3.18	7.330E-04	7%	3%	0%	3%	0%	12%	75%		
V0	1.6	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.8	0.2	3.32	4.484E-04	-2.495E-01	-1.724E-01	3.117E-01	-1.440E-02	0.000E+00	-3.381E-01	8.345E-01			6%	3%	10%	0%	0%	11%	70%		
V0	1.6	G4	0.8	0.2	6.76	6.960E-12	-2.091E-01	-1.874E-01	5.032E-01	9.855E-03	0.000E+00	-3.069E-01	7.575E-01			4%	4%	25%	0%	0%	9%	57%		
V0	1.6	G5	0.8	0.2	8.80	7.043E-19	-1.756E-01	-1.736E-01	6.652E-01	2.464E-02	0.000E+00	-2.644E-01	6.527E-01			3%	3%	44%	0%	0%	7%	43%		
V0	1.6	G1	0.6	0.4	3.18	7.455E-04	-1.699E-01	-4.133E-01	2.485E-02	1.699E-01	0.000E+00	-3.297E-01	8.137E-01	3.10	9.707E-04	3%	17%	0%	3%	0%	11%	66%		
V0	1.6	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.6	0.4	3.24	6.036E-04	-1.655E-01	-3.997E-01	2.916E-01	-1.348E-02	0.000E+00	-3.203E-01	7.906E-01			3%	16%	9%	0%	0%	10%	63%		
V0	1.6	G4	0.6	0.4	6.45	5.450E-11	-1.099E-01	-4.901E-01	4.192E-01	7.905E-03	0.000E+00	-2.840E-01	7.009E-01			1%	24%	18%	0%	0%	8%	49%		
V0	1.6	G5	0.6	0.4	8.38	2.717E-17	-8.734E-02	-4.989E-01	4.713E-01	1.437E-02	0.000E+00	-2.710E-01	6.690E-01			1%	25%	22%	0%	0%	7%	45%		
V0	1.6	G1	0.4	0.6	2.98	1.447E-03	-9.106E-02	-5.813E-01	2.251E-02	1.528E-01	0.000E+00	-2.980E-01	7.356E-01	2.91	1.796E-03	1%	34%	0%	2%	0%	9%	54%		
V0	1.6	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.4	0.6	3.05	1.158E-03	-8.901E-02	-5.681E-01	2.598E-01	-1.202E-02	0.000E+00	-2.913E-01	7.189E-01			1%	32%	7%	0%	0%	8%	52%		
V0	1.6	G4	0.4	0.6	6.01	9.404E-10	-5.337E-02	-6.069E-01	3.629E-01	6.681E-03	0.000E+00	-2.647E-01	6.534E-01			0%	37%	13%	0%	0%	7%	43%		
V0	1.6	G5	0.4	0.6	7.82	2.591E-15	-4.193E-02	-5.944E-01	3.993E-01	1.167E-02	0.000E+00	-2.616E-01	6.457E-01			0%	35%	16%	0%	0%	7%	42%		
V0	1.6	G1	0.2	0.8	2.76	2.848E-03	-3.773E-02	-6.721E-01	2.063E-02	1.392E-01	0.000E+00	-2.726E-01	6.728E-01	2.71	3.409E-03	0%	45%	0%	2%	0%	7%	45%		
V0	1.6	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.2	0.8	2.84	2.286E-03	-3.689E-02	-6.605E-01	2.346E-01	-1.086E-02	0.000E+00	-2.674E-01	6.601E-01			0%	44%	6%	0%	0%	7%	44%		
V0	1.6	G4	0.2	0.8	5.62	9.812E-09	-2.146E-02	-6.635E-01	3.309E-01	6.013E-03	0.000E+00	-2.518E-01	6.216E-01			0%	44%	11%	0%	0%	6%	39%		
V0	1.6	G5	0.2	0.8	7.36	9.543E-14	-1.674E-02	-6.414E-01	3.626E-01	1.040E-02	0.000E+00	-2.538E-01	6.264E-01			0%	41%	13%	0%	0%	6%	39%		

Quadro C.4 – Resultados exemplo III, série V0 – a/d = 1,60.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇
VS	0.74	G1	0.8	0.2	8.93	2.093E-19	-2.056E-01	-2.959E-01	2.529E-02	1.892E-01	0.000E+00	-3.430E-01	8.462E-01	3.13	8.688E-04	4%	9%	0%	4%	0%	12%	72%
VS	0.74	G2	0.8	0.2	3.13	8.688E-04	-2.596E-01	-1.784E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.638E-01	-3.510E-01	8.665E-01			7%	3%	0%	0%	3%	12%	75%
VS	0.74	G3	0.8	0.2	6.97	1.579E-12	-2.178E-01	-2.100E-01	3.934E-01	-1.824E-02	0.000E+00	-3.259E-01	8.045E-01			5%	4%	15%	0%	0%	11%	65%
VS	0.74	G4	0.8	0.2	6.48	4.544E-11	-2.061E-01	-1.765E-01	5.419E-01	-3.282E-03	0.000E+00	-2.987E-01	7.372E-01			4%	3%	29%	0%	0%	9%	54%
VS	0.74	G5	0.8	0.2	7.81	2.802E-15	-1.918E-01	-1.828E-01	5.908E-01	1.012E-02	0.000E+00	-2.861E-01	7.062E-01			4%	3%	35%	0%	0%	8%	50%
VS	0.74	G1	0.6	0.4	8.26	7.418E-17	-8.937E-02	-5.625E-01	2.257E-02	1.633E-01	0.000E+00	-3.024E-01	7.463E-01	3.05	1.147E-03	1%	32%	0%	3%	0%	9%	56%
VS	0.74	G2	0.6	0.4	3.05	1.147E-03	-1.723E-01	-4.091E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.543E-01	-3.314E-01	8.181E-01			3%	17%	0%	0%	2%	11%	67%
VS	0.74	G3	0.6	0.4	6.59	2.150E-11	-1.087E-01	-5.206E-01	3.190E-01	-1.485E-02	0.000E+00	-2.945E-01	7.270E-01			1%	27%	10%	0%	0%	9%	53%
VS	0.74	G4	0.6	0.4	6.22	2.481E-10	-1.127E-01	-4.732E-01	4.529E-01	-2.912E-03	0.000E+00	-2.805E-01	6.925E-01			1%	22%	21%	0%	0%	8%	48%
VS	0.74	G5	0.6	0.4	7.45	4.730E-14	-9.699E-02	-4.950E-01	4.567E-01	7.179E-03	0.000E+00	-2.751E-01	6.791E-01			1%	25%	21%	0%			

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇
VS	0.96	G1	0.8	0.2	6.94	1.958E-12	-2.288E-01	-2.340E-01	2.599E-02	1.872E-01	0.000E+00	-3.476E-01	8.581E-01	3.13	8.657E-04	5%	5%	0%	4%	0%	12%	74%
VS	0.96	G2	0.8	0.2	3.13	8.657E-04	-2.596E-01	-1.784E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.638E-01	-3.510E-01	8.665E-01			7%	3%	0%	0%	3%	12%	75%
VS	0.96	G3	0.8	0.2	5.97	1.164E-09	-2.276E-01	-1.975E-01	3.620E-01	-1.685E-02	0.000E+00	-3.312E-01	8.174E-01			5%	4%	13%	0%	0%	11%	67%
VS	0.96	G4	0.8	0.2	6.09	5.772E-10	-2.134E-01	-1.790E-01	5.018E-01	1.271E-03	0.000E+00	-3.075E-01	7.590E-01			5%	3%	25%	0%	0%	9%	58%
VS	0.96	G5	0.8	0.2	7.83	2.433E-15	-1.939E-01	-1.876E-01	5.736E-01	1.281E-02	0.000E+00	-2.904E-01	7.168E-01			4%	4%	33%	0%	0%	8%	51%
VS	0.96	G1	0.6	0.4	6.51	3.822E-11	-1.105E-01	-5.453E-01	2.305E-02	1.623E-01	0.000E+00	-3.059E-01	7.550E-01	3.05	1.143E-03	1%	30%	0%	3%	0%	9%	57%
VS	0.96	G2	0.6	0.4	3.05	1.143E-03	-1.723E-01	-4.091E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.543E-01	-3.314E-01	8.181E-01			3%	17%	0%	0%	2%	11%	67%
VS	0.96	G3	0.6	0.4	5.69	6.298E-09	-1.227E-01	-5.004E-01	3.078E-01	-1.436E-02	0.000E+00	-3.003E-01	7.412E-01			2%	25%	9%	0%	0%	9%	55%
VS	0.96	G4	0.6	0.4	5.84	2.553E-09	-1.187E-01	-4.709E-01	4.292E-01	9.395E-04	0.000E+00	-2.859E-01	7.058E-01			1%	22%	18%	0%	0%	8%	50%
VS	0.96	G5	0.6	0.4	7.45	4.501E-14	-9.741E-02	-4.966E-01	4.502E-01	9.342E-03	0.000E+00	-2.762E-01	6.818E-01			1%	25%	20%	0%	0%	8%	46%
VS	0.96	G1	0.4	0.6	5.99	1.048E-09	-5.386E-02	-6.449E-01	2.127E-02	1.475E-01	0.000E+00	-2.807E-01	6.930E-01	2.86	2.095E-03	0%	42%	0%	2%	0%	8%	48%
VS	0.96	G2	0.4	0.6	2.86	2.095E-03	-9.305E-02	-5.777E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.392E-01	-3.000E-01	7.404E-01			1%	33%	0%	0%	2%	9%	55%
VS	0.96	G3	0.4	0.6	5.27	6.730E-08	-6.004E-02	-6.242E-01	2.674E-01	-1.250E-02	0.000E+00	-2.747E-01	6.779E-01			0%	39%	7%	0%	0%	8%	46%
VS	0.96	G4	0.4	0.6	5.45	2.530E-08	-5.806E-02	-6.016E-01	3.704E-01	7.140E-04	0.000E+00	-2.648E-01	6.537E-01			0%	36%	14%	0%	0%	7%	43%
VS	0.96	G5	0.4	0.6	6.99	1.852E-12	-4.679E-02	-6.018E-01	3.836E-01	7.699E-03	0.000E+00	-2.624E-01	6.477E-01			0%	36%	15%	0%	0%	7%	42%
VS	0.96	G1	0.2	0.8	5.56	1.348E-08	-2.176E-02	-6.949E-01	2.012E-02	1.381E-01	0.000E+00	-2.648E-01	6.535E-01	2.66	3.926E-03	0%	48%	0%	2%	0%	7%	43%
VS	0.96	G2	0.2	0.8	2.66	3.926E-03	-3.866E-02	-6.703E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.269E-01	-2.741E-01	6.767E-01			0%	45%	0%	0%	2%	8%	46%
VS	0.96	G3	0.2	0.8	4.90	4.750E-07	-2.428E-02	-6.837E-01	2.437E-01	-1.140E-02	0.000E+00	-2.581E-01	6.371E-01			0%	47%	6%	0%	0%	7%	41%
VS	0.96	G4	0.2	0.8	5.09	1.794E-07	-2.341E-02	-6.639E-01	3.363E-01	6.002E-04	0.000E+00	-2.506E-01	6.187E-01			0%	44%	11%	0%	0%	6%	38%
VS	0.96	G5	0.2	0.8	6.51	3.656E-11	-1.875E-02	-6.528E-01	3.493E-01	6.907E-03	0.000E+00	-2.523E-01	6.228E-01			0%	43%	12%	0%	0%	6%	39%

Quadro C.6 – Resultados exemplo III, série VS – a/d = 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇
VS	1.38	G1	0.8	0.2	4.10	2.051E-05	-2.518E-01	-1.871E-01	2.660E-02	1.823E-01	0.000E+00	-3.498E-01	8.633E-01	3.13	8.636E-04	6%	4%	0%	3%	0%	12%	75%
VS	1.38	G2	0.8	0.2	3.13	8.700E-04	-2.596E-01	-1.784E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.638E-01	-3.510E-01	8.665E-01			7%	3%	0%	0%	3%	12%	75%
VS	1.38	G3	0.8	0.2	4.22	1.197E-05	-2.424E-01	-1.795E-01	3.259E-01	-1.524E-02	0.000E+00	-3.364E-01	8.303E-01			6%	3%	11%	0%	0%	11%	69%
VS	1.38	G4	0.8	0.2	5.62	9.368E-09	-2.206E-01	-1.796E-01	4.628E-01	6.978E-03	0.000E+00	-3.152E-01	7.781E-01			5%	3%	21%	0%	0%	10%	61%
VS	1.38	G5	0.8	0.2	7.82	2.613E-15	-1.969E-01	-1.935E-01	5.496E-01	1.621E-02	0.000E+00	-2.960E-01	7.307E-01			4%	4%	30%	0%	0%	9%	53%
VS	1.38	G1	0.6	0.4	3.96	3.790E-05	-1.560E-01	-4.516E-01	2.467E-02	1.678E-01	0.000E+00	-3.236E-01	7.989E-01	3.05	1.135E-03	2%	20%	0%	3%	0%	10%	64%
VS	1.38	G2	0.6	0.4	3.05	1.148E-03	-1.723E-01	-4.091E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.543E-01	-3.314E-01	8.181E-01			3%	17%	0%	0%	2%	11%	67%
VS	1.38	G3	0.6	0.4	4.09	2.190E-05	-1.512E-01	-4.374E-01	2.968E-01	-1.389E-02	0.000E+00	-3.136E-01	7.741E-01			2%	19%	9%	0%	0%	10%	60%
VS	1.38	G4	0.6	0.4	5.41	3.207E-08	-1.260E-01	-4.649E-01	4.044E-01	5.967E-03	0.000E+00	-2.919E-01	7.206E-01			2%	22%	16%	0%	0%	9%	52%
VS	1.38	G5	0.6	0.4	7.43	5.288E-14	-9.732E-02	-5.024E-01	4.335E-01	1.200E-02	0.000E+00	-2.785E-01	6.874E-01			1%	25%	19%	0%	0%	8%	47%
VS	1.38	G1	0.4	0.6	3.68	1.158E-04	-7.997E-02	-6.098E-01	2.222E-02	1.497E-01	0.000E+00	-2.906E-01	7.172E-01	2.87	2.055E-03	1%	37%	0%	2%	0%	8%	51%
VS	1.38	G2	0.4	0.6	2.86	2.103E-03	-9.307E-02	-5.776E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.392E-01	-3.000E-01	7.405E-01			1%	33%	0%	0%	2%	9%	55%
VS	1.38	G3	0.4	0.6	3.82	6.790E-05	-7.745E-02	-5.971E-01	2.601E-01	-1.218E-02	0.000E+00	-2.834E-01	6.995E-01			1%	36%	7%	0%	0%	8%	49%
VS	1.38	G4	0.4	0.6	5.04	2.318E-07	-6.208E-02	-6.024E-01	3.514E-01	5.085E-03	0.000E+00	-2.681E-01	6.617E-01			0%	36%	12%	0%	0%	7%	44%
VS	1.38	G5	0.4	0.6	6.92	2.213E-12	-4.697E-02	-6.044E-01	3.741E-01	1.009E-02	0.000E+00	-2.635E-01	6.504E-01			0%	37%	14%	0%	0%	7%	42%
VS	1.38	G1	0.2	0.8	3.41	3.255E-04	-3.273E-02	-6.877E-01	2.048E-02	1.370E-01	0.000E+00	-2.673E-01	6.598E-01	2.67	3.787E-03	0%	47%	0%	2%	0%	7%	44%
VS	1.38	G2	0.2	0.8	2.66	3.938E-03	-3.867E-02	-6.703E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.269E-01	-2.742E-01	6.767E-01			0%	45%	0%	0%	2%	8%	46%
VS	1.38	G3	0.2	0.8	3.54	1.968E-04	-3.165E-02	-6.761E-01	2.353E-01	-1.103E-02	0.000E+00	-2.619E-01	6.464E-01			0%	46%	6%	0%	0%	7%	42%
VS	1.38	G4	0.2	0.8	4.70	1.293E-06	-2.508E-02	-6.679E-01	3.194E-01	4.571E-03	0.000E+00	-2.522E-01	6.225E-01			0%	45%	10%	0%	0%	6%	39%
VS	1.38	G5	0.2	0.8	6.49	4.362E-11	-1.882E-02	-6.548E-01	3.415E-01	9.087E-03	0.000E+00	-2.530E-01	6.246E-01			0%	43%	12%	0%	0%	6%	39%

