

6 Estudo de Caso

6.1. Descrição Geral da Ponte

É analisada a Ponte sobre o rio Vermelho, que está situada no Km 763+800 da Estrada de Ferro dos Carajás. É uma ponte de concreto armado com extensão total de 208,6 metros, constituída por sete vãos de 25 metros cada. A figura 6.1 apresenta uma fotografia de uma vista geral desta obra.



Figura 6.1. Vista geral da ponte sobre o Rio Vermelho (fonte: Relatório Técnico, Veloso *et al* 2007).

A superestrutura da ponte é constituída de duas vigas principais (longarinas), vigas secundárias (transversinas) e o tabuleiro. As longarinas e os tabuleiros formam dois trechos contínuos, sendo um de quatro vãos e outro de três vãos, que são separados por uma junta de dilatação situada sobre o pilar P4 (ver Figura 6.2). Em ambos os trechos, as longarinas são vigas contínuas engastadas em suas extremidades nos encontros da ponte e apoiadas sobre pilares por meio de almofadas de neoprene fretado. O tabuleiro possui largura total de 5,85 metros. A mesoestrutura é constituída por seis pilares de seção retangular com lados de 1,20 e 2,80 metros, com altura variável.

Para permitir a junta de dilatação, a seção transversal do pilar P4 sofre alargamento em sua extremidade superior para receber os aparelhos de apoio

das longarinas. Os encontros e os pilares P3, P4, P5 e P6 possuem fundações tipo tubulão de concreto armado, com 1,40 metros de diâmetro de fuste. No caso dos pilares P1 e P2, as fundações desses elementos são do tipo bloco em concreto armado, diretamente apoiados na superfície do terreno. Os encontros são estruturas multicelulares formadas por paredes, laje superior, cortina alas e placa de transição de concreto armado. Os taludes dos aterros junto aos encontros são protegidos por vegetação rasteira e de pequeno porte.

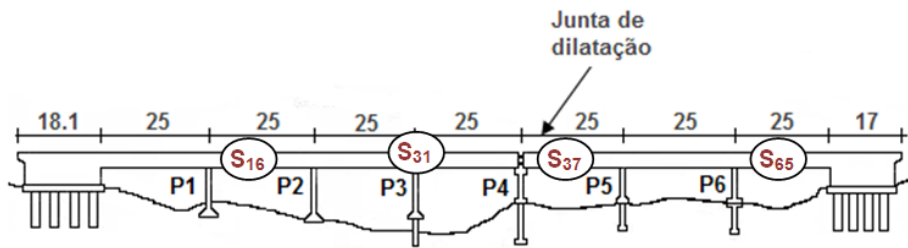


Figura 6.2. Sistema estrutural da ponte (fonte: Relatório Técnico, Veloso *et al* 2007).

A seção transversal da ponte é mostrada da Figura 6.3.

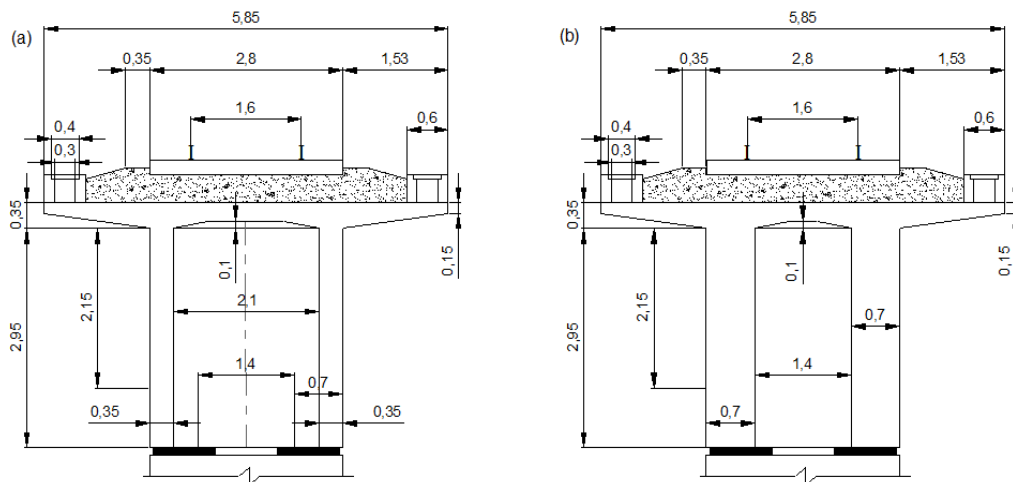


Figura 6.3. Seção π da ponte sobre o Rio Vermelho (a) largura da longarina 35 cm. (b) Largura da longarina 70 cm. (fonte: Relatório Técnico, Veloso *et al* 2007).

6.2. Análise de Confiabilidade da Ponte

Conforme citado nos capítulos anteriores, tem-se o interesse em avaliar a confiabilidade das vigas principais da ponte à flexão simples.

Essa análise é feita para as seções resistentes consideradas no projeto da ponte. Estas seções estão identificadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Seções consideradas na análise

Seção	S ₁₆	S ₃₁	S ₃₇	S ₆₅
Localização	Meio do vão P ₁ - P ₂	Sobre o pilar P ₃	A 15m. do pilar P ₃ , vão P ₃ - P ₄	A 10m. do pilar P ₆ , vão P ₆ - E ₂

Como foi explicado no Capítulo 5, a função de estado limite para o Estado Limite Último, na flexão simples, da ponte é:

$$G(\mathbf{X}) = 0,68 b_f x f_{cd} (d - 0,4x) + A'_s E_s \varepsilon_s \frac{x - d'}{d - x} (d - d') - (M_{sp_1} \gamma + M_{sp_{adic}}) - (M_{sq_1} Q \cdot \varphi)$$

A caracterização das seis variáveis aleatórias consideradas no problema (ver item 5.3) está apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2. Dados probabilísticos das variáveis aleatórias

Variável Aleatória	Valor Característico	Média	Coefficiente de Variação %	Distribuição
fck (KN/m ²)	18000	23280,628	15	Lognormal
fyk (KN/m ²)	500000	562511,176	7	Lognormal
Es (KN/m ²)	210000000	248805736,082	10	Lognormal
γ (KN/m ³)	25	25	8	Normal
Q (KN)	325	308,623	15	Tipo1
φ	1,356	1,269	13	Normal

Para cada seção é estabelecida uma função de estado limite a partir dos dados conhecidos relativos às dimensões, à área, ao momento de inércia e às armaduras de compressão e tração (ver Tabelas 6.3 e 6.4).