Quadro C.7 – Resultados exemplo III, série VS – a/d = 1,38.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{r,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	α ₆	α ₇	β _{sist}	p _{r,sist}	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇
VS	1.6	G1	0.8	0.2	3.27	5.445E-04	-2.578E-01	-1.789E-01	2.672E-02	1.806E-01	0.000E+00	-3.499E-01	8.636E-01	3.26	5.586E-04	7%	3%	0%	3%	0%	12%	75%
VS	1.6	G2	0.8	0.2	3.38	3.647E-04	-2.578E-01	-1.806E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.641E-01	-3.510E-01	8.665E-01			7%	3%	0%	0%	3%	12%	75%
VS	1.6	G3	0.8	0.2	3.71	1.024E-04	-2.464E-01	-1.753E-01	3.178E-01	-1.487E-02	0.000E+00	-3.374E-01	8.328E-01			6%	3%	10%	0%	0%	11%	69%
VS	1.6	G4	0.8	0.2	5.72	5.368E-09	-2.204E-01	-1.811E-01	4.598E-01	8.971E-03	0.000E+00	-3.157E-01	7.794E-01			5%	3%	21%	0%	0%	10%	61%
VS	1.6	G5	0.8	0.2	8.03	4.865E-16	-1.944E-01	-1.944E-01	5.593E-01	1.815E-02	0.000E+00	-2.936E-01	7.246E-01			4%	4%	31%	0%	0%	9%	53%
VS	1.6	G1	0.6	0.4	3.18	7.434E-04	-1.699E-01	-4.133E-01	2.521E-02	1.697E-01	0.000E+00	-3.297E-01	8.137E-01	3.18	7.366E-04	3%	17%	0%	3%	0%	11%	66%
VS	1.6	G2	0.6	0.4	3.28	5.162E-04	-1.685E-01	-4.199E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.538E-01	-3.298E-01	8.142E-01			3%	18%	0%	0%	2%	11%	66%
VS	1.6	G3	0.6	0.4	3.61	1.547E-04	-1.595E-01	-4.157E-01	2.942E-01	-1.377E-02	0.000E+00	-3.175E-01	7.837E-01			3%	17%	9%	0%	0%	10%	61%
VS	1.6	G4	0.6	0.4	5.49	1.975E-08	-1.246E-01	-4.691E-01	4.005E-01	7.665E-03	0.000E+00	-2.918E-01	7.203E-01			2%	22%	16%	0%	0%	9%	52%
VS	1.6	G5	0.6	0.4	7.63	1.207E-14	-9.515E-02	-5.039E-01	4.361E-01	1.318E-02	0.000E+00	-2.776E-01	6.853E-01			1%	25%	19%	0%	0%	8%	47%
VS	1.6	G1	0.4	0.6	2.98	1.443E-03	-9.105E-02	-5.814E-01	2.284E-02	1.527E-01	0.000E+00	-2.980E-01	7.356E-01	3.00	1.334E-03	1%	34%	0%	2%	0%	9%	54%
VS	1.6	G2	0.4	0.6	3.07	1.062E-03	-8.963E-02	-5.872E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.383E-01	-2.976E-01	7.345E-01			1%	34%	0%	0%	2%	9%	54%
VS	1.6	G3	0.4	0.6	3.38	3.594E-04	-8.382E-02	-5.818E-01	2.600E-01	-1.218E												

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _{i,N}	β _{sist,N}	β _{i,LN}	β _{sist,LN}	β _{i,N} / β _{i,LN}	β _{sist,N} / β _{sist,LN}
V0	0.74	G1	0.8	0.2	3.27		3.26		1.001	
V0	0.74	G2	0.8	0.2	---		---		---	
V0	0.74	G3	0.8	0.2	3.32	3.20	3.32	3.20	0.999	0.998
V0	0.74	G4	0.8	0.2	3.96		4.00		0.990	
V0	0.74	G5	0.8	0.2	5.13		5.21		0.985	
V0	0.74	G1	0.6	0.4	3.18		3.17		1.001	
V0	0.74	G2	0.6	0.4	---		---		---	
V0	0.74	G3	0.6	0.4	3.24	3.12	3.24	3.12	1.000	0.999
V0	0.74	G4	0.6	0.4	3.86		3.88		0.993	
V0	0.74	G5	0.6	0.4	4.95		5.00		0.990	
V0	0.74	G1	0.4	0.6	2.98		2.98		1.001	
V0	0.74	G2	0.4	0.6	---		---		---	
V0	0.74	G3	0.4	0.6	3.05	2.94	3.04	2.94	1.001	1.000
V0	0.74	G4	0.4	0.6	3.63		3.64		0.997	
V0	0.74	G5	0.4	0.6	4.62		4.64		0.995	
V0	0.74	G1	0.2	0.8	2.77		2.76		1.002	
V0	0.74	G2	0.2	0.8	---		---		---	
V0	0.74	G3	0.2	0.8	2.84	2.74	2.83	2.74	1.002	1.000
V0	0.74	G4	0.2	0.8	3.39		3.39		0.999	
V0	0.74	G5	0.2	0.8	4.31		4.32		0.997	
V0	0.96	G1	0.8	0.2	3.27		3.26		1.001	
V0	0.96	G2	0.8	0.2	---		---		---	
V0	0.96	G3	0.8	0.2	3.32	3.18	3.32	3.19	0.999	0.998
V0	0.96	G4	0.8	0.2	4.69		4.76		0.986	
V0	0.96	G5	0.8	0.2	6.29		6.43		0.978	
V0	0.96	G1	0.6	0.4	3.18		3.17		1.001	
V0	0.96	G2	0.6	0.4	---		---		---	
V0	0.96	G3	0.6	0.4	3.24	3.10	3.24	3.10	1.000	0.999
V0	0.96	G4	0.6	0.4	4.54		4.59		0.991	
V0	0.96	G5	0.6	0.4	6.02		6.10		0.987	
V0	0.96	G1	0.4	0.6	2.98		2.97		1.001	
V0	0.96	G2	0.4	0.6	---		---		---	
V0	0.96	G3	0.4	0.6	3.05	2.91	3.04	2.91	1.001	1.000
V0	0.96	G4	0.4	0.6	4.26		4.28		0.995	
V0	0.96	G5	0.4	0.6	5.60		5.65		0.992	
V0	0.96	G1	0.2	0.8	2.77		2.76		1.002	
V0	0.96	G2	0.2	0.8	---		---		---	
V0	0.96	G3	0.2	0.8	2.84	2.71	2.83	2.71	1.002	1.000
V0	0.96	G4	0.2	0.8	3.97		3.98		0.998	
V0	0.96	G5	0.2	0.8	5.23		5.26		0.995	

Quadro C.9 – Razões entre os índices de confiabilidade, exemplo III, série V0 – a/d = 0,74 e 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _{i,N}	β _{sist,N}	β _{i,LN}	β _{sist,LN}	β _{i,N} / β _{i,LN}	β _{sist,N} / β _{sist,LN}
V0	1.38	G1	0.8	0.2	3.27		3.26		1.001	
V0	1.38	G2	0.8	0.2	---		---		---	
V0	1.38	G3	0.8	0.2	3.32	3.18	3.32	3.19	0.999	0.998
V0	1.38	G4	0.8	0.2	6.11		6.24		0.979	
V0	1.38	G5	0.8	0.2	8.10		8.40		0.964	
V0	1.38	G1	0.6	0.4	3.18		3.17		1.001	
V0	1.38	G2	0.6	0.4	---		---		---	
V0	1.38	G3	0.6	0.4	3.24	3.10	3.24	3.10	1.000	0.999
V0	1.38	G4	0.6	0.4	5.86		5.94		0.987	
V0	1.38	G5	0.6	0.4	7.70		7.84		0.981	
V0	1.38	G1	0.4	0.6	2.98		2.97		1.001	
V0	1.38	G2	0.4	0.6	---		---		---	
V0	1.38	G3	0.4	0.6	3.05	2.91	3.04	2.91	1.001	1.000
V0	1.38	G4	0.4	0.6	5.46		5.50		0.992	
V0	1.38	G5	0.4	0.6	7.17		7.26		0.988	
V0	1.38	G1	0.2	0.8	2.77		2.76		1.002	
V0	1.38	G2	0.2	0.8	---		---		---	
V0	1.38	G3	0.2	0.8	2.84	2.71	2.83	2.71	1.002	1.000
V0	1.38	G4	0.2	0.8	5.09		5.12		0.995	
V0	1.38	G5	0.2	0.8	6.73		6.79		0.991	
V0	1.6	G1	0.8	0.2	3.27		3.26		1.001	
V0	1.6	G2	0.8	0.2	---		---		---	
V0	1.6	G3	0.8	0.2	3.32	3.18	3.32	3.19	0.999	0.998
V0	1.6	G4	0.8	0.2	6.76		6.93		0.975	
V0	1.6	G5	0.8	0.2	8.80		9.22		0.955	
V0	1.6	G1	0.6	0.4	3.18		3.17		1.001	
V0	1.6	G2	0.6	0.4	---		---		---	
V0	1.6	G3	0.6	0.4	3.24	3.10	3.24	3.10	1.000	0.999
V0	1.6	G4	0.6	0.4	6.45		6.55		0.985	
V0	1.6	G5	0.6	0.4	8.38		8.57		0.978	
V0	1.6	G1	0.4	0.6	2.98		2.97		1.001	
V0	1.6	G2	0.4	0.6	---		---		---	
V0	1.6	G3	0.4	0.6	3.05	2.91	3.04	2.91	1.001	1.000
V0	1.6	G4	0.4	0.6	6.01		6.06		0.991	
V0	1.6	G5	0.4	0.6	7.82		7.94		0.985	
V0	1.6	G1	0.2	0.8	2.76		2.76		1.002	
V0	1.6	G2	0.2	0.8	---		---		---	
V0	1.6	G3	0.2	0.8	2.84	2.71	2.83	2.71	1.002	1.000
V0	1.6	G4	0.2	0.8	5.62		5.65		0.994	
V0	1.6	G5	0.2	0.8	7.36		7.44		0.989	

Quadro C.10 – Razões entre os índices de confiabilidade, exemplo III, série V0 – a/d = 1,38 e 1,60.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _{i,N}	β _{sist,N}	β _{i,LN}	β _{sist,LN}	β _{i,N} / β _{i,LN}	β _{sist,N} / β _{sist,LN}
VS	0.74	G1	0.8	0.2	8.93		8.94		0.999	
VS	0.74	G2	0.8	0.2	3.13		3.13		1.001	
VS	0.74	G3	0.8	0.2	6.97	3.13	7.06	3.13	0.988	1.001
VS	0.74	G4	0.8	0.2	6.48		6.68		0.970	
VS	0.74	G5	0.8	0.2	7.81		8.12		0.963	
VS	0.74	G1	0.6	0.4	8.26		8.26		1.000	
VS	0.74	G2	0.6	0.4	3.05		3.05		1.001	
VS	0.74	G3	0.6	0.4	6.59	3.05	6.64	3.05	0.994	1.001
VS	0.74	G4	0.6	0.4	6.22		6.33		0.983	
VS	0.74	G5	0.6	0.4	7.45		7.60		0.980	
VS	0.74	G1	0.4	0.6	7.61		7.61		1.000	
VS	0.74	G2	0.4	0.6	2.86		2.86		1.001	
VS	0.74	G3	0.4	0.6	6.10	2.86	6.12	2.86	0.996	1.001
VS	0.74	G4	0.4	0.6	5.80		5.87		0.989	
VS	0.74	G5	0.4	0.6	6.95		7.03		0.987	
VS	0.74	G1	0.2	0.8	7.10		7.10		1.000	
VS	0.74	G2	0.2	0.8	2.66		2.66		1.001	
VS	0.74	G3	0.2	0.8	5.69	2.66	5.70	2.66	0.998	1.001
VS	0.74	G4	0.2	0.8	5.43		5.47		0.993	
VS	0.74	G5	0.2	0.8	6.51		6.57		0.991	
VS	0.96	G1	0.8	0.2	6.94		6.94		1.000	
VS	0.96	G2	0.8	0.2	3.13		3.13		1.001	
VS	0.96	G3	0.8	0.2	5.97	3.13	6.02	3.13	0.991	1.001
VS	0.96	G4	0.8	0.2	6.09		6.23		0.976	
VS	0.96	G5	0.8	0.2	7.83		8.12		0.965	
VS	0.96	G1	0.6	0.4	6.51		6.51		1.000	
VS	0.96	G2	0.6	0.4	3.05		3.05		1.001	
VS	0.96	G3	0.6	0.4	5.69	3.05	5.72	3.05	0.995	1.001
VS	0.96	G4	0.6	0.4	5.84		5.93		0.986	
VS	0.96	G5	0.6	0.4	7.45		7.60		0.981	
VS	0.96	G1	0.4	0.6	5.99		5.99		1.000	
VS	0.96	G2	0.4	0.6	2.86		2.86		1.001	
VS	0.96	G3	0.4	0.6	5.27	2.86	5.28	2.86	0.998	1.001
VS	0.96	G4	0.4	0.6	5.45		5.50		0.992	
VS	0.96	G5	0.4	0.6	6.95		7.03		0.988	
VS	0.96	G1	0.2	0.8	5.56		5.56		1.000	
VS	0.96	G2	0.2	0.8	2.66		2.66		1.001	
VS	0.96	G3	0.2	0.8	4.90	2.66	4.91	2.66	0.999	1.001
VS	0.96	G4	0.2	0.8	5.09		5.12		0.995	
VS	0.96	G5	0.2	0.8	6.51		6.57		0.991	

Quadro C.11 – Razões entre os índices de confiabilidade, exemplo III, série VS – a/d = 0,74 e 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _{i,N}	β _{sist,N}	β _{i,LN}	β _{sist,LN}	β _{i,N} / β _{i,LN}	β _{sist,N} / β _{sist,LN}
VS	1.38	G1	0.8	0.2	4.10		4.10		1.001	
VS	1.38	G2	0.8	0.2	3.13		3.13		1.001	
VS	1.38	G3	0.8	0.2	4.22	3.13	4.24	3.13	0.997	1.001
VS	1.38	G4	0.8	0.2	5.62		5.73		0.982	
VS	1.38	G5	0.8	0.2	7.82		8.08		0.968	
VS	1.38	G1	0.6	0.4	3.96		3.95		1.001	
VS	1.38	G2	0.6	0.4	3.05		3.05		1.001	
VS	1.38	G3	0.6	0.4	4.09	3.05	4.09	3.05	0.998	1.001
VS	1.38	G4	0.6	0.4	5.41		5.47		0.989	
VS	1.38	G5	0.6	0.4	7.43		7.57		0.983	
VS	1.38	G1	0.4	0.6	3.68		3.68		1.001	
VS	1.38	G2	0.4	0.6	2.86		2.86		1.001	
VS	1.38	G3	0.4	0.6	3.82	2.87	3.82	2.87	1.000	1.001
VS	1.38	G4	0.4	0.6	5.04		5.07		0.994	
VS	1.38	G5	0.4	0.6	6.92		7.00		0.989	
VS	1.38	G1	0.2	0.8	3.41		3.41		1.001	
VS	1.38	G2	0.2	0.8	2.66		2.65		1.001	
VS	1.38	G3	0.2	0.8	3.54	2.67	3.54	2.67	1.001	1.001
VS	1.38	G4	0.2	0.8	4.70		4.72		0.996	
VS	1.38	G5	0.2	0.8	6.49		6.54		0.992	
VS	1.6	G1	0.8	0.2	3.27		3.26		1.001	
VS	1.6	G2	0.8	0.2	3.38		3.38		1.001	
VS	1.6	G3	0.8	0.2	3.71	3.26	3.72	3.26	0.998	0.999
VS	1.6	G4	0.8	0.2	5.72		5.82		0.982	
VS	1.6	G5	0.8	0.2	8.03		8.31		0.966	
VS	1.6	G1	0.6	0.4	3.18		3.17		1.001	
VS	1.6	G2	0.6	0.4	3.28		3.28		1.001	
VS	1.6	G3	0.6	0.4	3.61	3.18	3.61	3.18	0.999	0.999
VS	1.6	G4	0.6	0.4	5.49		5.55		0.989	
VS	1.6	G5	0.6	0.4	7.63		7.77		0.982	
VS	1.6	G1	0.4	0.6	2.98		2.98		1.001	
VS	1.6	G2	0.4	0.6	3.07		3.07		1.001	
VS	1.6	G3	0.4	0.6	3.38	3.00	3.38	3.01	1.001	0.999
VS	1.6	G4	0.4	0.6	5.12		5.15		0.994	
VS	1.6	G5	0.4	0.6	7.10		7.19		0.988	
VS	1.6	G1	0.2	0.8	2.77		2.76		1.002	
VS	1.6	G2	0.2	0.8	2.85		2.85		1.001	
VS	1.6	G3	0.2	0.8	3.14	2.81	3.14	2.82	1.002	0.999
VS	1.6	G4	0.2	0.8	4.77		4.79		0.996	
VS	1.6	G5	0.2	0.8	6.66		6.72		0.992	

Quadro C.12 – Razões entre os índices de confiabilidade, exemplo III, série VS – a/d = 1,38 e 1,60.

ANEXO – D

Os Quadros D.1 à D.8 apresentam os resultados do exemplo IV, para as vigas da série V0 e VS, para cada percentual de carga variável, considerando-se no dimensionamento o par (bitola, quantidade de barras) para a armadura longitudinal e quantidade de barras da armadura transversal dispostas ao longo do comprimento a_L que retornaram um índice de confiabilidade do sistema superior ao índice de confiabilidade de referência.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	
V0	0.74	G1	0.8	0.2	3.87	5.517E-05	-4.860E-01	-7.549E-01	1.375E-02	4.401E-01	0.000E+00	3.87	5.517E-05	24%	57%	0%	19%	0%	
V0	0.74	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.8	0.2	8.65	2.677E-18	-2.333E-01	-8.343E-01	4.994E-01	-9.485E-03	0.000E+00			5%	70%	25%	0%	0%	
V0	0.74	G4	0.8	0.2	12.83	5.570E-38	-1.608E-01	-7.324E-01	6.616E-01	-3.569E-03	0.000E+00			3%	54%	44%	0%	0%	
V0	0.74	G5	0.8	0.2	14.66	6.100E-49	-1.421E-01	-7.313E-01	6.671E-01	6.128E-03	0.000E+00			2%	53%	45%	0%	0%	
V0	0.74	G1	0.6	0.4	3.95	3.885E-05	-1.831E-01	-9.437E-01	1.099E-02	2.754E-01	0.000E+00	3.95	3.885E-05	3%	89%	0%	8%	0%	
V0	0.74	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.74	G3	0.6	0.4	5.24	8.144E-08	-1.413E-01	-9.173E-01	3.721E-01	-6.681E-03	0.000E+00			2%	84%	14%	0%	0%	
V0	0.74	G4	0.6	0.4	10.25	5.855E-25	-7.496E-02	-8.275E-01	5.564E-01	-2.701E-03	0.000E+00			1%	68%	31%	0%	0%	
V0	0.74	G5	0.6	0.4	11.90	5.934E-33	-6.516E-02	-8.163E-01	5.739E-01	4.659E-03	0.000E+00			0%	67%	33%	0%	0%	
V0	0.74	G1	0.4	0.6	4.07	2.362E-05	-7.948E-02	-9.718E-01	1.103E-02	2.216E-01	0.000E+00	4.07	2.362E-05	1%	94%	0%	5%	0%	
V0	0.74	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.74	G3	0.4	0.6	7.10	6.085E-13	-4.737E-02	-9.360E-01	3.488E-01	-8.093E-03	0.000E+00			0%	88%	12%	0%	0%	
V0	0.74	G4	0.4	0.6	8.78	7.864E-19	-3.816E-02	-8.694E-01	4.926E-01	-2.552E-03	0.000E+00			0%	76%	24%	0%	0%	
V0	0.74	G5	0.4	0.6	10.18	1.281E-24	-3.362E-02	-8.554E-01	5.168E-01	4.316E-03	0.000E+00			0%	73%	27%	0%	0%	
V0	0.74	G1	0.2	0.8	4.01	3.079E-05	-3.025E-02	-9.802E-01	1.158E-02	1.951E-01	0.000E+00	4.01	3.079E-05	0%	96%	0%	4%	0%	
V0	0.74	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.74	G3	0.2	0.8	6.78	6.205E-12	-1.858E-02	-9.457E-01	3.245E-01	-8.555E-03	0.000E+00			0%	89%	11%	0%	0%	
V0	0.74	G4	0.2	0.8	7.79	3.353E-15	-1.615E-02	-8.905E-01	4.546E-01	-2.454E-03	0.000E+00			0%	79%	21%	0%	0%	
V0	0.74	G5	0.2	0.8	9.15	2.775E-20	-1.138E-02	-9.165E-01	3.999E-01	3.567E-03	0.000E+00			0%	84%	16%	0%	0%	

Quadro D.1 – Resultados exemplo IV, série V0 – $a/d = 0,74$.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	
V0	0.96	G1	0.8	0.2	5.03	2.489E-07	-3.899E-01	-8.297E-01	1.876E-02	3.991E-01	0.000E+00	5.03	2.489E-07	15%	69%	0%	16%	0%	
V0	0.96	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---
V0	0.96	G3	0.8	0.2	9.57	5.362E-22	-2.133E-01	-8.308E-01	5.139E-01	-1.556E-02	0.000E+00			5%	69%	26%	0%	0%	
V0	0.96	G4	0.8	0.2	12.62	8.113E-37	-1.633E-01	-7.367E-01	6.562E-01	1.180E-04	0.000E+00			3%	54%	43%	0%	0%	
V0	0.96	G5	0.8	0.2	15.42	6.428E-54	-1.356E-01	-7.327E-01	6.667E-01	1.388E-02	0.000E+00			2%	54%	44%	0%	0%	
V0	0.96	G1	0.6	0.4	3.91	4.543E-05	-1.846E-01	-9.436E-01	1.417E-02	2.744E-01	0.000E+00	3.91	4.543E-05	3%	89%	0%	8%	0%	
V0	0.96	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.6	0.4	6.30	1.523E-10	-1.188E-01	-9.173E-01	3.798E-01	-9.109E-03	0.000E+00			1%	84%	14%	0%	0%	
V0	0.96	G4	0.6	0.4	10.08	3.511E-24	-7.620E-02	-8.314E-01	5.504E-01	-8.500E-05	0.000E+00			1%	69%	30%	0%	0%	
V0	0.96	G5	0.6	0.4	12.46	6.594E-36	-6.244E-02	-8.133E-01	5.784E-01	8.610E-03	0.000E+00			0%	66%	33%	0%	0%	
V0	0.96	G1	0.4	0.6	3.81	7.072E-05	-8.438E-02	-9.716E-01	1.367E-02	2.206E-01	0.000E+00	3.81	7.073E-05	1%	94%	0%	5%	0%	
V0	0.96	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.4	0.6	4.89	4.987E-07	-6.702E-02	-9.452E-01	3.195E-01	-8.207E-03	0.000E+00			0%	89%	10%	0%	0%	
V0	0.96	G4	0.4	0.6	8.63	3.179E-18	-3.899E-02	-8.719E-01	4.881E-01	-3.564E-05	0.000E+00			0%	76%	24%	0%	0%	
V0	0.96	G5	0.4	0.6	10.83	1.289E-27	-3.171E-02	-8.501E-01	5.256E-01	7.824E-03	0.000E+00			0%	72%	28%	0%	0%	
V0	0.96	G1	0.2	0.8	3.94	3.994E-05	-3.067E-02	-9.806E-01	1.515E-02	1.931E-01	0.000E+00	3.94	3.994E-05	0%	96%	0%	4%	0%	
V0	0.96	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.2	0.8	6.70	1.084E-11	-1.879E-02	-9.446E-01	3.274E-01	-1.113E-02	0.000E+00			0%	89%	11%	0%	0%	
V0	0.96	G4	0.2	0.8	7.65	9.753E-15	-1.643E-02	-8.940E-01	4.477E-01	1.661E-04	0.000E+00			0%	80%	20%	0%	0%	
V0	0.96	G5	0.2	0.8	9.90	2.118E-23	-1.295E-02	-8.714E-01	4.904E-01	8.513E-03	0.000E+00			0%	76%	24%	0%	0%	

Quadro D.2 – Resultados exemplo IV, série V0 – $a/d = 0,96$.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅		
V0	1.38	G1	0.8	0.2	4.26	1.030E-05	-4.502E-01	-7.882E-01	2.737E-02	4.188E-01	0.000E+00	4.26	1.030E-05	20%	62%	0%	18%	0%		
V0	1.38	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.8	0.2	8.88	3.415E-19	-2.273E-01	-8.257E-01	5.159E-01	-2.019E-02	0.000E+00			5%	68%	27%	0%	0%		
V0	1.38	G4	0.8	0.2	13.11	1.511E-39	-1.578E-01	-7.447E-01	6.484E-01	1.142E-02	0.000E+00			2%	55%	42%	0%	0%		
V0	1.38	G5	0.8	0.2	17.29	2.794E-67	-1.221E-01	-7.331E-01	6.683E-01	3.221E-02	0.000E+00			1%	54%	45%	0%	0%		
V0	1.38	G1	0.6	0.4	4.05	2.602E-05	-1.793E-01	-9.459E-01	2.146E-02	2.694E-01	0.000E+00	4.05	2.602E-05	3%	89%	0%	7%	0%		
V0	1.38	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	
V0	1.38	G3	0.6	0.4	6.40	7.890E-11	-1.170E-01	-9.137E-01	3.890E-01	-1.405E-02	0.000E+00			1%	83%	15%	0%	0%		
V0	1.38	G4	0.6	0.4	10.45	7.722E-26	-7.370E-02	-8.341E-01	5.466E-01	7.753E-03	0.000E+00			1%	70%	30%	0%	0%		
V0	1.38	G5	0.6	0.4	13.78	1.683E-43	-5.684E-02	-8.081E-01	5.859E-01	2.133E-02	0.000E+00			0%	65%	34%	0%	0%		
V0	1.38	G1	0.4	0.6	3.84	6.077E-05	-8.365E-02	-9.724E-01	2.125E-02	2.169E-01	0.000E+00	3.84	6.077E-05	1%	95%	0%	5%	0%		
V0	1.38	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	
V0	1.38	G3	0.4	0.6	6.83	4.328E-12	-4.916E-02	-9.329E-01	3.564E-01	-1.521E-02	0.000E+00			0%	87%	13%	0%	0%		
V0	1.38	G4	0.4	0.6	8.99	1.219E-19	-3.791E-02	-8.710E-01	4.897E-01	7.551E-03	0.000E+00			0%	76%	24%	0%	0%		
V0	1.38	G5	0.4	0.6	12.42	1.120E-35	-2.790E-02	-8.398E-01	5.418E-01	2.076E-02	0.000E+00			0%	71%	29%	0%	0%		
V0	1.38	G1	0.2	0.8	3.83	6.288E-05	-3.146E-02	-9.812E-01	2.260E-02	1.890E-01	0.000E+00	3.83	6.288E-05	0%	96%	0%	4%	0%		
V0	1.38	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	
V0	1.38	G3	0.2	0.8	6.55	2.917E-11	-1.918E-02	-9.423E-01	3.339E-01	-1.644E-02	0.000E+00			0%	89%	11%	0%	0%		
V0	1.38	G4	0.2	0.8	8.01	5.681E-16	-1.573E-02	-8.955E-01	4.448E-01	7.784E-03	0.000E+00			0%	80%	20%	0%	0%		
V0	1.38	G5	0.2	0.8	11.36	3.241E-30	-1.138E-02	-8.614E-01	5.073E-01	2.133E-02	0.000E+00			0%	74%	26%	0%	0%		

Quadro D.3 – Resultados exemplo IV, série V0 – a/d = 1,38.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅		
V0	1.6	G1	0.8	0.2	3.99	3.293E-05	-4.745E-01	-7.691E-01	3.196E-02	4.270E-01	0.000E+00	3.99	3.293E-05	23%	59%	0%	18%	0%		
V0	1.6	G2	0.8	0.2	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.8	0.2	8.64	2.790E-18	-2.332E-01	-8.219E-01	5.192E-01	-2.267E-02	0.000E+00			5%	68%	27%	0%	0%		
V0	1.6	G4	0.8	0.2	13.55	4.198E-42	-1.531E-01	-7.481E-01	6.455E-01	1.805E-02	0.000E+00			2%	56%	42%	0%	0%		
V0	1.6	G5	0.8	0.2	18.20	2.583E-74	-1.165E-01	-7.346E-01	6.669E-01	4.415E-02	0.000E+00			1%	54%	44%	0%	0%		
V0	1.6	G1	0.6	0.4	4.01	3.092E-05	-1.809E-01	-9.460E-01	2.594E-02	2.678E-01	0.000E+00	4.01	3.092E-05	3%	89%	0%	7%	0%		
V0	1.6	G2	0.6	0.4	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	
V0	1.6	G3	0.6	0.4	7.46	4.314E-14	-1.016E-01	-9.072E-01	4.079E-01	-1.861E-02	0.000E+00			1%	82%	17%	0%	0%		
V0	1.6	G4	0.6	0.4	10.85	1.058E-27	-7.116E-02	-8.346E-01	5.461E-01	1.356E-02	0.000E+00			1%	70%	30%	0%	0%		
V0	1.6	G5	0.6	0.4	14.96	7.247E-51	-5.269E-02	-8.031E-01	5.926E-01	3.278E-02	0.000E+00			0%	64%	35%	0%	0%		
V0	1.6	G1	0.4	0.6	3.88	5.263E-05	-8.298E-02	-9.728E-01	2.557E-02	2.148E-01	0.000E+00	3.88	5.263E-05	1%	95%	0%	5%	0%		
V0	1.6	G2	0.4	0.6	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	
V0	1.6	G3	0.4	0.6	6.85	3.718E-12	-4.901E-02	-9.306E-01	3.622E-01	-1.841E-02	0.000E+00			0%	87%	13%	0%	0%		
V0	1.6	G4	0.4	0.6	9.34	4.963E-21	-3.648E-02	-8.717E-01	4.885E-01	1.270E-02	0.000E+00			0%	76%	24%	0%	0%		
V0	1.6	G5	0.4	0.6	13.25	2.214E-40	-2.626E-02	-8.361E-01	5.471E-01	3.047E-02	0.000E+00			0%	70%	30%	0%	0%		
V0	1.6	G1	0.2	0.8	3.97	3.539E-05	-3.048E-02	-9.814E-01	2.742E-02	1.874E-01	0.000E+00	3.97	3.539E-05	0%	96%	0%	4%	0%		
V0	1.6	G2	0.2	0.8	---	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	
V0	1.6	G3	0.2	0.8	5.79	3.613E-09	-2.149E-02	-9.460E-01	3.229E-01	-1.823E-02	0.000E+00			0%	89%	10%	0%	0%		
V0	1.6	G4	0.2	0.8	8.31	4.727E-17	-1.519E-02	-8.956E-01	4.444E-01	1.277E-02	0.000E+00			0%	80%	20%	0%	0%		
V0	1.6	G5	0.2	0.8	11.80	2.046E-32	-1.099E-02	-8.616E-01	5.067E-01	2.971E-02	0.000E+00			0%	74%	26%	0%	0%		

Quadro D.4 – Resultados exemplo IV, série V0 – a/d = 1,60.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
VS	0.74	G1	0.8	0.2	4.88	5.188E-07	-4.000E-01	-8.205E-01	6.250E-03	4.084E-01	0.000E+00	4.50	3.365E-06	16%	67%	0%	17%	0%
VS	0.74	G2	0.8	0.2	4.52	3.027E-06	-4.282E-01	-8.274E-01	0.000E+00	0.000E+00	3.634E-01			18%	68%	0%	0%	13%
VS	0.74	G3	0.8	0.2	5.97	1.190E-09	-3.310E-01	-7.935E-01	5.106E-01	-4.300E-03	0.000E+00			11%	63%	26%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.8	0.2	12.84	4.800E-38	-1.607E-01	-7.340E-01	6.599E-01	-1.820E-03	0.000E+00			3%	54%	44%	0%	0%
VS	0.74	G5	0.8	0.2	14.96	6.990E-51	-1.394E-01	-7.267E-01	6.726E-01	3.095E-03	0.000E+00			2%	53%	45%	0%	0%
VS	0.74	G1	0.6	0.4	5.69	6.189E-09	-1.310E-01	-9.533E-01	6.457E-03	2.720E-01	0.000E+00	5.44	2.666E-08	2%	91%	0%	7%	0%
VS	0.74	G2	0.6	0.4	5.46	2.368E-08	-1.363E-01	-9.623E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.353E-01			2%	93%	0%	0%	6%
VS	0.74	G3	0.6	0.4	6.50	3.952E-11	-1.153E-01	-9.205E-01	3.732E-01	-4.391E-03	0.000E+00			1%	85%	14%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.6	0.4	10.26	5.400E-25	-7.492E-02	-8.283E-01	5.552E-01	-1.686E-03	0.000E+00			1%	69%	31%	0%	0%
VS	0.74	G5	0.6	0.4	12.07	7.780E-34	-6.429E-02	-8.130E-01	5.786E-01	2.871E-03	0.000E+00			0%	66%	33%	0%	0%
VS	0.74	G1	0.4	0.6	4.63	1.817E-06	-7.064E-02	-9.716E-01	5.507E-03	2.259E-01	0.000E+00	4.40	5.368E-06	0%	94%	0%	5%	0%
VS	0.74	G2	0.4	0.6	4.42	4.869E-06	-7.373E-02	-9.781E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.946E-01			1%	96%	0%	0%	4%
VS	0.74	G3	0.4	0.6	5.36	4.055E-08	-6.153E-02	-9.471E-01	3.150E-01	-3.421E-03	0.000E+00			0%	90%	10%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.4	0.6	8.79	7.320E-19	-3.859E-02	-8.674E-01	4.962E-01	-1.314E-03	0.000E+00			0%	75%	25%	0%	0%
VS	0.74	G5	0.4	0.6	10.41	1.090E-25	-3.289E-02	-8.509E-01	5.243E-01	2.181E-03	0.000E+00			0%	72%	27%	0%	0%
VS	0.74	G1	0.2	0.8	3.96	3.696E-05	-3.054E-02	-9.797E-01	4.894E-03	1.980E-01	0.000E+00	3.97	3.670E-05	0%	96%	0%	4%	0%
VS	0.74	G2	0.2	0.8	4.87	5.490E-07	-2.530E-02	-9.837E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.780E-01			0%	97%	0%	0%	3%
VS	0.74	G3	0.2	0.8	4.64	1.780E-06	-2.644E-02	-9.600E-01	2.786E-01	-2.897E-03	0.000E+00			0%	92%	8%	0%	0%
VS	0.74	G4	0.2	0.8	7.81	2.900E-15	-1.620E-02	-8.903E-01	4.551E-01	-1.108E-03	0.000E+00			0%	79%	21%	0%	0%
VS	0.74	G5	0.2	0.8	9.30	7.150E-21	-1.374E-02	-8.741E-01	4.855E-01	1.812E-03	0.000E+00			0%	76%	24%	0%	0%