Tabela 6.3. Dados de área e momento de inércia para as seções estudadas

Seção	Área (m ²)	Inércia (m ⁴)
S ₁₆	3,648	4,050
S ₃₁	5,783	6,329
S ₃₇	3,648	4,050
S ₆₅	3,648	4,050

Tabela 6.4. Armaduras de tração e compressão para cada seção

Seção	As (cm ²)	Número de barras	A's (cm ²)	Número de barras
S ₁₆	101,34	20 φ 25	50,67	10 φ 25
S ₃₁	50,67	10 φ 25	121,61	24 φ 25
S ₃₇	121,61	24 φ 25	50,67	10 φ 25
S ₆₅	101,34	20 φ 25	60,80	12 φ 25

Com esses dados pode-se calcular os momentos resistentes e solicitantes como foi descrito no Capítulo 5 e encontrar assim as seguintes funções de estado limite para cada seção:

$$S_{16} \rightarrow [R_{cd_{16}} (d_{16} - 0,4x_{16}) + R'_{sd_{16}} (d_{16} - d'_{16})] - (49,8349 \gamma + 699,7296) - 9,799 Q \varphi$$

$$S_{31} \rightarrow [R_{cd_{31}} (d_{31} - 0,4x_{31}) + R'_{sd_{31}} (d_{31} - d'_{31})] - (148,8511 \gamma + 1925,6493) - 16,201 Q \varphi$$

$$S_{37} \rightarrow [R_{cd_{37}} (d_{37} - 0,4x_{37}) + R'_{sd_{37}} (d_{37} - d'_{37})] - (98,3570 \gamma + 1310,5215) - 12,627 Q \varphi$$

$$S_{65} \rightarrow [R_{cd_{65}} (d_{65} - 0,4x_{65}) + R'_{sd_{65}} (d_{65} - d'_{65})] - (44,8920 \gamma + 617,5244) - 7,824 Q \varphi$$

6.2.1. Análise com Seis Variáveis Aleatórias

Numa primeira fase de análise são consideradas as seis variáveis aleatórias descritas anteriormente e desconsiderada a armadura de pele. Quando a sistemática de avaliação da probabilidade de falha emprega a simulação de Monte Carlo, as análises exigem um número de simulações maior, e como consequência, um esforço computacional maior.

Tabela 6.5. Probabilidade de falha segundo os métodos: simulação de Monte Carlo e FORM para seis variáveis aleatórias sem considerar armadura de pele.

Seção	Variável Aleatória	Monte Carlo		FORM			
		K	P _f	Iterações	β	P _f	α ²
S ₁₆	f _{ck}	5,0E+04	1,40E-04	5	3,622	1,46E-04	9,38E-05
	f _{yk}						1,04E-01
	E _s						2,89E-07
	γ						2,22E-03
	Q						7,25E-01
	φ						1,68E-01
S ₃₁	f _{ck}	5,0E+03	3,21E-01	3	0,458	3,24E-01	1,86E-04
	f _{yk}						2,84E-01
	E _s						3,41E-04
	γ						3,64E-02
	Q						3,91E-01
	φ						2,88E-01
S ₃₇	f _{ck}	1,0E+04	3,20E-01	5	2,712	3,34E-03	1,85E-04
	f _{yk}						1,51E-01
	E _s						9,89E-07
	γ						8,66E-03
	Q						6,52E-01
	φ						1,89E-01
S ₆₅	f _{ck}	5,0E+06	2,40E-06	5	4,563	2,52E-06	7,82E-05
	f _{yk}						9,90E-02
	E _s						3,12E-07
	γ						1,77E-03
	Q						7,44E-01
	φ						1,55E-01

A Tabela 6.5 ilustra os valores da probabilidade de falha associados às seções das vigas da ponte do Rio Vermelho, empregando os métodos de Monte Carlo e o FORM. Observando a Tabela 6.6 é possível identificar que os resultados obtidos pelos dois métodos têm diferenças muito baixas.

Tabela 6.6 Comparação das probabilidades de falha calculadas segundo a simulação de Monte Carlo e o FORM sem armadura de pele para 6 variáveis aleatórias.

P_f_{MC}	P_f_{FORM}	Diferença %
1,40E-04	1,46E-04	-4,2
3,21E-01	3,24E-01	-0,9
3,20E-03	3,34E-03	-4,3
2,40E-06	2,52E-06	-4,9

A seguir, a mesma análise é feita considerando a armadura de pele. Na avaliação da probabilidade de falha empregando a simulação de Monte Carlo a inclusão da armadura de pele não interfere em nada no processo de cálculo. Porém o mesmo não acontece na sistemática de avaliação que usa o FORM. Para avaliar a probabilidade de falha via o FORM a introdução da armadura de pele não permite uma equação genérica da função de estado limite e conseqüentemente não permite que o gradiente da função seja avaliado analiticamente. Para controlar esse problema admite-se que a área de aço referente à armadura de pele seja incorporada à armadura principal.

Os resultados obtidos pelos dois métodos são apresentados na Tabela 6.7, As diferenças entre os métodos continuam sendo muito pequenas como pode ser visto na Tabela 6.8. Pode-se verificar também que a consideração da armadura de pele reduz bastante a probabilidade de falha, de tal maneira que a mesma não pode ser negligenciada.

Ao observar os fatores de importância (α^2) nas Tabelas 6.5 e 6.7 pode-se observar que a variável que tem maior influência na probabilidade de falha é a carga móvel, seguida do coeficiente de impacto, já as variáveis aleatórias f_{ck} e E_s têm fatores de importância muito baixos e pouco afetam a avaliação da probabilidade de falha, por isso prossegue-se as análises considerando as mesmas determinísticas.

Tabela 6.7. Probabilidade de falha segundo os métodos: simulação de Monte Carlo e FORM para seis variáveis aleatórias com armadura de pele

Seção	Variável Aleatória	Monte Carlo		FORM			
		K	P_f	Iterações	β	P_f	α^2
S ₁₆	f_{ck}	5,0E+05	2,00E-05	5	4,059	2,47E-05	9,71E-05
	f_{yk}						9,89E-02
	E_s						4,68E-07
	γ						1,77E-03
	Q						7,38E-01
	ϕ						1,61E-01
S ₃₁	f_{ck}	1,0E+04	1,20E-03	5	3,040	1,18E-03	5,31E-06
	f_{yk}						1,48E-01
	E_s						2,73E-04
	γ						9,96E-03
	Q						6,65E-01
	ϕ						1,76E-01
S ₃₇	f_{ck}	2,0E+04	7,00E-04	5	3,157	7,97E-04	1,78E-04
	f_{yk}						1,35E-01
	E_s						1,33E-06
	γ						6,71E-03
	Q						6,83E-01
	ϕ						1,75E-01
S ₆₅	f_{ck}	3,0E+07	2,00E+07	6	4,959	3,54E-07	8,18E-05
	f_{yk}						9,68E-02
	E_s						4,98E-07
	γ						1,48E-03
	Q						7,49E-01
	ϕ						1,53E-01

Tabela 6.8. Comparação das probabilidades de falha calculadas segundo a simulação de Monte Carlo e o FORM com armadura de pele para 6 variáveis aleatórias.

P_{f_MC}	P_{f_FORM}	Diferença %
2,00E-05	2,47E-05	-18,9
1,20E-03	1,18E-03	1,5
7,60E-04	7,97E-04	-12,2
2,00E+07	3,54E-07	-43,5

6.2.2. Análise com Quatro Variáveis Aleatórias

Tomando como variáveis aleatórias f_{yk} , γ , Q e ϕ empregando o método de Monte Carlo e o FORM, são avaliadas as probabilidades de falha apresentadas na Tabela 6.9, sem armadura de pele e na Tabela 6.11 já considerando a armadura de pele. Pode-se notar que as diferenças entre os resultados da

probabilidade de falha para os dois métodos são baixas (Tabelas 6.10 e 6.12), o que motiva a utilização só do FORM para calcular a probabilidade de falha, já que o FORM oferece resultados de qualidade da probabilidade de falha em pouco tempo, além de permitir calcular o coeficiente de confiabilidade e o fator de importância para análise de sensibilidade.

Tabela 6.9. Probabilidade de falha para os métodos: simulação de Monte Carlo e FORM para quatro variáveis aleatórias sem armadura de pele.