Quadro D.5 – Resultados exemplo IV, série VS – $a/d = 0,74$.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
VS	0.96	G1	0.8	0.2	4.45	4.357E-06	-4.340E-01	-7.970E-01	9.797E-03	4.200E-01	0.000E+00	4.45	4.357E-06	19%	64%	0%	18%	0%
VS	0.96	G2	0.8	0.2	6.31	1.426E-10	-3.164E-01	-8.883E-01	0.000E+00	0.000E+00	3.328E-01			10%	79%	0%	0%	11%
VS	0.96	G3	0.8	0.2	7.41	6.118E-14	-2.703E-01	-8.242E-01	4.976E-01	-6.724E-03	0.000E+00			7%	68%	25%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.8	0.2	12.62	8.070E-37	-1.633E-01	-7.364E-01	6.565E-01	-1.210E-04	0.000E+00			3%	54%	43%	0%	0%
VS	0.96	G5	0.8	0.2	15.67	1.290E-55	-1.335E-01	-7.251E-01	6.755E-01	6.827E-03	0.000E+00			2%	53%	46%	0%	0%
VS	0.96	G1	0.6	0.4	4.80	7.862E-07	-1.535E-01	-9.504E-01	8.747E-03	2.702E-01	0.000E+00	4.55	2.652E-06	2%	90%	0%	7%	0%
VS	0.96	G2	0.6	0.4	4.58	2.327E-06	-1.604E-01	-9.585E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.357E-01			3%	92%	0%	0%	6%
VS	0.96	G3	0.6	0.4	6.99	1.385E-12	-1.076E-01	-9.185E-01	3.805E-01	-6.109E-03	0.000E+00			1%	84%	14%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.6	0.4	10.08	3.500E-24	-7.620E-02	-8.314E-01	5.504E-01	-1.030E-04	0.000E+00			1%	69%	30%	0%	0%
VS	0.96	G5	0.6	0.4	12.68	4.230E-37	-6.142E-02	-8.085E-01	5.852E-01	5.564E-03	0.000E+00			0%	65%	34%	0%	0%
VS	0.96	G1	0.4	0.6	3.89	4.994E-05	-8.272E-02	-9.712E-01	7.394E-03	2.234E-01	0.000E+00	3.89	4.993E-05	1%	94%	0%	5%	0%
VS	0.96	G2	0.4	0.6	4.93	4.141E-07	-6.673E-02	-9.781E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.971E-01			0%	96%	0%	0%	4%
VS	0.96	G3	0.4	0.6	5.78	3.762E-09	-5.737E-02	-9.449E-01	3.221E-01	-4.742E-03	0.000E+00			0%	89%	10%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.4	0.6	8.63	3.180E-18	-3.930E-02	-8.702E-01	4.912E-01	-1.060E-04	0.000E+00			0%	76%	24%	0%	0%
VS	0.96	G5	0.4	0.6	10.96	3.170E-28	-3.136E-02	-8.458E-01	5.326E-01	4.203E-03	0.000E+00			0%	72%	28%	0%	0%
VS	0.96	G1	0.2	0.8	3.89	5.095E-05	-3.109E-02	-9.800E-01	7.720E-03	1.963E-01	0.000E+00	3.88	5.129E-05	0%	96%	0%	4%	0%
VS	0.96	G2	0.2	0.8	4.22	1.240E-05	-2.889E-02	-9.846E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.726E-01			0%	97%	0%	0%	3%
VS	0.96	G3	0.2	0.8	4.74	1.081E-06	-2.591E-02	-9.587E-01	2.830E-01	-4.617E-03	0.000E+00			0%	92%	8%	0%	0%
VS	0.96	G4	0.2	0.8	7.66	9.790E-15	-1.652E-02	-8.929E-01	4.500E-01	-7.800E-05	0.000E+00			0%	80%	20%	0%	0%
VS	0.96	G5	0.2	0.8	9.86	3.270E-23	-1.300E-02	-8.687E-01	4.951E-01	4.164E-03	0.000E+00			0%	75%	25%	0%	0%

Quadro D.6 – Resultados exemplo IV, série VS – $a/d = 0,96$.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
VS	1.38	G1	0.8	0.2	3.87	5.354E-05	-4.854E-01	-7.564E-01	1.751E-02	4.381E-01	0.000E+00	3.87	5.358E-05	24%	57%	0%	19%	0%
VS	1.38	G2	0.8	0.2	5.05	2.254E-07	-3.888E-01	-8.520E-01	0.000E+00	0.000E+00	3.507E-01			15%	73%	0%	0%	12%
VS	1.38	G3	0.8	0.2	8.82	5.637E-19	-2.288E-01	-8.329E-01	5.038E-01	-1.226E-02	0.000E+00			5%	69%	25%	0%	0%
VS	1.38	G4	0.8	0.2	13.04	3.690E-39	-1.585E-01	-7.406E-01	6.530E-01	6.449E-03	0.000E+00			3%	55%	43%	0%	0%
VS	1.38	G5	0.8	0.2	17.17	2.310E-66	-1.227E-01	-7.238E-01	6.788E-01	1.884E-02	0.000E+00			2%	52%	46%	0%	0%
VS	1.38	G1	0.6	0.4	3.85	5.915E-05	-1.873E-01	-9.428E-01	1.389E-02	2.754E-01	0.000E+00	3.85	5.915E-05	4%	89%	0%	8%	0%
VS	1.38	G2	0.6	0.4	5.20	1.016E-07	-1.428E-01	-9.615E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.349E-01			2%	92%	0%	0%	6%
VS	1.38	G3	0.6	0.4	7.51	3.013E-14	-1.004E-01	-9.144E-01	3.921E-01	-9.767E-03	0.000E+00			1%	84%	15%	0%	0%
VS	1.38	G4	0.6	0.4	10.43	8.990E-26	-7.378E-02	-8.319E-01	5.500E-01	4.837E-03	0.000E+00			1%	69%	30%	0%	0%
VS	1.38	G5	0.6	0.4	14.15	1.030E-45	-5.543E-02	-7.985E-01	5.993E-01	1.401E-02	0.000E+00			0%	64%	36%	0%	0%
VS	1.38	G1	0.4	0.6	3.94	4.004E-05	-8.173E-02	-9.719E-01	1.383E-02	2.203E-01	0.000E+00	3.93	4.263E-05	1%	94%	0%	5%	0%
VS	1.38	G2	0.4	0.6	4.20	1.310E-05	-7.721E-02	-9.779E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.941E-01			1%	96%	0%	0%	4%
VS	1.38	G3	0.4	0.6	5.15	1.306E-07	-6.391E-02	-9.445E-01	3.220E-01	-8.470E-03	0.000E+00			0%	89%	10%	0%	0%
VS	1.38	G4	0.4	0.6	8.95	1.890E-19	-3.799E-02	-8.702E-01	4.912E-01	4.566E-03	0.000E+00			0%	76%	24%	0%	0%
VS	1.38	G5	0.4	0.6	12.26	7.490E-35	-2.822E-02	-8.360E-01	5.479E-01	1.290E-02	0.000E+00			0%	70%	30%	0%	0%
VS	1.38	G1	0.2	0.8	4.05	2.590E-05	-2.998E-02	-9.805E-01	1.548E-02	1.936E-01	0.000E+00	4.04	2.629E-05	0%	96%	0%	4%	0%
VS	1.38	G2	0.2	0.8	4.43	4.821E-06	-2.765E-02	-9.843E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.741E-01			0%	97%	0%	0%	3%
VS	1.38	G3	0.2	0.8	6.93	2.090E-12	-1.819E-02	-9.427E-01	3.330E-01	-1.167E-02	0.000E+00			0%	89%	11%	0%	0%
VS	1.38	G4	0.2	0.8	7.98	7.410E-16	-1.588E-02	-8.928E-01	4.501E-01	5.082E-03	0.000E+00			0%	80%	20%	0%	0%
VS	1.38	G5	0.2	0.8	11.41	1.970E-30	-1.133E-02	-8.559E-01	5.169E-01	1.432E-02	0.000E+00			0%	73%	27%	0%	0%

Quadro D.7 – Resultados exemplo IV, série VS – $a/d = 1,38$.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	p _{f,i}	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄	α ₅	β _{sist}	p _{f,sist}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
VS	1.6	G1	0.8	0.2	3.99	3.301E-05	-4.744E-01	-7.670E-01	2.184E-02	4.315E-01	0.000E+00	3.99	3.366E-05	23%	59%	0%	19%	0%
VS	1.6	G2	0.8	0.2	4.67	1.484E-06	-4.163E-01	-8.352E-01	0.000E+00	0.000E+00	3.594E-01			17%	70%	0%	0%	13%
VS	1.6	G3	0.8	0.2	7.99	6.628E-16	-2.515E-01	-8.237E-01	5.079E-01	-1.481E-02	0.000E+00			6%	68%	26%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.8	0.2	13.46	1.470E-41	-1.540E-01	-7.430E-01	6.512E-01	1.160E-02	0.000E+00			2%	55%	42%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.8	0.2	18.02	7.910E-73	-1.175E-01	-7.247E-01	6.783E-01	2.874E-02	0.000E+00			1%	53%	46%	0%	0%
VS	1.6	G1	0.6	0.4	3.82	6.670E-05	-1.886E-01	-9.428E-01	1.708E-02	2.744E-01	0.000E+00	3.82	6.670E-05	4%	89%	0%	8%	0%
VS	1.6	G2	0.6	0.4	4.95	3.735E-07	-1.494E-01	-9.605E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.349E-01			2%	92%	0%	0%	6%
VS	1.6	G3	0.6	0.4	5.67	7.208E-09	-1.312E-01	-9.159E-01	3.793E-01	-1.052E-02	0.000E+00			2%	84%	14%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.6	0.4	10.76	2.620E-27	-7.165E-02	-8.313E-01	5.511E-01	8.286E-03	0.000E+00			1%	69%	30%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.6	0.4	14.73	2.090E-49	-5.339E-02	-7.965E-01	6.020E-01	2.017E-02	0.000E+00			0%	63%	36%	0%	0%
VS	1.6	G1	0.4	0.6	3.87	5.470E-05	-8.317E-02	-9.721E-01	1.744E-02	2.187E-01	0.000E+00	3.83	6.482E-05	1%	94%	0%	5%	0%
VS	1.6	G2	0.4	0.6	4.00	3.172E-05	-8.076E-02	-9.777E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.938E-01			1%	96%	0%	0%	4%
VS	1.6	G3	0.4	0.6	7.39	7.190E-14	-4.561E-02	-9.308E-01	3.624E-01	-1.323E-02	0.000E+00			0%	87%	13%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.4	0.6	9.28	8.260E-21	-3.668E-02	-8.691E-01	4.933E-01	8.285E-03	0.000E+00			0%	76%	24%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.4	0.6	13.27	1.870E-40	-2.622E-02	-8.288E-01	5.586E-01	2.036E-02	0.000E+00			0%	69%	31%	0%	0%
VS	1.6	G1	0.2	0.8	4.01	3.052E-05	-3.023E-02	-9.808E-01	1.889E-02	1.917E-01	0.000E+00	3.99	3.244E-05	0%	96%	0%	4%	0%
VS	1.6	G2	0.2	0.8	4.24	1.107E-05	-2.874E-02	-9.845E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.728E-01			0%	97%	0%	0%	3%
VS	1.6	G3	0.2	0.8	6.31	1.397E-10	-1.980E-02	-9.461E-01	3.230E-01	-1.325E-02	0.000E+00			0%	90%	10%	0%	0%
VS	1.6	G4	0.2	0.8	8.26	7.150E-17	-1.537E-02	-8.919E-01	4.519E-01	8.496E-03	0.000E+00			0%	80%	20%	0%	0%
VS	1.6	G5	0.2	0.8	11.87	8.940E-33	-1.092E-02	-8.540E-01	5.197E-01	2.025E-02	0.000E+00			0%	73%	27%	0%	0%

Quadro D.8 – Resultados exemplo IV, série VS – $a/d = 1,60$.

Os Quadros D.9 à D.16 apresentam as coordenadas do ponto de projeto (variáveis seguidas por *), obtidas para cada razão a/d , para cada percentual de carga variável k_q , considerando-se as bitolas e quantidade de barras longitudinais e transversais, fruto do dimensionamento, apresentadas no item 0. Também apresentam os valores para os coeficientes parciais de segurança γ_i , calibrados conforme a equação (0.83), mediante a análise de confiabilidade.

Os valores assinalados em vermelho dizem respeito às funções de falha que governaram o comportamento do sistema de falha. Portanto, as conclusões sobre os coeficientes parciais de segurança são realizadas para tais funções de falha.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	β _{sist}	k _g [*]	k _q [*]	f _c [*] (kN/cm ²)	f _y [*] (kN/cm ²)	f _{yw} [*] (kN/cm ²)	k _g [*] /k _{gk}	k _q [*] /k _{qk}	f _c [*] /f _{ck}	f _y [*] /f _{yk}	f _{yw} [*] /f _{ywk}	
V0	0.74	G1	0.8	0.2	3.87	3.87	1.190	2.108	3.617	51.004	---	1.190	2.108	1.206	1.020	---	
V0	0.74	G2	0.8	0.2	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.74	G3	0.8	0.2	8.65		1.202	6.518	2.272	56.167	---	1.202	6.518	0.757	1.123	---	
V0	0.74	G4	0.8	0.2	12.83		1.206	10.112	1.443	56.057	---	1.206	10.112	0.481	1.121	---	
V0	0.74	G5	0.8	0.2	14.66		1.208	12.726	1.253	55.652	---	1.208	12.726	0.418	1.113	---	
V0	0.74	G1	0.6	0.4	3.95	3.95	1.073	2.690	3.621	52.750	---	1.073	2.690	1.207	1.055	---	
V0	0.74	G2	0.6	0.4	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
V0	0.74	G3	0.6	0.4	5.24		1.074	3.630	2.942	56.025	---	1.074	3.630	0.981	1.120	---	
V0	0.74	G4	0.6	0.4	10.25		1.077	8.500	1.954	56.003	---	1.077	8.500	0.651	1.120	---	
V0	0.74	G5	0.6	0.4	11.90		1.078	10.708	1.728	55.754	---	1.078	10.708	0.576	1.115	---	
V0	0.74	G1	0.4	0.6	4.07	4.07	1.032	2.869	3.621	53.284	---	1.032	2.869	1.207	1.066	---	
V0	0.74	G2	0.4	0.6	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
V0	0.74	G3	0.4	0.6	7.10		1.034	5.748	2.777	56.092	---	1.034	5.748	0.926	1.122	---	
V0	0.74	G4	0.4	0.6	8.78		1.034	7.126	2.263	55.987	---	1.034	7.126	0.754	1.120	---	
V0	0.74	G5	0.4	0.6	10.18		1.034	8.875	2.051	55.788	---	1.034	8.875	0.684	1.116	---	
V0	0.74	G1	0.2	0.8	4.01	4.01	1.012	2.848	3.620	53.628	---	1.012	2.848	1.207	1.073	---	
V0	0.74	G2	0.2	0.8	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
V0	0.74	G3	0.2	0.8	6.78		1.013	5.434	2.863	56.094	---	1.013	5.434	0.954	1.122	---	
V0	0.74	G4	0.2	0.8	7.79		1.013	6.135	2.472	55.977	---	1.013	6.135	0.824	1.120	---	
V0	0.74	G5	0.2	0.8	9.15		1.012	7.956	2.287	55.806	---	1.012	7.956	0.762	1.116	---	

Quadro D.9 – Resultados exemplo IV, série V0 – a/d = 0,74.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	β _{sist}	k _g [*]	k _q [*]	f _c [*] (kN/cm ²)	f _y [*] (kN/cm ²)	f _{yw} [*] (kN/cm ²)	k _g [*] /k _{gk}	k _q [*] /k _{qk}	f _c [*] /f _{ck}	f _y [*] /f _{yk}	f _{yw} [*] /f _{ywk}	
V0	0.96	G1	0.8	0.2	5.03	5.03	1.199	3.031	3.601	50.170	---	1.199	3.031	1.200	1.003	---	
V0	0.96	G2	0.8	0.2	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	0.96	G3	0.8	0.2	9.57		1.204	7.634	2.129	56.367	---	1.204	7.634	0.710	1.127	---	
V0	0.96	G4	0.8	0.2	12.62		1.206	9.929	1.475	55.915	---	1.206	9.929	0.492	1.118	---	
V0	0.96	G5	0.8	0.2	15.42		1.209	13.975	1.187	55.283	---	1.209	13.975	0.396	1.106	---	
V0	0.96	G1	0.6	0.4	3.91	3.91	1.072	2.662	3.616	52.790	---	1.072	2.662	1.205	1.056	---	
V0	0.96	G2	0.6	0.4	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.6	0.4	6.30		1.075	4.666	2.804	56.092	---	1.075	4.666	0.935	1.122	---	
V0	0.96	G4	0.6	0.4	10.08		1.077	8.324	1.988	55.922	---	1.077	8.324	0.663	1.118	---	
V0	0.96	G5	0.6	0.4	12.46		1.078	11.521	1.659	55.600	---	1.078	11.521	0.553	1.112	---	
V0	0.96	G1	0.4	0.6	3.81	3.81	1.032	2.666	3.618	53.462	---	1.032	2.666	1.206	1.069	---	
V0	0.96	G2	0.4	0.6	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.4	0.6	4.89		1.033	3.457	3.069	56.040	---	1.033	3.457	1.023	1.121	---	
V0	0.96	G4	0.4	0.6	8.63		1.033	6.970	2.298	55.921	---	1.033	6.970	0.766	1.118	---	
V0	0.96	G5	0.4	0.6	10.83		1.034	9.757	1.957	55.667	---	1.034	9.757	0.652	1.113	---	
V0	0.96	G1	0.2	0.8	3.94	3.94	1.012	2.800	3.615	53.686	---	1.012	2.800	1.205	1.074	---	
V0	0.96	G2	0.2	0.8	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
V0	0.96	G3	0.2	0.8	6.70		1.013	5.328	2.865	56.143	---	1.013	5.328	0.955	1.123	---	
V0	0.96	G4	0.2	0.8	7.65		1.013	6.006	2.503	55.916	---	1.013	6.006	0.834	1.118	---	
V0	0.96	G5	0.2	0.8	9.90		1.013	8.740	2.144	55.668	---	1.013	8.740	0.715	1.113	---	

Quadro D.10 – Resultados exemplo IV, série V0 – a/d = 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	β _{sist}	k _g [*]	k _q [*]	f _c [*] (kN/cm ²)	f _y [*] (kN/cm ²)	f _{yw} [*] (kN/cm ²)	k _g [*] /k _{gk}	k _q [*] /k _{qk}	f _c [*] /f _{ck}	f _y [*] /f _{yk}	f _{yw} [*] /f _{ywk}
V0	1.38	G1	0.8	0.2	4.26	4.26	1.194	2.397	3.592	50.775	---	1.194	2.397	1.197	1.016	---
V0	1.38	G2	0.8	0.2	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.8	0.2	8.88		1.202	6.692	2.208	56.460	---	1.202	6.692	0.736	1.129	---
V0	1.38	G4	0.8	0.2	13.11		1.207	10.797	1.441	55.473	---	1.207	10.797	0.480	1.109	---
V0	1.38	G5	0.8	0.2	17.29		1.211	17.222	1.033	54.277	---	1.211	17.222	0.344	1.086	---
V0	1.38	G1	0.6	0.4	4.05	4.05	1.073	2.767	3.604	52.745	---	1.073	2.767	1.201	1.055	---
V0	1.38	G2	0.6	0.4	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.6	0.4	6.40		1.075	4.747	2.774	56.189	---	1.075	4.747	0.925	1.124	---
V0	1.38	G4	0.6	0.4	10.45		1.077	8.889	1.953	55.678	---	1.077	8.889	0.651	1.114	---
V0	1.38	G5	0.6	0.4	13.78		1.078	13.625	1.509	55.047	---	1.078	13.625	0.503	1.101	---
V0	1.38	G1	0.4	0.6	3.84	3.84	1.032	2.697	3.606	53.479	---	1.032	2.697	1.202	1.070	---
V0	1.38	G2	0.4	0.6	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.4	0.6	6.83		1.034	5.386	2.791	56.232	---	1.034	5.386	0.930	1.125	---
V0	1.38	G4	0.4	0.6	8.99		1.034	7.461	2.256	55.720	---	1.034	7.461	0.752	1.114	---
V0	1.38	G5	0.4	0.6	12.42		1.035	12.116	1.748	55.154	---	1.035	12.116	0.583	1.103	---
V0	1.38	G1	0.2	0.8	3.83	3.83	1.012	2.717	3.604	53.792	---	1.012	2.717	1.201	1.076	---
V0	1.38	G2	0.2	0.8	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.38	G3	0.2	0.8	6.55		1.013	5.137	2.867	56.243	---	1.013	5.137	0.956	1.125	---
V0	1.38	G4	0.2	0.8	8.01		1.013	6.465	2.466	55.735	---	1.013	6.465	0.822	1.115	---
V0	1.38	G5	0.2	0.8	11.36		1.013	10.850	1.941	55.199	---	1.013	10.850	0.647	1.104	---

Quadro D.11 – Resultados exemplo IV, série V0 – a/d = 1,38.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	β _{sist}	k _g [*]	k _q [*]	f _c [*] (kN/cm ²)	f _y [*] (kN/cm ²)	f _{yw} [*] (kN/cm ²)	k _g [*] /k _{gk}	k _q [*] /k _{qk}	f _c [*] /f _{ck}	f _y [*] /f _{yk}	f _{yw} [*] /f _{ywk}	
V0	1.6	G1	0.8	0.2	3.99	3.99	1.192	2.204	3.588	50.995	---	1.192	2.204	1.196	1.020	---	
V0	1.6	G2	0.8	0.2	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.8	0.2	8.64		1.202	6.360	2.230	56.512	---	1.202	6.360	0.743	1.130	---	
V0	1.6	G4	0.8	0.2	13.55		1.207	11.528	1.403	55.193	---	1.207	11.528	0.468	1.104	---	
V0	1.6	G5	0.8	0.2	18.20		1.212	18.995	0.969	53.565	---	1.212	18.995	0.323	1.071	---	
V0	1.6	G1	0.6	0.4	4.01	4.01	1.073	2.737	3.597	52.794	---	1.073	2.737	1.199	1.056	---	
V0	1.6	G2	0.6	0.4	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.6	0.4	7.46		1.076	5.907	2.611	56.337	---	1.076	5.907	0.870	1.127	---	
V0	1.6	G4	0.6	0.4	10.85		1.077	9.482	1.908	55.481	---	1.077	9.482	0.636	1.110	---	
V0	1.6	G5	0.6	0.4	14.96		1.079	15.610	1.385	54.471	---	1.079	15.610	0.462	1.089	---	
V0	1.6	G1	0.4	0.6	3.88	3.88	1.032	2.724	3.599	53.480	---	1.032	2.724	1.200	1.070	---	
V0	1.6	G2	0.4	0.6	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.4	0.6	6.85		1.034	5.392	2.777	56.299	---	1.034	5.392	0.926	1.126	---	
V0	1.6	G4	0.4	0.6	9.34		1.034	7.935	2.213	55.566	---	1.034	7.935	0.738	1.111	---	
V0	1.6	G5	0.4	0.6	13.25		1.035	13.502	1.651	54.724	---	1.035	13.502	0.550	1.094	---	
V0	1.6	G1	0.2	0.8	3.97	3.97	1.012	2.825	3.595	53.734	---	1.012	2.825	1.198	1.075	---	
V0	1.6	G2	0.2	0.8	---		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
V0	1.6	G3	0.2	0.8	5.79		1.012	4.324	2.968	56.236	---	1.012	4.324	0.989	1.125	---	
V0	1.6	G4	0.2	0.8	8.31		1.013	6.851	2.429	55.605	---	1.013	6.851	0.810	1.112	---	
V0	1.6	G5	0.2	0.8	11.80		1.013	11.587	1.897	54.880	---	1.013	11.587	0.632	1.098	---	

Quadro D.12 – Resultados exemplo IV, série V0 – a/d = 1,60.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	β _{sist}	k _g [*]	k _q [*]	f _c [*] (kN/cm ²)	f _y [*] (kN/cm ²)	f _{yw} [*] (kN/cm ²)	k _g [*] /k _{gk}	k _q [*] /k _{qk}	f _c [*] /f _{ck}	f _y [*] /f _{yk}	f _{yw} [*] /f _{ywk}
VS	0.74	G1	0.8	0.2	4.88	4.50	1.198	2.893	3.626	50.200	---	1.198	2.893	1.209	1.004	---
VS	0.74	G2	0.8	0.2	4.52		1.196	2.688	0.000	0.000	61.145	1.196	2.688	0.000	0.000	1.019
VS	0.74	G3	0.8	0.2	5.97		1.199	3.551	2.607	55.997	---	1.199	3.551	0.869	1.120	---
VS	0.74	G4	0.8	0.2	12.84		1.206	10.165	1.445	55.990	---	1.206	10.165	0.482	1.120	---
VS	0.74	G5	0.8	0.2	14.96		1.209	13.049	1.215	55.781	---	1.209	13.049	0.405	1.116	---
VS	0.74	G1	0.6	0.4	5.69	5.44	1.075	4.274	3.624	51.466	---	1.075	4.274	1.208	1.029	---
VS	0.74	G2	0.6	0.4	5.46		1.075	4.088	0.000	0.000	62.190	1.075	4.088	0.000	0.000	1.037
VS	0.74	G3	0.6	0.4	6.50		1.075	4.913	2.793	56.005	---	1.075	4.913	0.931	1.120	---
VS	0.74	G4	0.6	0.4	10.26		1.077	8.524	1.956	55.972	---	1.077	8.524	0.652	1.119	---
VS	0.74	G5	0.6	0.4	12.07		1.078	10.897	1.700	55.816	---	1.078	10.897	0.567	1.116	---
VS	0.74	G1	0.4	0.6	4.63	4.40	1.033	3.342	3.628	52.874	---	1.033	3.342	1.209	1.057	---
VS	0.74	G2	0.4	0.6	4.42		1.033	3.185	0.000	0.000	63.403	1.033	3.185	0.000	0.000	1.057
VS	0.74	G3	0.4	0.6	5.36		1.033	3.906	3.026	55.975	---	1.033	3.906	1.009	1.119	---
VS	0.74	G4	0.4	0.6	8.79		1.034	7.135	2.262	55.954	---	1.034	7.135	0.754	1.119	---
VS	0.74	G5	0.4	0.6	10.41		1.034	9.145	2.007	55.852	---	1.034	9.145	0.669	1.117	---
VS	0.74	G1	0.2	0.8	3.96	3.97	1.012	2.812	3.631	53.619	---	1.012	2.812	1.210	1.072	---
VS	0.74	G2	0.2	0.8	4.87		1.012	3.620	0.000	0.000	63.384	1.012	3.620	0.000	0.000	1.056
VS	0.74	G3	0.2	0.8	4.64		1.012	3.297	3.161	55.960	---	1.012	3.297	1.054	1.119	---
VS	0.74	G4	0.2	0.8	7.81		1.013	6.158	2.470	55.946	---	1.013	6.158	0.823	1.119	---
VS	0.74	G5	0.2	0.8	9.30		1.013	7.916	2.225	55.869	---	1.013	7.916	0.742	1.117	---

Quadro D.13 – Resultados exemplo IV, série VS – a/d = 0,74.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	β _{sist}	k _g [*]	k _q [*]	f _c [*] (kN/cm ²)	f _y [*] (kN/cm ²)	f _{yw} [*] (kN/cm ²)	k _g [*] /k _{gk}	k _q [*] /k _{qk}	f _c [*] /f _{ck}	f _y [*] /f _{yk}	f _{yw} [*] /f _{ywk}
VS	0.96	G1	0.8	0.2	4.45	4.45	1.196	2.531	3.621	50.544	---	1.196	2.531	1.207	1.011	---
VS	0.96	G2	0.8	0.2	6.31		1.201	4.456	0.000	0.000	59.907	1.201	4.456	0.000	0.000	0.998
VS	0.96	G3	0.8	0.2	7.41		1.201	5.053	2.432	56.070	---	1.201	5.053	0.811	1.121	---
VS	0.96	G4	0.8	0.2	12.62		1.206	9.924	1.475	55.924	---	1.206	9.924	0.492	1.118	---
VS	0.96	G5	0.8	0.2	15.67		1.209	14.118	1.148	55.600	---	1.209	14.118	0.383	1.112	---
VS	0.96	G1	0.6	0.4	4.80	4.55	1.074	3.400	3.622	52.162	---	1.074	3.400	1.207	1.043	---
VS	0.96	G2	0.6	0.4	4.58		1.074	3.242	0.000	0.000	62.773	1.074	3.242	0.000	0.000	1.046
VS	0.96	G3	0.6	0.4	6.99		1.075	5.449	2.723	56.048	---	1.075	5.449	0.908	1.121	---
VS	0.96	G4	0.6	0.4	10.08		1.077	8.325	1.988	55.923	---	1.077	8.325	0.663	1.118	---
VS	0.96	G5	0.6	0.4	12.68		1.078	11.753	1.621	55.709	---	1.078	11.753	0.540	1.114	---
VS	0.96	G1	0.4	0.6	3.89	3.89	1.032	2.729	3.627	53.377	---	1.032	2.729	1.209	1.068	---
VS	0.96	G2	0.4	0.6	4.93		1.033	3.646	0.000	0.000	63.085	1.033	3.646	0.000	0.000	1.051
VS	0.96	G3	0.4	0.6	5.78		1.033	4.310	2.970	56.002	---	1.033	4.310	0.990	1.120	---
VS	0.96	G4	0.4	0.6	8.63		1.034	6.955	2.293	55.923	---	1.034	6.955	0.764	1.118	---
VS	0.96	G5	0.4	0.6	10.96		1.034	9.869	1.926	55.782	---	1.034	9.869	0.642	1.116	---
VS	0.96	G1	0.2	0.8	3.89	3.88	1.012	2.753	3.626	53.683	---	1.012	2.753	1.209	1.074	---
VS	0.96	G2	0.2	0.8	4.22		1.012	3.034	0.000	0.000	63.788	1.012	3.034	0.000	0.000	1.063
VS	0.96	G3	0.2	0.8	4.74		1.012	3.381	3.144	55.985	---	1.012	3.381	1.048	1.120	---
VS	0.96	G4	0.2	0.8	7.66		1.013	5.997	2.500	55.922	---	1.013	5.997	0.833	1.118	---
VS	0.96	G5	0.2	0.8	9.86		1.013	8.631	2.138	55.797	---	1.013	8.631	0.713	1.116	---

Quadro D.14 – Resultados exemplo IV, série VS – a/d = 0,96.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	β _{sist}	k _g [*]	k _q [*]	f _c [*] (kN/cm ²)	f _y [*] (kN/cm ²)	f _{yw} [*] (kN/cm ²)	k _g [*] /k _{gk}	k _q [*] /k _{qk}	f _c [*] /f _{ck}	f _y [*] /f _{yk}	f _{yw} [*] /f _{ywk}
VS	1.38	G1	0.8	0.2	3.87	3.87	1.190	2.115	3.611	51.016	---	1.190	2.115	1.204	1.020	---
VS	1.38	G2	0.8	0.2	5.05		1.198	3.148	0.000	0.000	60.800	1.198	3.148	0.000	0.000	1.013
VS	1.38	G3	0.8	0.2	8.82		1.202	6.714	2.241	56.246	---	1.202	6.714	0.747	1.125	---
VS	1.38	G4	0.8	0.2	13.04		1.207	10.599	1.439	55.669	---	1.207	10.599	0.480	1.113	---
VS	1.38	G5	0.8	0.2	17.17		1.211	16.606	1.022	54.960	---	1.211	16.606	0.341	1.099	---
VS	1.38	G1	0.6	0.4	3.85	3.85	1.072	2.614	3.617	52.829	---	1.072	2.614	1.206	1.057	---
VS	1.38	G2	0.6	0.4	5.20		1.074	3.820	0.000	0.000	62.373	1.074	3.820	0.000	0.000	1.040
VS	1.38	G3	0.6	0.4	7.51		1.075	6.039	2.640	56.140	---	1.075	6.039	0.880	1.123	---
VS	1.38	G4	0.6	0.4	10.43		1.077	8.829	1.947	55.769	---	1.077	8.829	0.649	1.115	---
VS	1.38	G5	0.6	0.4	14.15		1.078	13.972	1.445	55.330	---	1.078	13.972	0.482	1.107	---
VS	1.38	G1	0.4	0.6	3.94	3.93	1.032	2.772	3.617	53.378	---	1.032	2.772	1.206	1.068	---
VS	1.38	G2	0.4	0.6	4.20		1.032	3.000	0.000	0.000	63.533	1.032	3.000	0.000	0.000	1.059
VS	1.38	G3	0.4	0.6	5.15		1.033	3.688	3.037	56.050	---	1.033	3.688	1.012	1.121	---
VS	1.38	G4	0.4	0.6	8.95		1.034	7.372	2.254	55.798	---	1.034	7.372	0.751	1.116	---
VS	1.38	G5	0.4	0.6	12.26		1.035	11.759	1.750	55.448	---	1.035	11.759	0.583	1.109	---
VS	1.38	G1	0.2	0.8	4.05	4.04	1.012	2.881	3.614	53.623	---	1.012	2.881	1.205	1.072	---
VS	1.38	G2	0.2	0.8	4.43		1.012	3.212	0.000	0.000	63.664	1.012	3.212	0.000	0.000	1.061
VS	1.38	G3	0.2	0.8	6.93		1.013	5.597	2.829	56.162	---	1.013	5.597	0.943	1.123	---
VS	1.38	G4	0.2	0.8	7.98		1.013	6.399	2.460	55.799	---	1.013	6.399	0.820	1.116	---
VS	1.38	G5	0.2	0.8	11.41		1.013	10.799	1.914	55.433	---	1.013	10.799	0.638	1.109	---

Quadro D.15 – Resultados exemplo IV, série VS – a/d = 1,38.