Seção	Variável Aleatória	Monte Carlo		FORM			
		K	P_f	Iterações	β	P_f	α^2
S ₁₆	f_{yk}						0,1040
	γ						0,0022
	Q	5,0E+04	1,60E-04	5	3,604	1,57E-04	0,7252
	ϕ						0,1686
S ₃₁	f_{yk}						0,2846
	γ						0,0372
	Q	5,0E+03	3,30E-01	3	0,403	3,44E-01	0,3870
	ϕ						0,2913
S ₃₇	f_{yk}						0,1508
	γ						0,0088
	Q	1,0E+04	3,60E-04	5	2,686	3,62E-03	0,6507
	ϕ						0,1897
S ₆₅	f_{yk}						0,0985
	γ						0,0018
	Q	5,0E+06	2,73E-0.3	6	4,546	2,73E-07	0,7441
	ϕ						0,1556

Tabela 6.10. Comparação das probabilidades de falha calculadas segundo a simulação de Monte Carlo e o FORM sem armadura de pele para 4 variáveis aleatórias.

P_{f_MC}	P_{f_FORM}	Diferença %
1,60E-04	1,57E-04	2,0
3,30E-01	3,44E-01	-4,0
3,60E-03	3,62E-03	-0,5
2,80E-06	2,73E-06	2,4

Dos resultados obtidos no FORM, para a análise com quatro variáveis, verifica-se que a variável aleatória mais importante continua sendo a carga móvel Q, e os resultados do índice de confiabilidade e da probabilidade de falha quando comparadas com os obtidos na análise de seis variáveis aleatórias apresentam pequenas diferenças, como indicado na Tabela 6.13. Os resultados

indicam que é possível simplificar a análise considerando só quatro variáveis aleatórias e manter a qualidade nos resultados.

Tabela 6.11. Resultado da probabilidade de falha para os métodos: simulação de Monte Carlo e FORM para quatro variáveis aleatórias com armadura de pele

Seção	Variável Aleatória	Monte Carlo		FORM			
		K	P_f	Iterações	β	P_f	α^2
S ₁₆	f_{yk}						0,1040
	γ						0,0022
	Q	5,0E+05	2,00E-05	5	4,040	2,67E-05	0,7252
	ϕ						0,1686
S ₃₁	f_{yk}						0,2846
	γ						0,0372
	Q	1,0E+04	1,30E-03	5	3,010	1,31E-03	0,3870
	ϕ						0,2913
S ₃₇	f_{yk}						0,1508
	γ						0,0088
	Q	2,0E+04	8,50E-04	5	3,131	8,72E-04	0,6507
	ϕ						0,1897
S ₆₅	f_{yk}						0,0985
	γ						0,0018
	Q	3,0E+07	2,0E-07	5	4,942	3,87E-07	0,7441
	ϕ						0,1556

Tabela 6.12. Comparação das probabilidades de falha calculadas segundo a simulação de Monte Carlo e o FORM sem armadura de pele para 4 variáveis aleatórias

P_{f_MC}	P_{f_FORM}	Diferença %
2,00E-05	2,67E-05	-25,2
1,30E-03	1,31E-03	-0,6
8,50E-04	8,72E-04	-2,5
2,00E-07	3,87E-07	-38,3

Tabela 6.13. Comparação entre as análises feitas com o FORM para seis e quatro variáveis aleatórias

Seção	6 VA.		4 VA.		Diferença %	
	β	P_f	β	P_f	β	P_f
S ₁₆	4,059	2,47E-05	4,040	2,67E-05	0,47	-7,78
S ₃₁	3,040	1,18E-03	3,010	1,31E-03	1,02	-9,62
S ₃₇	3,157	7,97E-04	3,131	8,72E-04	0,84	-8,55
S ₆₅	4,959	3,54E-07	4,942	3,87E-07	0,35	-8,57

As figuras 6.4 e 6.5 mostram a comparação da análise com seis variáveis aleatórias e com quatro variáveis aleatórias para o índice de confiabilidade e para a probabilidade de falha respectivamente.

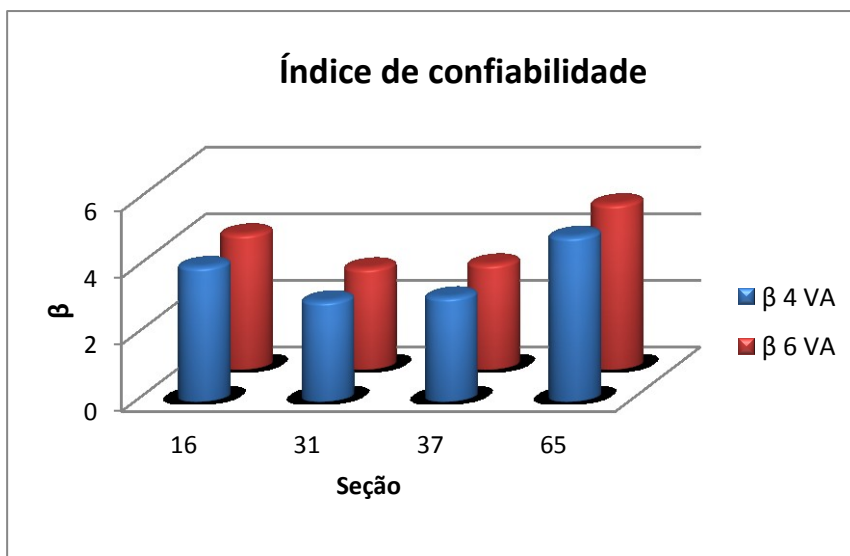


Figura 6.4. Comparação do índice de confiabilidade obtido pelo FORM para 6 e 4 variáveis aleatórias.

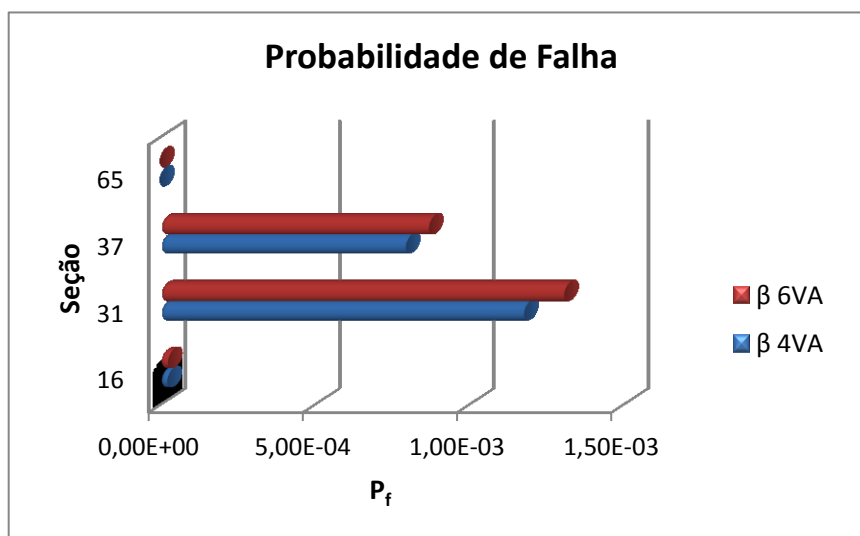


Figura 6.5. Comparação da probabilidade de falha obtida pelo FORM para 6 e 4 variáveis aleatórias.

Uma vez que o processo para avaliar a probabilidade de falha é iterativo, o mesmo exige que o momento resistente seja avaliado algumas vezes o que demanda uma rotina bem elaborada conforme comentado no Capítulo 5.

A fim de simplificar essa sistemática, admite-se o momento resistente M_r como uma variável aleatória lognormal com valor médio obtido a partir dos valores médios de f_{yk} e que simplifica em muito a expressão para a função de

estado limite e permite uma avaliação simplificada da P_f . As funções de estado limite para esse caso são:

$$S_{16} \rightarrow Mr_{16} - (49,8349 \gamma + 699,7296) - 9,799 Q \varphi$$

$$S_{31} \rightarrow Mr_{31} - (148,8511 \gamma + 1925,6493) - 16,201 Q \varphi$$

$$S_{37} \rightarrow Mr_{37} - (98,3570 \gamma + 1310,5215) - 12,627 Q \varphi$$

$$S_{65} \rightarrow Mr_{65} - (44,8920 \gamma + 617,5244) - 7,824 Q \varphi$$

As características das variáveis aleatórias consideradas nesta análise estão na seguinte Tabela:

Tabela 6.14. Valores característicos e valores médios das variáveis aleatórias

Variável	Distribuição	V médio	COV
Mr_{16}	Lognormal	18045,000	0,07
Mr_{31}	Lognormal	28085,483	0,07
Mr_{37}	Lognormal	21288,211	0,07
Mr_{65}	Lognormal	17925,628	0,07
Y	Normal	25	0,08
Q	Tipo1	308,623	0,15
φ	Normal	1,269	0,13

Tabela 6.15. Resultados do método FORM para quatro variáveis aleatórias

Seção	Variável Aleatória	FORM			
		Iterações	β	P_f	α^2
S_{16}	M_r				0,1023
	γ	5	4,037	2,71E-05	0,0044
	Q				0,7327
	φ				0,1606
M_r	0,1598				
S_{31}	γ	5	2,996	1,37E-03	0,0234
	Q				0,6425
	φ				0,1742
	M_r				0,1418
S_{37}	γ	5	3,121	9,02E-04	0,0161
	Q				0,6682
	φ				0,1739
	M_r				0,0998
S_{65}	γ	6	4,937	3,96E-07	0,0036
	Q				0,7443
	φ				0,1523
	M_r				

Os valores obtidos para a probabilidade de falha, e para o índice de confiabilidade, são muito próximos aos obtidos com a primeira análise com quatro variáveis, conforme pode ser visto nas Tabelas 6.15 e 6.16. Portanto é

possível se obter resultados confiáveis simplificando a análise para 4 variáveis aleatórias, onde o M_r é uma delas, e só é avaliado uma vez.

Tabela 6.16. Comparação entre as análises feitas com o FORM para quatro variáveis aleatórias.

4 VA " $f_{yk}, \gamma, Q, \varphi$ "		4 VA " M_r, γ, Q, φ "		Diferença %	
β	P_f	β	P_f	β	P_f
4,040	2,67E-05	4,037	2,71E-05	-0,07	-1,23
3,010	1,31E-03	2,996	1,37E-03	-0,45	-4,36
3,131	8,72E-04	3,121	9,02E-04	-0,33	-3,41
4,942	3,87E-07	4,937	3,96E-07	-0,09	-2,32

6.2.3. Análise com Três Variáveis Aleatórias

É realizada uma análise com apenas 3 variáveis aleatórias visando facilitar ainda mais a determinação da confiabilidade para longarinas na flexão simples, de tal forma que essa abordagem possa ser rapidamente verificada pelo engenheiro em qualquer etapa do projeto e por qualquer ferramenta computacional matemática. São consideradas como variáveis aleatórias os valores dos momentos resistente (M_r) e solicitantes por carga permanente M_p e carga móvel M_q . Para esta análise as funções de estado limite são:

$$S_{16} \rightarrow M_r_{16} - M_p_{16} - M_q_{16}$$

$$S_{31} \rightarrow M_r_{31} - M_p_{31} - M_q_{31}$$

$$S_{37} \rightarrow M_r_{37} - M_p_{37} - M_q_{37}$$

$$S_{65} \rightarrow M_r_{65} - M_p_{65} - M_q_{65}$$

Na Tabela 6.17 estão os resultados para cada seção.

Tabela 6.17. Resultado do método FORM para três variáveis aleatórias

Seção	Variável Aleatória	FORM			
		Iterações	β	P_f	α^2
S ₁₆	M_r	5	4,204	1,31E-05	0,122
	M_p				0,005
	M_q				0,873
S ₃₁	M_r	5	3,064	1,09E-03	0,187
	M_p				0,028
	M_q				0,785
S ₃₇	M_r	5	3,203	6,80E-04	0,166
	M_p				0,019
	M_q				0,815
S ₆₅	M_r	5	5,190	1,05E-07	0,122
	M_p				0,005
	M_q				0,874

Fazendo uma comparação entre as análises com seis variáveis e com três variáveis temos que as diferenças entre os coeficientes de variação são muito pequenas. Também verifica-se que, uma vez que os níveis de probabilidade de falha são muito baixos, a diferença relativa entre a probabilidade de falha avaliada com 3 ou com 6 variáveis aleatórias é grande (seção 16 e 65). Para níveis de probabilidade de falha mais altos (da ordem de 10^{-3}) essa diferença relativa entre as análises não é representativa, ver Tabela 6.18.

Tabela 6.18 Comparação entre as análises com três e seis variáveis aleatórias.

Seção	3 VA.		6 VA.		Diferença %	
	β	P_f	β	P_f	β	P_f
S ₁₆	4,204	1,31E-05	4,059	2,47E-05	3,59	-46,93
S ₃₁	3,064	1,09E-03	3,040	1,18E-03	0,80	-7,75
S ₃₇	3,203	6,80E-04	3,157	7,97E-04	1,46	-14,67
S ₆₅	5,190	1,05E-07	4,959	3,54E-07	4,66	-70,34

A Figura 6.6 apresenta a comparação entre as análises feitas com seis, quatro e três variáveis aleatórias, com os dados das Tabelas 6.13 e 6.18.

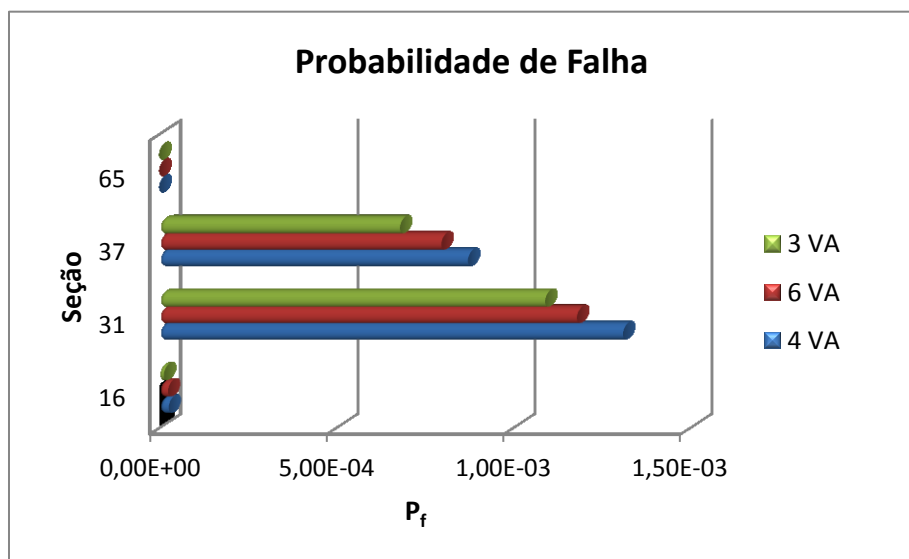


Figura 6.6. Comparação da probabilidade de falha para as análises feitas com seis, quatro e três variáveis aleatórias.