Série	a/d	G _i	k _g	k _q	β _i	β _{sist}	k _g [*]	k _q [*]	f _c [*] (kN/cm ²)	f _y [*] (kN/cm ²)	f _{yw} [*] (kN/cm ²)	k _g [*] /k _{gk}	k _q [*] /k _{qk}	f _c [*] /f _{ck}	f _y [*] /f _{yk}	f _{yw} [*] /f _{ywk}
VS	1.6	G1	0.8	0.2	3.99	3.99	1.192	2.198	3.604	50.947	---	1.192	2.198	1.201	1.019	---
VS	1.6	G2	0.8	0.2	4.67		1.197	2.814	0.000	0.000	61.047	1.197	2.814	0.000	0.000	1.017
VS	1.6	G3	0.8	0.2	7.99		1.202	5.651	2.336	56.278	---	1.202	5.651	0.779	1.126	---
VS	1.6	G4	0.8	0.2	13.46		1.207	11.256	1.400	55.455	---	1.207	11.256	0.467	1.109	---
VS	1.6	G5	0.8	0.2	18.02		1.212	18.176	0.961	54.391	---	1.212	18.176	0.320	1.088	---
VS	1.6	G1	0.6	0.4	3.82	3.82	1.072	2.593	3.613	52.863	---	1.072	2.593	1.204	1.057	---
VS	1.6	G2	0.6	0.4	4.95		1.074	3.580	0.000	0.000	62.538	1.074	3.580	0.000	0.000	1.042
VS	1.6	G3	0.6	0.4	5.67		1.074	4.021	2.878	56.099	---	1.074	4.021	0.959	1.122	---
VS	1.6	G4	0.6	0.4	10.76		1.077	9.296	1.906	55.653	---	1.077	9.296	0.635	1.113	---
VS	1.6	G5	0.6	0.4	14.73		1.079	14.962	1.384	55.037	---	1.079	14.962	0.461	1.101	---
VS	1.6	G1	0.4	0.6	3.87	3.83	1.032	2.715	3.612	53.443	---	1.032	2.715	1.204	1.069	---
VS	1.6	G2	0.4	0.6	4.00		1.032	2.834	0.000	0.000	63.650	1.032	2.834	0.000	0.000	1.061
VS	1.6	G3	0.4	0.6	7.39		1.034	6.062	2.717	56.213	---	1.034	6.062	0.906	1.124	---
VS	1.6	G4	0.4	0.6	9.28		1.034	7.820	2.209	55.690	---	1.034	7.820	0.736	1.114	---
VS	1.6	G5	0.4	0.6	13.27		1.035	13.314	1.623	55.117	---	1.035	13.314	0.541	1.102	---
VS	1.6	G1	0.2	0.8	4.01	3.99	1.012	2.851	3.608	53.666	---	1.012	2.851	1.203	1.073	---
VS	1.6	G2	0.2	0.8	4.24		1.012	3.055	0.000	0.000	63.773	1.012	3.055	0.000	0.000	1.063
VS	1.6	G3	0.2	0.8	6.31		1.012	4.893	2.913	56.170	---	1.012	4.893	0.971	1.123	---
VS	1.6	G4	0.2	0.8	8.26		1.013	6.752	2.422	55.710	---	1.013	6.752	0.807	1.114	---
VS	1.6	G5	0.2	0.8	11.87		1.013	11.528	1.858	55.205	---	1.013	11.528	0.619	1.104	---

Quadro D.16 – Resultados exemplo IV, série VS – a/d = 1,60.

ANEXO – E

Os Quadros E.1 à E.8 apresentam os resultados do exemplo V, para as vigas da série V0 e VS, para cada percentual de carga variável, considerando-se no dimensionamento o par (bitola ϕ_L , quantidade de barras n_L) para a armadura longitudinal e quantidade de barras da armadura transversal n_e dispostas ao longo do comprimento a_L que retornaram um índice de confiabilidade do sistema superior ao índice de confiabilidade de referência.

Série	a/d	k_g	k_q	γ_g	γ_q	F_g (kN)	F_q (kN)	F (kN)	a (cm)	ϕ_L (cm)	n_L	θ_w (cm)	n_e	β_{sist}	$P_{f,sist}$	Série	a/d	k_g	k_q	γ_g	γ_q	F_g (kN)	F_q (kN)	F (kN)	a (cm)	ϕ_L (cm)	n_L	θ_w (cm)	n_e	β_{sist}	$P_{f,sist}$
V0	0.74	0.8	0.2	1.2	1.2	96	24	120	35	1.00	3	0	0	5.08	1.870E-07	V0	0.74	0.4	0.6	1.2	1.2	48	72	120	35	1.00	3	0	0	3.03	1.230E-03
V0	0.74	0.8	0.2	1.2	1.3	96	26	122	35	1.00	3	0	0	5.08	1.870E-07	V0	0.74	0.4	0.6	1.2	1.3	48	78	126	35	1.00	3	0	0	3.03	1.230E-03
V0	0.74	0.8	0.2	1.2	1.4	96	28	124	35	1.00	3	0	0	5.08	1.870E-07	V0	0.74	0.4	0.6	1.2	1.4	48	84	132	35	1.00	3	0	0	3.03	1.230E-03
V0	0.74	0.8	0.2	1.2	1.5	96	30	126	35	1.00	3	0	0	5.08	1.870E-07	V0	0.74	0.4	0.6	1.2	1.5	48	90	138	35	1.25	2	0	0	3.19	7.130E-04
V0	0.74	0.8	0.2	1.3	1.2	104	24	128	35	1.00	3	0	0	5.08	1.870E-07	V0	0.74	0.4	0.6	1.3	1.2	52	72	124	35	1.00	3	0	0	3.03	1.230E-03
V0	0.74	0.8	0.2	1.3	1.3	104	26	130	35	1.00	3	0	0	5.08	1.870E-07	V0	0.74	0.4	0.6	1.3	1.3	52	78	130	35	1.00	3	0	0	3.03	1.230E-03
V0	0.74	0.8	0.2	1.3	1.4	104	28	132	35	1.00	3	0	0	5.08	1.870E-07	V0	0.74	0.4	0.6	1.3	1.4	52	84	136	35	1.25	2	0	0	3.19	7.130E-04
V0	0.74	0.8	0.2	1.3	1.5	104	30	134	35	1.00	3	0	0	5.08	1.870E-07	V0	0.74	0.4	0.6	1.3	1.5	52	90	142	35	0.80	5	0	0	3.31	4.660E-04
V0	0.74	0.8	0.2	1.4	1.2	112	24	136	35	1.25	2	0	0	5.36	4.090E-08	V0	0.74	0.4	0.6	1.4	1.2	56	72	128	35	1.00	3	0	0	3.03	1.230E-03
V0	0.74	0.8	0.2	1.4	1.3	112	26	138	35	1.25	2	0	0	5.36	4.090E-08	V0	0.74	0.4	0.6	1.4	1.3	56	78	134	35	1.00	3	0	0	3.03	1.230E-03
V0	0.74	0.8	0.2	1.4	1.4	112	28	140	35	1.25	2	0	0	5.36	4.090E-08	V0	0.74	0.4	0.6	1.4	1.4	56	84	140	35	1.25	2	0	0	3.19	7.130E-04
V0	0.74	0.8	0.2	1.4	1.5	112	30	142	35	0.80	5	0	0	5.57	1.260E-08	V0	0.74	0.4	0.6	1.4	1.5	56	90	146	35	0.80	6	0	0	4.07	2.360E-05
V0	0.74	0.8	0.2	1.5	1.2	120	24	144	35	0.80	5	0	0	5.57	1.260E-08	V0	0.74	0.4	0.6	1.5	1.2	60	72	132	35	1.00	3	0	0	3.03	1.230E-03
V0	0.74	0.8	0.2	1.5	1.3	120	26	146	35	0.80	6	0	0	6.86	3.340E-12	V0	0.74	0.4	0.6	1.5	1.3	60	78	138	35	1.25	2	0	0	3.19	7.130E-04
V0	0.74	0.8	0.2	1.5	1.4	120	28	148	35	0.80	6	0	0	6.86	3.340E-12	V0	0.74	0.4	0.6	1.5	1.4	60	84	144	35	0.80	5	0	0	3.31	4.660E-04
V0	0.74	0.8	0.2	1.5	1.5	120	30	150	35	0.80	6	0	0	6.86	3.340E-12	V0	0.74	0.4	0.6	1.5	1.5	60	90	150	35	0.80	6	0	0	4.07	2.360E-05
V0	0.74	0.6	0.4	1.2	1.2	72	48	120	35	1.00	3	0	0	3.75	8.690E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.2	1.2	24	96	120	35	1.00	3	0	0	2.56	5.210E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.2	1.3	72	52	124	35	1.00	3	0	0	3.75	8.690E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.2	1.3	24	104	128	35	1.00	3	0	0	2.56	5.210E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.2	1.4	72	56	128	35	1.00	3	0	0	3.75	8.690E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.2	1.4	24	112	136	35	1.25	2	0	0	2.70	3.440E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.2	1.5	72	60	132	35	1.00	3	0	0	3.75	8.690E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.2	1.5	24	120	144	35	0.80	5	0	0	2.81	2.500E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.3	1.2	78	48	126	35	1.00	3	0	0	3.75	8.690E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.3	1.2	26	96	122	35	1.00	3	0	0	2.56	5.210E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.3	1.3	78	52	130	35	1.00	3	0	0	3.75	8.690E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.3	1.3	26	104	130	35	1.00	3	0	0	2.56	5.210E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.3	1.4	78	56	134	35	1.00	3	0	0	3.75	8.690E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.3	1.4	26	112	138	35	1.25	2	0	0	2.70	3.440E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.3	1.5	78	60	138	35	1.25	2	0	0	3.95	3.890E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.3	1.5	26	120	146	35	0.80	6	0	0	3.47	2.601E-04
V0	0.74	0.6	0.4	1.4	1.2	84	48	132	35	1.00	3	0	0	3.75	8.690E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.4	1.2	28	96	124	35	1.00	3	0	0	2.56	5.210E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.4	1.3	84	52	136	35	1.25	2	0	0	3.95	3.890E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.4	1.3	28	104	132	35	1.00	3	0	0	2.56	5.210E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.4	1.4	84	56	140	35	1.25	2	0	0	3.95	3.890E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.4	1.4	28	112	140	35	1.25	2	0	0	2.70	3.440E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.4	1.5	84	60	144	35	0.80	5	0	0	4.10	2.080E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.4	1.5	28	120	148	35	0.80	6	0	0	3.47	2.601E-04
V0	0.74	0.6	0.4	1.5	1.2	90	48	138	35	1.25	2	0	0	3.95	3.890E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.5	1.2	30	96	126	35	1.00	3	0	0	2.56	5.210E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.5	1.3	90	52	142	35	0.80	5	0	0	4.10	2.080E-05	V0	0.74	0.2	0.8	1.5	1.3	30	104	134	35	1.00	3	0	0	2.56	5.210E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.5	1.4	90	56	146	35	0.80	6	0	0	5.02	2.610E-07	V0	0.74	0.2	0.8	1.5	1.4	30	112	142	35	0.80	5	0	0	2.81	2.500E-03
V0	0.74	0.6	0.4	1.5	1.5	90	60	150	35	0.80	6	0	0	5.02	2.610E-07	V0	0.74	0.2	0.8	1.5	1.5	30	120	150	35	0.80	6	0	0	3.47	2.601E-04

Quadro E.1 – Resultados exemplo V, série V0 – $a/d = 0,74$.

Série	a/d	k _g	k _q	γ _g	γ _q	F _g (kN)	F _q (kN)	F (kN)	a (cm)	θ _L (cm)	n _L	θ _w (cm)	n _e	β _{sist}	P _{r,sist}
V0	0.96	0.8	0.2	1.2	1.2	96	24	120	45	0.80	6	0	0	5.03	2.489E-07
V0	0.96	0.8	0.2	1.2	1.3	96	26	122	45	0.80	6	0	0	5.03	2.489E-07
V0	0.96	0.8	0.2	1.2	1.4	96	28	124	45	0.80	6	0	0	5.03	2.489E-07
V0	0.96	0.8	0.2	1.2	1.5	96	30	126	45	0.80	6	0	0	5.03	2.489E-07
V0	0.96	0.8	0.2	1.3	1.2	104	24	128	45	0.80	6	0	0	5.03	2.489E-07
V0	0.96	0.8	0.2	1.3	1.3	104	26	130	45	0.80	6	0	0	5.03	2.489E-07
V0	0.96	0.8	0.2	1.3	1.4	104	28	132	45	0.80	6	0	0	5.03	2.489E-07
V0	0.96	0.8	0.2	1.3	1.5	104	30	134	45	0.80	6	0	0	5.03	2.489E-07
V0	0.96	0.8	0.2	1.4	1.2	112	24	136	45	1.00	4	0	0	5.31	5.431E-08
V0	0.96	0.8	0.2	1.4	1.3	112	26	138	45	1.00	4	0	0	5.31	5.431E-08
V0	0.96	0.8	0.2	1.4	1.4	112	28	140	45	0.80	7	0	0	6.10	5.461E-10
V0	0.96	0.8	0.2	1.4	1.5	112	30	142	45	0.80	7	0	0	6.10	5.461E-10
V0	0.96	0.8	0.2	1.5	1.2	120	24	144	45	0.80	7	0	0	6.10	5.461E-10
V0	0.96	0.8	0.2	1.5	1.3	120	26	146	45	0.80	7	0	0	6.10	5.461E-10
V0	0.96	0.8	0.2	1.5	1.4	120	28	148	45	0.80	7	0	0	6.10	5.461E-10
V0	0.96	0.8	0.2	1.5	1.5	120	30	150	45	0.80	7	0	0	6.10	5.461E-10
V0	0.96	0.6	0.4	1.2	1.2	72	48	120	45	0.80	6	0	0	3.71	1.017E-04
V0	0.96	0.6	0.4	1.2	1.3	72	52	124	45	0.80	6	0	0	3.71	1.017E-04
V0	0.96	0.6	0.4	1.2	1.4	72	56	128	45	0.80	6	0	0	3.71	1.017E-04
V0	0.96	0.6	0.4	1.2	1.5	72	60	132	45	0.80	6	0	0	3.71	1.017E-04
V0	0.96	0.6	0.4	1.3	1.2	78	48	126	45	0.80	6	0	0	3.71	1.017E-04
V0	0.96	0.6	0.4	1.3	1.3	78	52	130	45	0.80	6	0	0	3.71	1.017E-04
V0	0.96	0.6	0.4	1.3	1.4	78	56	134	45	0.80	6	0	0	3.71	1.017E-04
V0	0.96	0.6	0.4	1.3	1.5	78	60	138	45	1.00	4	0	0	3.91	4.543E-05
V0	0.96	0.6	0.4	1.4	1.2	84	48	132	45	0.80	6	0	0	3.71	1.017E-04
V0	0.96	0.6	0.4	1.4	1.3	84	52	136	45	1.00	4	0	0	3.91	4.543E-05
V0	0.96	0.6	0.4	1.4	1.4	84	56	140	45	0.80	7	0	0	4.47	3.969E-06
V0	0.96	0.6	0.4	1.4	1.5	84	60	144	45	0.80	7	0	0	4.47	3.969E-06
V0	0.96	0.6	0.4	1.5	1.2	90	48	138	45	1.00	4	0	0	3.91	4.543E-05
V0	0.96	0.6	0.4	1.5	1.3	90	52	142	45	0.80	7	0	0	4.47	3.969E-06
V0	0.96	0.6	0.4	1.5	1.4	90	56	146	45	0.80	7	0	0	4.47	3.969E-06
V0	0.96	0.6	0.4	1.5	1.5	90	60	150	45	0.80	7	0	0	4.47	3.969E-06

Quadro E.2 – Resultados exemplo V, série V0 – a/d = 0,96.