6.2.4.

Influência do Coeficiente de Variação (COV) da Carga Móvel (Q) na Probabilidade de Falha

Como foi descrito nas análises anteriores a variável que mais impacta a probabilidade de falha é a carga móvel, portanto é realizado um estudo da sensibilidade da probabilidade de falha em função do coeficiente de variação da

carga móvel. Foram consideradas quatro variáveis aleatórias (f_{yk} , γ , Q , φ) os valores médios e distribuições de probabilidade dessas variáveis são descritos na Tabela 6.2.

São escolhidos quatro valores de COV para a carga móvel, 5%, 10%, 15% e 25%, e para esses são avaliados o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha, apresentados na tabela a seguir

Tabela 6.19. Análise de sensibilidade da probabilidade de falha em função do COV da carga móvel Q .

Seção	COV _Q	β	P _f	α^2
S₁₆	0,05	5,817	3,00E-09	0,4644
	0,10	4,701	1,30E-06	0,6601
	0,15	4,040	2,67E-05	0,7382
	0,25	3,278	5,23E-04	0,8137
S₃₁	0,05	3,998	3,20E-05	0,2192
	0,10	3,442	2,89E-04	0,5372
	0,15	3,00	1,31E-03	0,6635
	0,25	2,469	6,77E-03	0,7763
S₃₇	0,05	4,245	1,09E-05	0,2656
	0,10	3,598	1,60E-04	0,5672
	0,15	3,131	8,72E-04	0,6822
	0,25	2,559	5,24E-03	0,7864
S₆₅	0,05	7,193	3,16E-13	0,5275
	0,10	5,754	4,36E-09	0,6830
	0,15	4,942	3,87E-07	0,7491
	0,25	4,018	2,93E-05	0,8151

Da Tabela 6.19 pode-se concluir que a medida que aumenta o COV da carga móvel Q diminui o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha aumenta. Quando o COV da carga móvel aumenta, aumenta a área de interseção entre as distribuições e conseqüentemente aumenta a probabilidade de falha.

A Figura 6.7 mostra o índice de confiabilidade para cada seção onde pode-se observar melhor o comportamento da variação do COV da variável aleatória em questão.

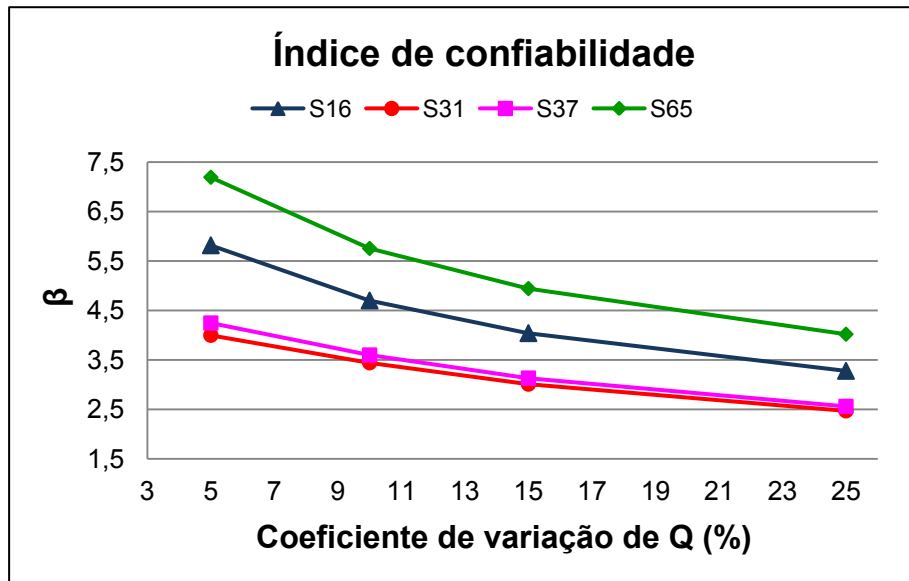


Figura 6.7. Variação do índice de confiabilidade em função do COV da carga móvel Q.

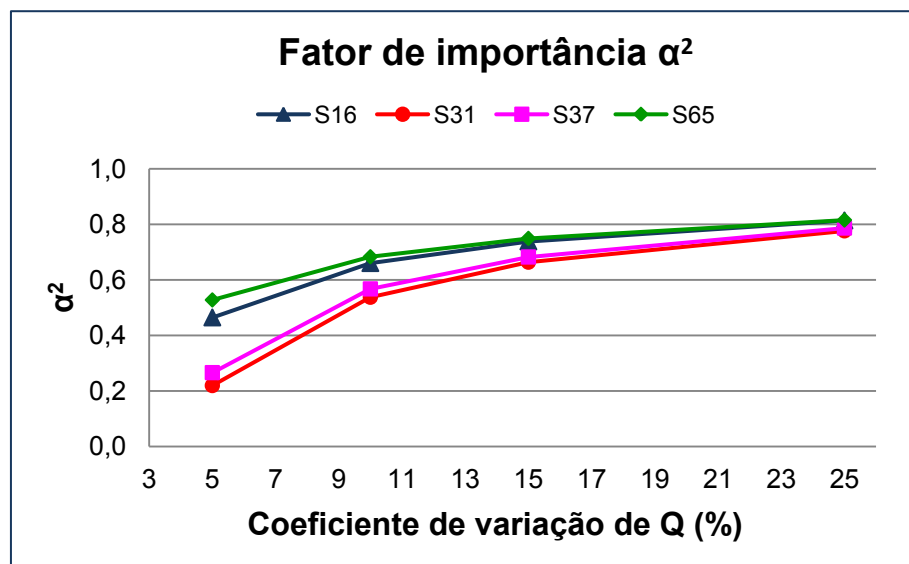


Figura 6.8. Variação do fator de importância em função do COV de Q.

O coeficiente de variação também tem influência no fator de importância da carga móvel, Q. Na Figura seguinte pode-se observar que a medida que aumenta o coeficiente de variação aumenta o fator de importância, já que as variações nos parâmetros da variável aleatória mais importante dentro da análise, estão diretamente relacionados com as variações no seu fator de importância. Para cada incremento do coeficiente de variação os valores médios são mantidos iguais e os valores do desvio padrão aumentam, gerando uma diminuição nos parâmetros da distribuição Tipo1, e finalmente maiores valores

da variável dentro da função de estado limite e portanto fatores de importância mais altos.

6.2.5. Influência da Variação da Carga Móvel na Probabilidade de Falha

É considerado um incremento na carga móvel aumentando a mesma em 25%, 50% e 100%, para verificar a influência da variável na variação da probabilidade de falha. As variáveis aleatórias consideradas na análise são: f_{yk} , γ , Q , φ . Os valores médios e coeficientes de variação de cada variável são descritos na Tabela 6.2 e na Tabela 6.20. Os resultados para esta análise são apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 6.20. Valores característicos e valores médios da carga móvel Q

Variável	V característico	V médio
Q	325,000	308,623
Q + 25%	406,250	385,778
Q + 50%	487,500	462,934
Q + 100%	650,000	617,245

Tabela 6.21. Resultado do FORM para quatro variáveis aleatórias com carga móvel Q aumentada 25% 50% e 100%

Seção	Aumento Q	β	P_f	α^2
S ₁₆	25%	3,197	6,95E-04	0,7166
	50%	2,484	6,50E-03	0,6805
	100%	1,267	1,02E-01	0,5760
S ₃₁	25%	2,143	1,61E-02	0,6100
	50%	1,386	8,29E-02	0,5436
	100%	0,095	4,62E-01	0,4222
S ₃₇	25%	2,265	1,18E-02	0,6328
	50%	1,509	6,56E-02	0,5681
	100%	0,216	4,14E-01	0,4425
S ₆₅	25%	4,105	2,03E-05	0,7425
	50%	3,417	3,17E-04	0,7276
	100%	2,289	1,10E-02	0,6710

Das análises, observa-se que a medida que aumenta a carga móvel a probabilidade de falha aumenta. Quando a carga móvel é aumentada 100% o índice de confiabilidade para a seção 16 diminui 70% do índice de confiabilidade com a carga inicial, para a seção 31 diminui 97% para a seção 37, 93% e para a seção 65 diminui 54%.

O JCSS propõe um valor para o índice de confiabilidade de referência β_T para um período de referência de um ano e para o estado limite último, que foram descritos no Capítulo 4. (item 4.6). Para o caso de pontes admite-se β_T igual a 4,4 ($P_f \approx 5 \cdot 10^{-6}$). A comparação dos resultados obtidos para o índice de confiabilidade segundo o FORM com o índice de confiabilidade de referência, permite evidenciar que as seções não atendem o limite proposto. Isso quer dizer que as seções têm uma probabilidade de falha superior à estipulada no regulamento.

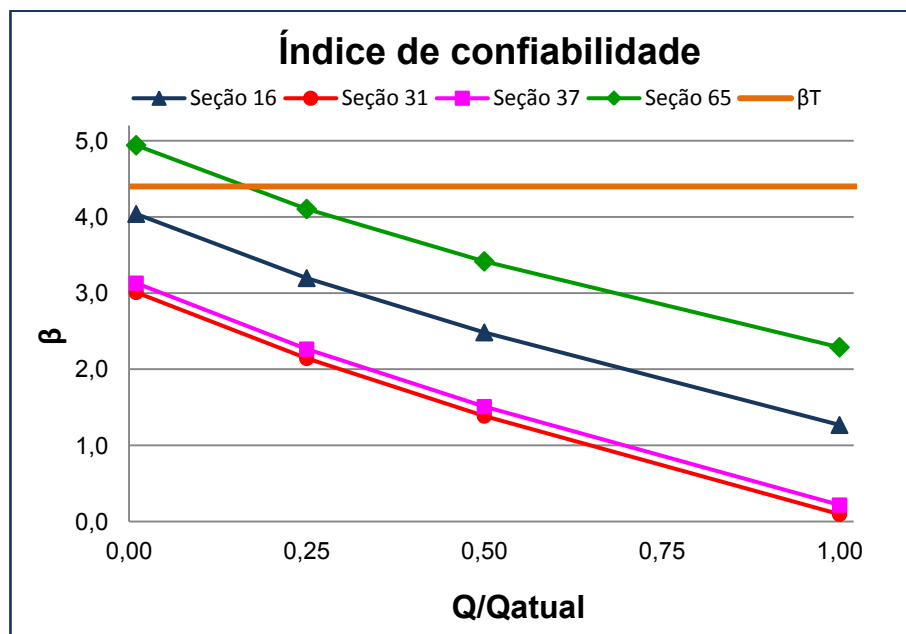


Figura 6.9. Comparação do índice de confiabilidade em função da variação de Q

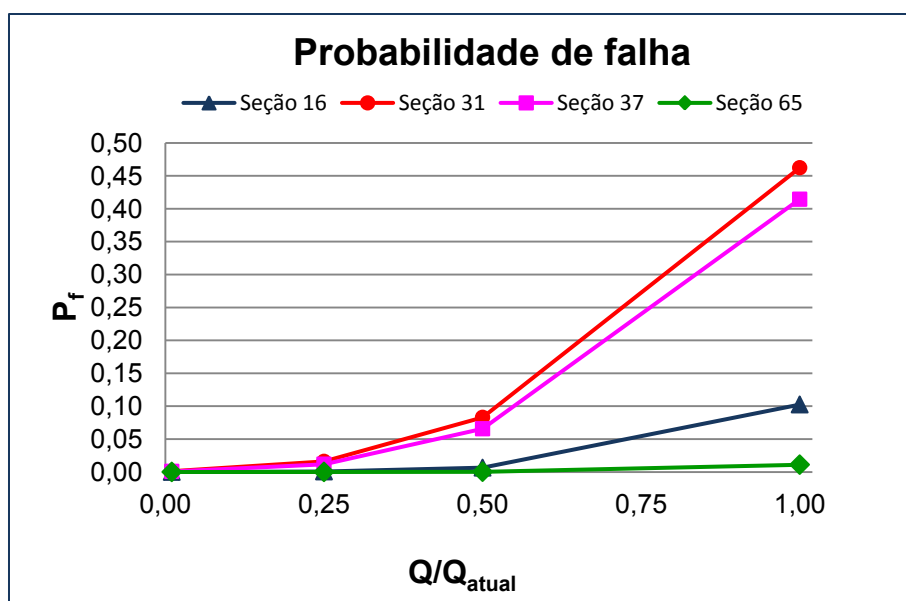


Figura 6.10. Comparação da probabilidade de falha em função da variação de Q

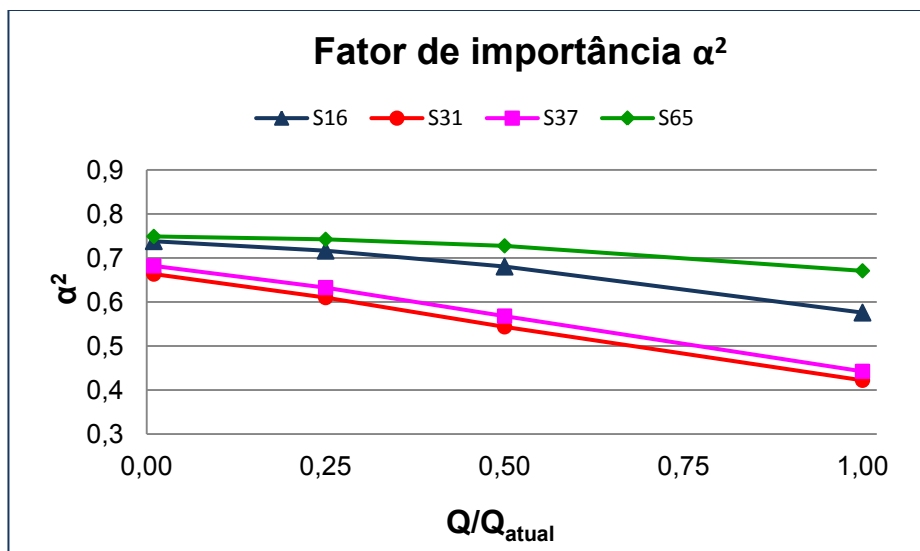


Figura 6.11. Fator de importância em função da variação da carga móvel Q.