Série	a/d	k _g	k _q	γ _g	γ _q	F _g (kN)	F _q (kN)	F (kN)	a (cm)	θ _L (cm)	n _L	θ _w (cm)	n _e	β _{sist}	P _{r,sist}
V0	1.38	0.8	0.2	1.2	1.2	96	24	120	65	0.80	8	0	0	4.26	1.030E-05
V0	1.38	0.8	0.2	1.2	1.3	96	26	122	65	0.80	9	0	0	5.12	1.558E-07
V0	1.38	0.8	0.2	1.2	1.4	96	28	124	65	0.80	9	0	0	5.12	1.558E-07
V0	1.38	0.8	0.2	1.2	1.5	96	30	126	65	0.80	9	0	0	5.12	1.558E-07
V0	1.38	0.8	0.2	1.3	1.2	104	24	128	65	0.80	9	0	0	5.12	1.558E-07
V0	1.38	0.8	0.2	1.3	1.3	104	26	130	65	0.80	9	0	0	5.12	1.558E-07
V0	1.38	0.8	0.2	1.3	1.4	104	28	132	65	0.80	9	0	0	5.12	1.558E-07
V0	1.38	0.8	0.2	1.3	1.5	104	30	134	65	0.80	9	0	0	5.12	1.558E-07
V0	1.38	0.8	0.2	1.4	1.2	112	24	136	65	1.00	6	0	0	5.50	1.850E-08
V0	1.38	0.8	0.2	1.4	1.3	112	26	138	65	1.00	6	0	0	5.50	1.850E-08
V0	1.38	0.8	0.2	1.4	1.4	112	28	140	65	1.00	6	0	0	5.50	1.850E-08
V0	1.38	0.8	0.2	1.4	1.5	112	30	142	65	1.00	6	0	0	5.50	1.850E-08
V0	1.38	0.8	0.2	1.5	1.2	120	24	144	65	1.25	4	0	0	5.77	3.854E-09
V0	1.38	0.8	0.2	1.5	1.3	120	26	146	65	1.25	4	0	0	5.77	3.854E-09
V0	1.38	0.8	0.2	1.5	1.4	120	28	148	65	0.80	10	0	0	5.85	2.472E-09
V0	1.38	0.8	0.2	1.5	1.5	120	30	150	65	1.00	7	0	0	6.54	3.104E-11
V0	1.38	0.6	0.4	1.2	1.2	72	48	120	65	0.80	8	0	0	3.18	7.370E-04
V0	1.38	0.6	0.4	1.2	1.3	72	52	124	65	0.80	9	0	0	3.77	8.032E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.2	1.4	72	56	128	65	0.80	9	0	0	3.77	8.032E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.2	1.5	72	60	132	65	0.80	9	0	0	3.77	8.032E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.3	1.2	78	48	126	65	0.80	9	0	0	3.77	8.032E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.3	1.3	78	52	130	65	0.80	9	0	0	3.77	8.032E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.3	1.4	78	56	134	65	0.80	9	0	0	3.77	8.032E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.3	1.5	78	60	138	65	1.00	6	0	0	4.05	2.602E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.4	1.2	84	48	132	65	0.80	9	0	0	3.77	8.032E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.4	1.3	84	52	136	65	1.00	6	0	0	4.05	2.602E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.4	1.4	84	56	140	65	1.00	6	0	0	4.05	2.602E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.4	1.5	84	60	144	65	1.25	4	0	0	4.24	1.135E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.5	1.2	90	48	138	65	1.00	6	0	0	4.05	2.602E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.5	1.3	90	52	142	65	1.00	6	0	0	4.05	2.602E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.5	1.4	90	56	146	65	1.25	4	0	0	4.24	1.135E-05
V0	1.38	0.6	0.4	1.5	1.5	90	60	150	65	1.00	7	0	0	4.78	8.820E-07

Quadro E.3 – Resultados exemplo V, série V0 – a/d = 1,38.

Série	a/d	k _g	k _q	γ _g	γ _q	F _g (kN)	F _q (kN)	F (kN)	a (cm)	θ _L (cm)	n _L	θ _w (cm)	n _e	β _{sist}	P _{r,sist}
V0	1.6	0.8	0.2	1.2	1.2	96	24	120	75	1.00	6	0	0	4.41	5.187E-06
V0	1.6	0.8	0.2	1.2	1.3	96	26	122	75	1.00	6	0	0	4.41	5.187E-06
V0	1.6	0.8	0.2	1.2	1.4	96	28	124	75	1.25	4	0	0	4.70	1.323E-06
V0	1.6	0.8	0.2	1.2	1.5	96	30	126	75	1.25	4	0	0	4.70	1.323E-06
V0	1.6	0.8	0.2	1.3	1.2	104	24	128	75	0.80	10	0	0	4.78	8.985E-07
V0	1.6	0.8	0.2	1.3	1.3	104	26	130	75	1.00	7	0	0	5.50	1.951E-08
V0	1.6	0.8	0.2	1.3	1.4	104	28	132	75	1.00	7	0	0	5.50	1.951E-08
V0	1.6	0.8	0.2	1.3	1.5	104	30	134	75	1.00	7	0	0	5.50	1.951E-08
V0	1.6	0.8	0.2	1.4	1.2	112	24	136	75	1.00	7	0	0	5.50	1.951E-08
V0	1.6	0.8	0.2	1.4	1.3	112	26	138	75	1.00	7	0	0	5.50	1.951E-08
V0	1.6	0.8	0.2	1.4	1.4	112	28	140	75	1.00	7	0	0	5.50	1.951E-08
V0	1.6	0.8	0.2	1.4	1.5	112	30	142	75	0.80	10	0	0	6.05	7.443E-10
V0	1.6	0.8	0.2	1.5	1.2	120	24	144	75	0.80	12	0	0	6.05	7.443E-10
V0	1.6	0.8	0.2	1.5	1.3	120	26	146	75	0.80	12	0	0	6.05	7.443E-10
V0	1.6	0.8	0.2	1.5	1.4	120	28	148	75	0.80	12	0	0	6.05	7.443E-10
V0	1.6	0.8	0.2	1.5	1.5	120	30	150	75	0.80	12	0	0	6.05	7.443E-10
V0	1.6	0.6	0.4	1.2	1.2	72	48	120	75	1.00	6	0	0	3.28	5.144E-04
V0	1.6	0.6	0.4	1.2	1.3	72	52	124	75	1.25	4	0	0	3.48	2.498E-04
V0	1.6	0.6	0.4	1.2	1.4	72	56	128	75	0.80	10	0	0	3.54	2.038E-04
V0	1.6	0.6	0.4	1.2	1.5	72	60	132	75	1.00	7	0	0	4.04	2.694E-05
V0	1.6	0.6	0.4	1.3	1.2	78	48	126	75	1.25	4	0	0	3.48	2.498E-04
V0	1.6	0.6	0.4	1.3	1.3	78	52	130	75	1.00	7	0	0	4.04	2.694E-05
V0	1.6	0.6	0.4	1.3	1.4	78	56	134	75	1.00	7	0	0	4.04	2.694E-05
V0	1.6	0.6	0.4	1.3	1.5	78	60	138	75	1.00	7	0	0	4.04	2.694E-05
V0	1.6	0.6	0.4	1.4	1.2	84	48	132	75	1.00	7	0	0	4.04	2.694E-05
V0	1.6	0.6	0.4	1.4	1.3	84	52	136	75	1.00	7	0	0	4.04	2.694E-05
V0	1.6	0.6	0.4	1.4	1.4	84	56	140	75	1.00	7	0	0	4.04	2.694E-05
V0	1.6	0.6	0.4	1.4	1.5	84	60	144	75	0.80	12	0	0	4.43	4.798E-06
V0	1.6	0.6	0.4	1.5	1.2	90	48	138	75	1.00	7	0	0	4.04	2.694E-05
V0	1.6	0.6	0.4	1.5	1.3	90	52	142	75	0.80	12	0	0	4.43	4.798E-06
V0	1.6	0.6	0.4	1.5	1.4	90	56	146	75	0.80	12	0	0	4.43	4.798E-06
V0	1.6	0.6	0.4	1.5	1.5	90	60	150	75	0.80	12	0	0	4.43	4.798E-06

Quadro E.4 – Resultados exemplo V, série V0 – a/d = 1,60.

Série	a/d	k _g	k _q	γ _g	γ _q	F _g (kN)	F _q (kN)	F (kN)	a (cm)	θ _L (cm)	n _L	θ _w (cm)	n _e	β _{sist}	P _{r,sist}
VS	0.74	0.8	0.2	1.2	1.2	96	24	120	35	0.8	2	0.63	2	4.50	3.364E-06
VS	0.74	0.8	0.2	1.2	1.3	96	26	122	35	0.8	2	0.63	2	4.50	3.364E-06
VS	0.74	0.8	0.2	1.2	1.4	96	28	124	35	0.8	2	0.63	2	4.50	3.364E-06
VS	0.74	0.8	0.2	1.2	1.5	96	30	126	35	0.8	2	0.63	2	4.50	3.364E-06
VS	0.74	0.8	0.2	1.3	1.2	104	24	128	35	0.8	2	0.63	3	4.88	5.196E-07
VS	0.74	0.8	0.2	1.3	1.3	104	26	130	35	0.8	2	0.63	3	4.88	5.196E-07
VS	0.74	0.8	0.2	1.3	1.4	104	28	132	35	0.8	2	0.63	3	4.88	5.196E-07
VS	0.74	0.8	0.2	1.3	1.5	104	30	134	35	0.8	3	0.63	3	7.53	2.637E-14
VS	0.74	0.8	0.2	1.4	1.2	112	24	136	35	0.8	3	0.63	3	7.53	2.637E-14
VS	0.74	0.8	0.2	1.4	1.3	112	26	138	35	0.8	3	0.63	3	7.53	2.637E-14
VS	0.74	0.8	0.2	1.4	1.4	112	28	140	35	0.8	3	0.63	3	7.53	2.637E-14
VS	0.74	0.8	0.2	1.4	1.5	112	30	142	35	0.8	3	0.63	3	7.53	2.637E-14
VS	0.74	0.8	0.2	1.5	1.2	120	24	144	35	0.8	3	0.63	3	7.53	2.637E-14
VS	0.74	0.8	0.2	1.5	1.3	120	26	146	35	0.8	3	0.63	3	7.53	2.637E-14
VS	0.74	0.8	0.2	1.5	1.4	120	28	148	35	0.8	3	0.63	3	7.53	2.637E-14
VS	0.74	0.8	0.2	1.5	1.5	120	30	150	35	0.8	3	0.63	3	7.53	2.637E-14
VS	0.74	0.6	0.4	1.2	1.2	72	48	120	35	0.8	2	0.63	2	3.31	4.687E-04
VS	0.74	0.6	0.4	1.2	1.3	72	52	124	35	0.8	2	0.63	2	3.31	4.687E-04
VS	0.74	0.6	0.4	1.2	1.4	72	56	128	35	0.8	2	0.63	3	3.62	1.481E-04
VS	0.74	0.6	0.4	1.2	1.5	72	60	132	35	0.8	2	0.63	3	3.62	1.481E-04
VS	0.74	0.6	0.4	1.3	1.2	78	48	126	35	0.8	2	0.63	2	3.31	4.687E-04
VS	0.74	0.6	0.4	1.3	1.3	78	52	130	35	0.8	2	0.63	3	3.62	1.481E-04
VS	0.74	0.6	0.4	1.3	1.4	78	56	134	35	0.8	3	0.63	3	5.44	2.666E-08
VS	0.74	0.6	0.4	1.3	1.5	78	60	138	35	0.8	3	0.63	3	5.44	2.666E-08
VS	0.74	0.6	0.4	1.4	1.2	84	48	132	35	0.8	2	0.63	3	3.62	1.481E-04
VS	0.74	0.6	0.4	1.4	1.3	84	52	136	35	0.8	3	0.63	3	5.44	2.666E-08
VS	0.74	0.6	0.4	1.4	1.4	84	56	140	35	0.8	3	0.63	3	5.44	2.666E-08
VS	0.74	0.6	0.4	1.4	1.5	84	60	144	35	0.8	3	0.63	3	5.44	2.666E-08
VS	0.74	0.6	0.4	1.5	1.2	90	48	138	35	0.8	3	0.63	3	5.44	2.666E-08
VS	0.74	0.6	0.4	1.5	1.3	90	52	142	35	0.8	3	0.63	3	5.44	2.666E-08
VS	0.74	0.6	0.4	1.5	1.4	90	56	146	35	0.8	3	0.63	3	5.44	2.666E-08
VS	0.74	0.6	0.4	1.5	1.5	90	60	150	35	0.8	3	0.63	3	5.44	2.666E-08

Quadro E.5 – Resultados exemplo V, série VS – a/d = 0,74.