A Figura 6.11 permite evidenciar que a medida que a carga móvel é acrescentada o fator de importância da variável diminui, para cada incremento da carga móvel os valores médios da variável aumentam e os valores do coeficiente de variação são mantidos iguais, por tanto a medida que aumenta a carga móvel o desvio padrão aumenta o que gera um incremento nos parâmetros da distribuição Tipo1, e finalmente menores valores da variável dentro da função de estado limite e portanto fatores de importância mais baixos.

6.2.6. Análise com Quatro Variáveis Aleatórias sem Considerar Coeficientes de Segurança

Todas as análises anteriores consideraram os coeficientes de segurança para o cálculo dos momentos envolvidos na função de estado limite. As análises desenvolvidas neste tópico não empregam esses coeficientes e consideram como variáveis aleatórias a resistência característica à tração do aço (f_{yk}), o peso específico do concreto (γ), a carga móvel (Q) e o coeficiente de impacto (ϕ), com modelos probabilísticos descritos na Tabela 6.2.

A Tabela 6.22 apresenta os resultados obtidos da análise com as quatro variáveis aleatórias descritas, via FORM, considerando a armadura de pele. Pode-se observar que a variável que tem maior influência na análise é a carga móvel (Q) e a que tem menor influência é o peso específico do concreto (γ).

A Tabela 6.23 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos, considerando e desconsiderando os coeficientes de segurança. Pode-se

observar que existe uma diferença grande entre as análises o que evidencia a influência dos coeficientes na probabilidade de falha da estrutura.

Tabela 6.22. Análises para quatro variáveis aleatórias pelo método FORM, considerando a armadura de pele.

Seção	Variável Aleatória	FORM			
		Iterações	β	P_f	α^2
S ₁₆	f_{yk}	6	6,177	3,26E-10	0,0933
	γ				0,0007
	Q				0,7550
	φ				0,1510
S ₃₁	f_{yk}	6	5,440	2,66E-08	0,1063
	γ				0,0031
	Q				0,7414
	φ				0,1493
S ₃₇	f_{yk}	5	5,495	1,96E-08	0,1038
	γ				0,0022
	Q				0,7444
	φ				0,1497
S ₆₅	f_{yk}	6	7,102	6,15E-13	0,0987
	γ				0,0006
	Q				0,7490
	φ				0,1517

Tabela 6.23. Resultados obtidos com e sem coeficientes de segurança

Seção	Com coeficientes		Sem coeficientes		Diferença %	
	β	P_f	β	P_f	β	P_f
S ₁₆	4,059	2,47E-05	6,177	3,26E-10	52,92	-99,99
S ₃₁	3,040	1,18E-03	5,440	2,66E-08	80,77	-99,99
S ₃₇	3,157	7,97E-04	5,495	1,96E-08	75,50	-99,99
S ₆₅	4,959	3,54E-07	7,102	6,15E-13	43,71	-99,99

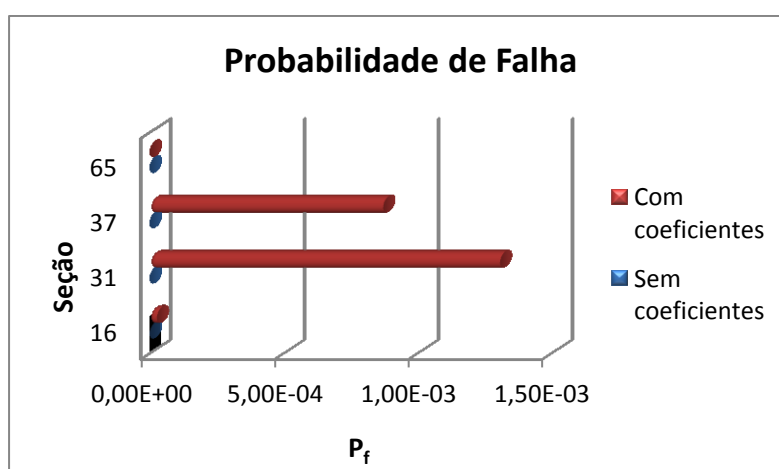


Figura 6.12. Comparação da probabilidade de falha obtida com e sem coeficientes de segurança

É feita a mesma análise para quatro variáveis aleatórias, sem considerar a armadura de pele, os resultados estão nas Tabelas 6.24 e 6.25.

Tabela 6.24. Análises para quatro variáveis aleatórias pelo método FORM, desconsiderando a armadura de pele.

Seção	Variável Aleatória	FORM			
		Iterações	β	P_f	α^2
S ₁₆	f_{yk}	6	5,759	4,22E-09	0,0928
	γ				0,0008
	Q				0,7552
	φ				0,1512
S ₃₁	f_{yk}	5	3,514	2,20E-04	0,1313
	γ				0,0077
	Q				0,6952
	φ				0,1659
S ₃₇	f_{yk}	6	5,114	1,58E-07	0,1056
	γ				0,0025
	Q				0,7413
	φ				0,1506
S ₆₅	f_{yk}	6	6,705	1,00E-11	0,0973
	γ				0,0007
	Q				0,7510
	φ				0,1510

Tabela 6.25. Comparação entre os dados obtidos com e sem coeficientes de segurança, sem armadura de pele.

Seção	Sem coeficientes		Com coeficientes		Diferença %	
	β	P_f	β	P_f	β	P_f
S ₁₆	5,759	4,22E-09	3,604	1,57E-04	59,79	-100
S ₃₁	3,514	2,20E-04	0,403	3,44E-01	771,9	-100
S ₃₇	5,114	1,58E-07	2,686	3,62E-03	90,39	-100
S ₆₅	6,705	1,00E-11	4,546	2,73E-07	47,49	-100

6.2.7.

Influência da Variação COV da Carga Móvel (Q) na Probabilidade de Falha

Como já foi observado nas análises anteriores, a carga móvel é a variável que mais influência tem na probabilidade de falha da estrutura. Dentro do mesmo cenário de quatro variáveis aleatórias, sem consideração dos coeficientes de segurança, é analisada a sensibilidade da probabilidade de falha

em função do coeficiente de variação da carga móvel. Os resultados são apresentados na Tabela 6.26, Figuras 6.13 e 6.14. Quando o COV da carga móvel aumenta o índice de confiabilidade diminui e o fator de importância aumenta.