Série	a/d	k _g	k _q	γ _g	γ _q	F _g (kN)	F _q (kN)	F (kN)	a (cm)	θ _L (cm)	n _L	θ _w (cm)	n _e	β _{sist}	P _{r,sist}	Série	a/d	k _g	k _q	γ _g	γ _q	F _g (kN)	F _q (kN)	F (kN)	a (cm)	θ _L (cm)	n _L	θ _w (cm)	n _e	β _{sist}	P _{r,sist}
VS	0.96	0.8	0.2	1.2	1.2	96	24	120	45	0.8	3	0.63	3	4.45	4.357E-06	VS	0.96	0.4	0.6	1.2	1.2	48	72	120	45	0.8	3	0.63	3	2.67	3.812E-03
VS	0.96	0.8	0.2	1.2	1.3	96	26	122	45	0.8	3	0.63	3	4.45	4.357E-06	VS	0.96	0.4	0.6	1.2	1.3	48	78	126	45	1	2	0.63	3	2.84	2.241E-03
VS	0.96	0.8	0.2	1.2	1.4	96	28	124	45	0.8	3	0.63	3	4.45	4.357E-06	VS	0.96	0.4	0.6	1.2	1.4	48	84	132	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.8	0.2	1.2	1.5	96	30	126	45	1	2	0.63	3	4.75	1.042E-06	VS	0.96	0.4	0.6	1.2	1.5	48	90	138	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.8	0.2	1.3	1.2	104	24	128	45	1	2	0.63	3	4.75	1.042E-06	VS	0.96	0.4	0.6	1.3	1.2	52	72	124	45	0.8	3	0.63	3	2.67	3.812E-03
VS	0.96	0.8	0.2	1.3	1.3	104	26	130	45	1	2	0.63	3	4.75	1.042E-06	VS	0.96	0.4	0.6	1.3	1.3	52	78	130	45	1	2	0.63	3	2.84	2.241E-03
VS	0.96	0.8	0.2	1.3	1.4	104	28	132	45	0.8	4	0.63	3	6.28	1.646E-10	VS	0.96	0.4	0.6	1.3	1.4	52	84	136	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.8	0.2	1.3	1.5	104	30	134	45	0.8	4	0.63	3	6.28	1.646E-10	VS	0.96	0.4	0.6	1.3	1.5	52	90	142	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.8	0.2	1.4	1.2	112	24	136	45	0.8	4	0.63	3	6.28	1.646E-10	VS	0.96	0.4	0.6	1.4	1.2	56	72	128	45	1	2	0.63	3	2.84	2.241E-03
VS	0.96	0.8	0.2	1.4	1.3	112	26	138	45	0.8	4	0.63	3	6.28	1.646E-10	VS	0.96	0.4	0.6	1.4	1.3	56	78	134	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.8	0.2	1.4	1.4	112	28	140	45	0.8	4	0.63	3	6.28	1.646E-10	VS	0.96	0.4	0.6	1.4	1.4	56	84	140	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.8	0.2	1.4	1.5	112	30	142	45	0.8	4	0.63	3	6.28	1.646E-10	VS	0.96	0.4	0.6	1.4	1.5	56	90	146	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.8	0.2	1.5	1.2	120	24	144	45	0.8	4	0.63	3	6.28	1.646E-10	VS	0.96	0.4	0.6	1.5	1.2	60	72	132	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.8	0.2	1.5	1.3	120	26	146	45	0.8	4	0.63	3	6.28	1.646E-10	VS	0.96	0.4	0.6	1.5	1.3	60	78	138	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.8	0.2	1.5	1.4	120	28	148	45	0.8	4	0.63	3	6.28	1.646E-10	VS	0.96	0.4	0.6	1.5	1.4	60	84	144	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.8	0.2	1.5	1.5	120	30	150	45	0.8	4	0.63	3	6.28	1.646E-10	VS	0.96	0.4	0.6	1.5	1.5	60	90	150	45	0.8	4	0.63	3	3.67	1.222E-04
VS	0.96	0.6	0.4	1.2	1.2	72	48	120	45	0.8	3	0.63	3	3.31	4.591E-04	VS	0.96	0.2	0.8	1.2	1.2	24	96	120	45	0.8	3	0.63	3	2.25	1.218E-02
VS	0.96	0.6	0.4	1.2	1.3	72	52	124	45	0.8	3	0.63	3	3.31	4.591E-04	VS	0.96	0.2	0.8	1.2	1.3	24	104	128	45	1	2	0.63	3	2.41	7.910E-03
VS	0.96	0.6	0.4	1.2	1.4	72	56	128	45	1	2	0.63	3	3.52	2.145E-04	VS	0.96	0.2	0.8	1.2	1.4	24	112	136	45	0.8	4	0.63	3	3.11	9.285E-04
VS	0.96	0.6	0.4	1.2	1.5	72	60	132	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.2	1.5	24	120	144	45	0.8	4	0.63	3	3.11	9.285E-04
VS	0.96	0.6	0.4	1.3	1.2	78	48	126	45	1	2	0.63	3	3.52	2.145E-04	VS	0.96	0.2	0.8	1.3	1.2	26	96	122	45	0.8	3	0.63	3	2.25	1.218E-02
VS	0.96	0.6	0.4	1.3	1.3	78	52	130	45	1	2	0.63	3	3.52	2.145E-04	VS	0.96	0.2	0.8	1.3	1.3	26	104	130	45	1	2	0.63	3	2.41	7.910E-03
VS	0.96	0.6	0.4	1.3	1.4	78	56	134	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.3	1.4	26	112	138	45	0.8	4	0.63	3	3.11	9.285E-04
VS	0.96	0.6	0.4	1.3	1.5	78	60	138	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.3	1.5	26	120	146	45	0.8	4	0.63	3	3.11	9.285E-04
VS	0.96	0.6	0.4	1.4	1.2	84	48	132	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.4	1.2	28	96	124	45	0.8	3	0.63	3	2.25	1.218E-02
VS	0.96	0.6	0.4	1.4	1.3	84	52	136	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.4	1.3	28	104	132	45	0.8	4	0.63	3	3.11	9.285E-04
VS	0.96	0.6	0.4	1.4	1.4	84	56	140	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.4	1.4	28	112	140	45	0.8	4	0.63	3	3.11	9.285E-04
VS	0.96	0.6	0.4	1.4	1.5	84	60	144	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.4	1.5	28	120	148	45	0.8	4	0.63	3	3.11	9.285E-04
VS	0.96	0.6	0.4	1.5	1.2	90	48	138	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.5	1.2	30	96	126	45	1	2	0.63	3	2.41	7.910E-03
VS	0.96	0.6	0.4	1.5	1.3	90	52	142	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.5	1.3	30	104	134	45	0.8	4	0.63	3	3.11	9.285E-04
VS	0.96	0.6	0.4	1.5	1.4	90	56	146	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.5	1.4	30	112	142	45	0.8	4	0.63	3	3.11	9.285E-04
VS	0.96	0.6	0.4	1.5	1.5	90	60	150	45	0.8	4	0.63	3	4.55	2.652E-06	VS	0.96	0.2	0.8	1.5	1.5	30	120	150	45	0.8	4	0.63	3	3.11	9.285E-04

Quadro E.6 – Resultados exemplo V, série VS – a/d = 0,96.

Série	a/d	k _g	k _q	γ _g	γ _q	F _g (kN)	F _q (kN)	F (kN)	a (cm)	θ _L (cm)	n _L	θ _w (cm)	n _e	β _{sist}	P _{r,sist}	Série	a/d	k _g	k _q	γ _g	γ _q	F _g (kN)	F _q (kN)	F (kN)	a (cm)	θ _L (cm)	n _L	θ _w (cm)	n _e	β _{sist}	P _{r,sist}
VS	1.38	0.8	0.2	1.2	1.2	96	24	120	65	0.8	6	0.63	3	4.99	2.948E-07	VS	1.38	0.4	0.6	1.2	1.2	48	72	120	65	0.8	6	0.63	3	2.92	1.741E-03
VS	1.38	0.8	0.2	1.2	1.3	96	26	122	65	0.8	6	0.63	3	4.99	2.948E-07	VS	1.38	0.4	0.6	1.2	1.3	48	78	126	65	0.8	6	0.63	3	2.92	1.741E-03
VS	1.38	0.8	0.2	1.2	1.4	96	28	124	65	0.8	6	0.63	3	4.99	2.948E-07	VS	1.38	0.4	0.6	1.2	1.4	48	84	132	65	0.8	6	0.63	3	2.92	1.741E-03
VS	1.38	0.8	0.2	1.2	1.5	96	30	126	65	0.8	6	0.63	3	4.99	2.948E-07	VS	1.38	0.4	0.6	1.2	1.5	48	90	138	65	1	4	0.63	4	3.30	4.853E-04
VS	1.38	0.8	0.2	1.3	1.2	104	24	128	65	0.8	6	0.63	3	4.99	2.948E-07	VS	1.38	0.4	0.6	1.3	1.2	52	72	124	65	0.8	6	0.63	3	2.92	1.741E-03
VS	1.38	0.8	0.2	1.3	1.3	104	26	130	65	0.8	6	0.63	3	4.99	2.948E-07	VS	1.38	0.4	0.6	1.3	1.3	52	78	130	65	0.8	6	0.63	3	2.92	1.741E-03
VS	1.38	0.8	0.2	1.3	1.4	104	28	132	65	0.8	6	0.63	3	4.99	2.948E-07	VS	1.38	0.4	0.6	1.3	1.4	52	84	136	65	0.8	6	0.63	3	2.92	1.741E-03
VS	1.38	0.8	0.2	1.3	1.5	104	30	134	65	0.8	6	0.63	3	4.99	2.948E-07	VS	1.38	0.4	0.6	1.3	1.5	52	90	142	65	1	4	0.63	4	3.30	4.853E-04
VS	1.38	0.8	0.2	1.4	1.2	112	24	136	65	0.8	6	0.63	3	4.99	2.948E-07	VS	1.38	0.4	0.6	1.4	1.2	56	72	128	65	0.8	6	0.63	3	2.92	1.741E-03
VS	1.38	0.8	0.2	1.4	1.3	112	26	138	65	1	4	0.63	4	5.56	1.385E-08	VS	1.38	0.4	0.6	1.4	1.3	56	78	134	65	0.8	6	0.63	3	2.92	1.741E-03
VS	1.38	0.8	0.2	1.4	1.4	112	28	140	65	1	4	0.63	4	5.56	1.385E-08	VS	1.38	0.4	0.6	1.4	1.4	56	84	140	65	1	4	0.63	4	3.30	4.853E-04
VS	1.38	0.8	0.2	1.4	1.5	112	30	142	65	1	4	0.63	4	5.56	1.385E-08	VS	1.38	0.4	0.6	1.4	1.5	56	90	146	65	0.8	7	0.63	4	3.72	9.850E-0

Série	a/d	k _g	k _q	γ _g	γ _q	F _g (kN)	F _q (kN)	F (kN)	a (cm)	θ _L (cm)	n _L	θ _w (cm)	n _e	β _{sist}	P _{f,sist}	Série	a/d	k _g	k _q	γ _g	γ _q	F _g (kN)	F _q (kN)	F (kN)	a (cm)	θ _L (cm)	n _L	θ _w (cm)	n _e	β _{sist}	P _{f,sist}
VS	1.6	0.8	0.2	1.2	1.2	96	24	120	75	0.8	7	0.63	3	4.60	2.151E-06	VS	1.6	0.4	0.6	1.2	1.2	48	72	120	75	0.8	7	0.63	3	2.70	3.512E-03
VS	1.6	0.8	0.2	1.2	1.3	96	26	122	75	0.8	7	0.63	3	4.60	2.151E-06	VS	1.6	0.4	0.6	1.2	1.3	48	78	126	75	0.8	7	0.63	3	2.70	3.512E-03
VS	1.6	0.8	0.2	1.2	1.4	96	28	124	75	0.8	7	0.63	3	4.60	2.151E-06	VS	1.6	0.4	0.6	1.2	1.4	48	84	132	75	1.25	3	0.63	4	3.08	1.031E-03
VS	1.6	0.8	0.2	1.2	1.5	96	30	126	75	0.8	7	0.63	3	4.60	2.151E-06	VS	1.6	0.4	0.6	1.2	1.5	48	90	138	75	1	5	0.63	4	3.36	3.877E-04
VS	1.6	0.8	0.2	1.3	1.2	104	24	128	75	0.8	7	0.63	3	4.60	2.151E-06	VS	1.6	0.4	0.6	1.3	1.2	52	72	124	75	0.8	7	0.63	3	2.70	3.512E-03
VS	1.6	0.8	0.2	1.3	1.3	104	26	130	75	1.25	3	0.63	4	5.18	1.111E-07	VS	1.6	0.4	0.6	1.3	1.3	52	78	130	75	1.25	3	0.63	4	3.08	1.031E-03
VS	1.6	0.8	0.2	1.3	1.4	104	28	132	75	1.25	3	0.63	4	5.18	1.111E-07	VS	1.6	0.4	0.6	1.3	1.4	52	84	136	75	1.25	3	0.63	4	3.08	1.031E-03
VS	1.6	0.8	0.2	1.3	1.5	104	30	134	75	1.25	3	0.63	4	5.18	1.111E-07	VS	1.6	0.4	0.6	1.3	1.5	52	90	142	75	1	5	0.63	4	3.36	3.877E-04
VS	1.6	0.8	0.2	1.4	1.2	112	24	136	75	1.25	3	0.63	4	5.18	1.111E-07	VS	1.6	0.4	0.6	1.4	1.2	56	72	128	75	0.8	7	0.63	3	2.70	3.512E-03
VS	1.6	0.8	0.2	1.4	1.3	112	26	138	75	1	5	0.63	4	5.67	7.265E-09	VS	1.6	0.4	0.6	1.4	1.3	56	78	134	75	1.25	3	0.63	4	3.08	1.031E-03
VS	1.6	0.8	0.2	1.4	1.4	112	28	140	75	1	5	0.63	4	5.67	7.265E-09	VS	1.6	0.4	0.6	1.4	1.4	56	84	140	75	1	5	0.63	4	3.36	3.877E-04
VS	1.6	0.8	0.2	1.4	1.5	112	30	142	75	1	5	0.63	4	5.67	7.265E-09	VS	1.6	0.4	0.6	1.4	1.5	56	90	146	75	0.8	8	0.63	4	3.40	3.398E-04
VS	1.6	0.8	0.2	1.5	1.2	120	24	144	75	1	5	0.63	4	5.67	7.265E-09	VS	1.6	0.4	0.6	1.5	1.2	60	72	132	75	1.25	3	0.63	4	3.08	1.031E-03
VS	1.6	0.8	0.2	1.5	1.3	120	26	146	75	0.8	8	0.63	4	5.73	5.013E-09	VS	1.6	0.4	0.6	1.5	1.3	60	78	138	75	1	5	0.63	4	3.36	3.877E-04
VS	1.6	0.8	0.2	1.5	1.4	120	28	148	75	1.6	2	0.63	4	5.78	3.642E-09	VS	1.6	0.4	0.6	1.5	1.4	60	84	144	75	1	5	0.63	4	3.36	3.877E-04
VS	1.6	0.8	0.2	1.5	1.5	120	30	150	75	0.8	9	0.63	4	6.52	3.554E-11	VS	1.6	0.4	0.6	1.5	1.5	60	90	150	75	0.8	9	0.63	4	3.83	6.479E-05
VS	1.6	0.6	0.4	1.2	1.2	72	48	120	75	0.8	7	0.63	3	3.37	3.790E-04	VS	1.6	0.2	0.8	1.2	1.2	24	96	120	75	0.8	7	0.63	3	2.27	1.170E-02
VS	1.6	0.6	0.4	1.2	1.3	72	52	124	75	0.8	7	0.63	3	3.37	3.790E-04	VS	1.6	0.2	0.8	1.2	1.3	24	104	128	75	0.8	7	0.63	3	2.27	1.170E-02
VS	1.6	0.6	0.4	1.2	1.4	72	56	128	75	0.8	7	0.63	3	3.37	3.790E-04	VS	1.6	0.2	0.8	1.2	1.4	24	112	136	75	1.25	3	0.63	4	2.61	4.534E-03
VS	1.6	0.6	0.4	1.2	1.5	72	60	132	75	1.25	3	0.63	4	3.82	6.670E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.2	1.5	24	120	144	75	1	5	0.63	4	2.85	2.174E-03
VS	1.6	0.6	0.4	1.3	1.2	78	48	126	75	0.8	7	0.63	3	3.37	3.790E-04	VS	1.6	0.2	0.8	1.3	1.2	26	96	122	75	0.8	7	0.63	3	2.27	1.170E-02
VS	1.6	0.6	0.4	1.3	1.3	78	52	130	75	1.25	3	0.63	4	3.82	6.670E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.3	1.3	26	104	130	75	1.25	3	0.63	4	2.61	4.534E-03
VS	1.6	0.6	0.4	1.3	1.4	78	56	134	75	1.25	3	0.63	4	3.82	6.670E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.3	1.4	26	112	138	75	1	5	0.63	4	2.85	2.174E-03
VS	1.6	0.6	0.4	1.3	1.5	78	60	138	75	1	5	0.63	4	4.16	1.577E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.3	1.5	26	120	146	75	0.8	8	0.63	4	2.88	1.969E-03
VS	1.6	0.6	0.4	1.4	1.2	84	48	132	75	1.25	3	0.63	4	3.82	6.670E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.4	1.2	28	96	124	75	0.8	7	0.63	3	2.27	1.170E-02
VS	1.6	0.6	0.4	1.4	1.3	84	52	136	75	1.25	3	0.63	4	3.82	6.670E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.4	1.3	28	104	132	75	1.25	3	0.63	4	2.61	4.534E-03
VS	1.6	0.6	0.4	1.4	1.4	84	56	140	75	1	5	0.63	4	4.16	1.577E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.4	1.4	28	112	140	75	1	5	0.63	4	2.85	2.174E-03
VS	1.6	0.6	0.4	1.4	1.5	84	60	144	75	1	5	0.63	4	4.16	1.577E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.4	1.5	28	120	148	75	1.6	2	0.63	4	2.94	1.644E-03
VS	1.6	0.6	0.4	1.5	1.2	90	48	138	75	1	5	0.63	4	4.16	1.577E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.5	1.2	30	96	126	75	0.8	7	0.63	3	2.27	1.170E-02
VS	1.6	0.6	0.4	1.5	1.3	90	52	142	75	1	5	0.63	4	4.16	1.577E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.5	1.3	30	104	134	75	1.25	3	0.63	4	2.61	4.534E-03
VS	1.6	0.6	0.4	1.5	1.4	90	56	146	75	0.8	8	0.63	4	4.21	1.297E-05	VS	1.6	0.2	0.8	1.5	1.4	30	112	142	75	1	5	0.63	4	2.85	2.174E-03
VS	1.6	0.6	0.4	1.5	1.5	90	60	150	75	0.8	9	0.63	4	4.74	1.064E-06	VS	1.6	0.2	0.8	1.5	1.5	30	120	150	75	0.8	9	0.63	4	3.25	5.720E-04

Quadro E.8 – Resultados exemplo V, série VS – a/d = 1,60.