Tabela 6.26. Resultados da análise de sensibilidade da probabilidade de falha em função do COV da carga Q, sem considerar coeficientes de segurança

Seção	COV _Q	β	P _f	α^2
S ₁₆	0,05	9,050	0,00E+00	0,5785
	0,10	7,188	3,29E-13	0,7000
	0,15	6,177	3,26E-10	0,7550
	0,25	5,042	2,30E-07	0,8127
S ₃₁	0,05	7,866	1,89E-15	0,5212
	0,10	6,317	1,33E-10	0,6758
	0,15	5,440	2,66E-08	0,7414
	0,25	4,441	4,49E-06	0,8072
S ₃₇	0,05	7,969	7,77E-16	0,5319
	0,10	6,384	8,63E-11	0,6806
	0,15	5,495	1,96E-08	0,7444
	0,25	4,483	3,68E-06	0,8088
S ₆₅	0,05	9,984	0,00E+00	0,5778
	0,10	8,244	1,11E-16	0,6980
	0,15	7,102	6,15E-13	0,7490
	0,25	5,821	2,93E-09	0,8043

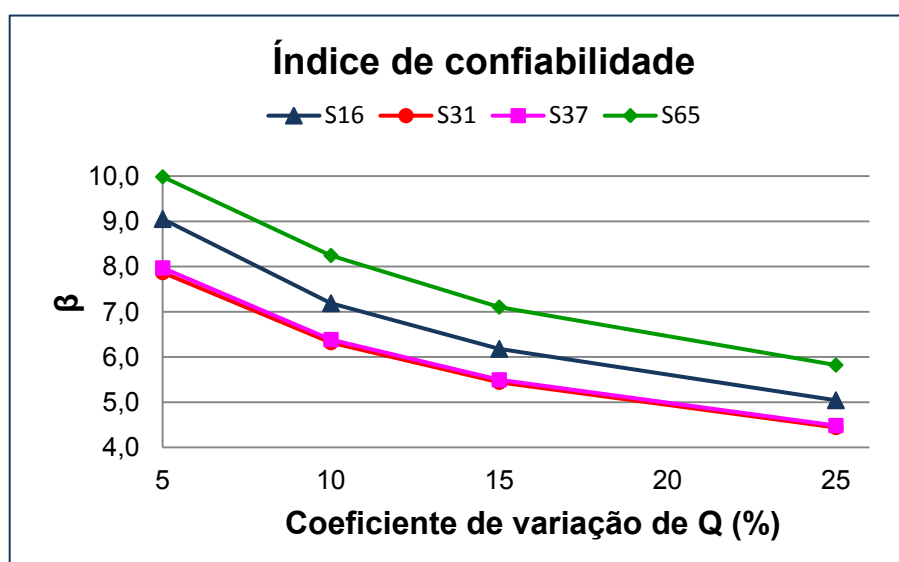


Figura 6.13. Variação do índice de confiabilidade em função do COV da carga móvel Q, sem coeficientes de segurança.

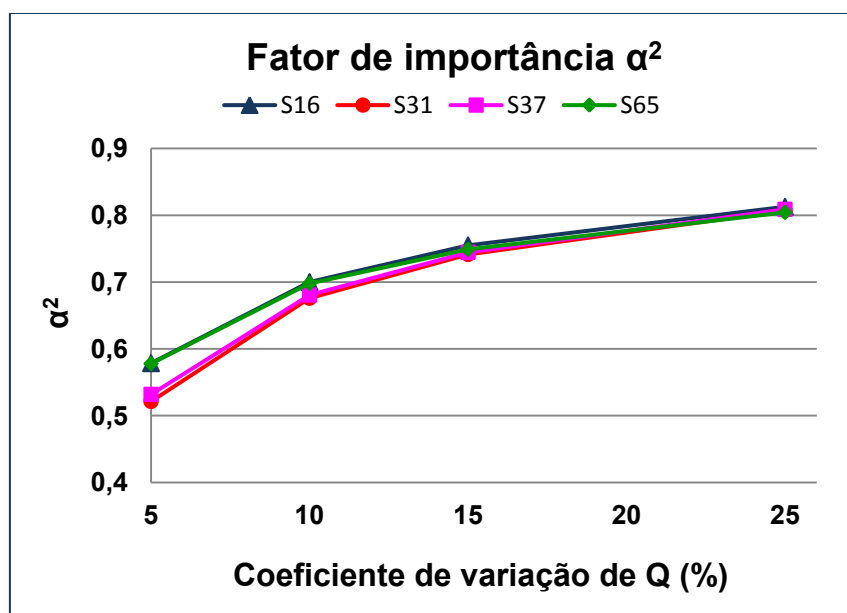


Figura 6.14. Variação do fator de importância em função do COV de Q, sem coeficientes de segurança.

6.2.8. Influência da Variação da Carga Móvel na Probabilidade de Falha

Para estudar a influência da carga móvel na probabilidade de falha da estrutura, segue-se o mesmo procedimento descrito no item 6.2.5. Os dados dos valores característicos e valores médios da carga móvel são apresentados na Tabela 6.20, enquanto os resultados obtidos estão na Tabela 6.27.

Tabela 6.27. Resultado do método FORM variando a carga móvel, sem considerar coeficientes de segurança

Seção	Aumento Q	β	P_f	α^2
S ₁₆	25%	5,315	5,35E-08	0,7585
	50%	4,623	1,89E-06	0,7568
	100%	3,536	2,03E-04	0,7401
S ₃₁	25%	4,603	2,09E-06	0,7407
	50%	3,922	4,39E-05	0,7329
	100%	2,828	2,35E-03	0,6970
S ₃₇	25%	4,654	1,62E-06	0,7439
	50%	3,973	3,55E-05	0,7366
	100%	2,878	2,00E-03	0,7023
S ₆₅	25%	6,210	2,65E-10	0,7566
	50%	5,501	1,88E-08	0,7599
	100%	4,408	5,21E-06	0,7568

Das análises se observa que a medida que aumenta a carga móvel a probabilidade de falha aumenta.

A comparação do índice de confiabilidade e a probabilidade de falha em função da variação da carga móvel são representadas nas Figuras 6.15 e 6.16. Confrontando esses valores com os limites fixados pelo JCSS para o índice de confiabilidade de referência β_T igual a 4,4 ($P_f \approx 5 \cdot 10^{-6}$), verifica-se que todas as seções resistem a um aumento da carga móvel, em pelo menos 25%, sem ultrapassarem o nível de probabilidade fixado pelo JCSS. Já com um incremento de 50% só são verificadas as seções 16 e 65. Finalmente pode-se observar que a seção 65 continua sendo verificado, ainda com um incremento de carga móvel de 100%. A análise evidencia a influência que tem os fatores de segurança dentro dos resultados.

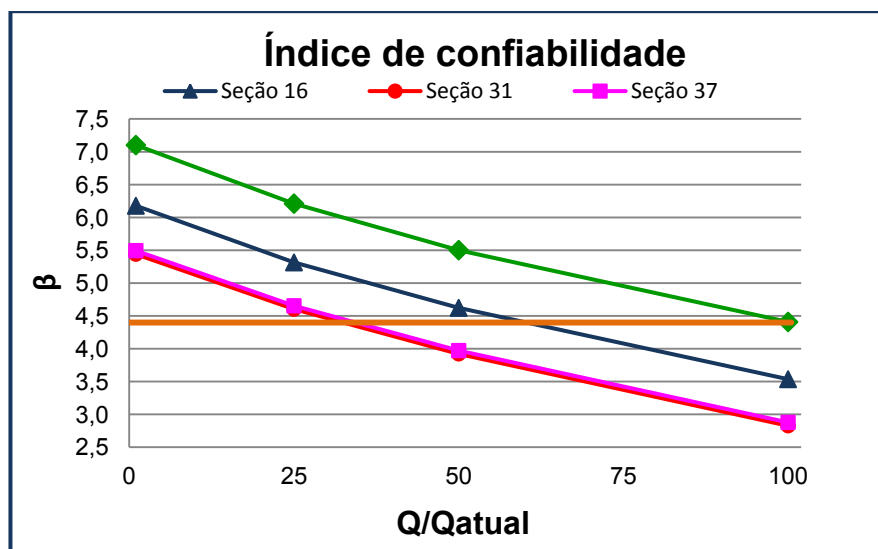


Figura 6.15. Comparação do índice de confiabilidade em função da variação de Q sem coeficientes de segurança

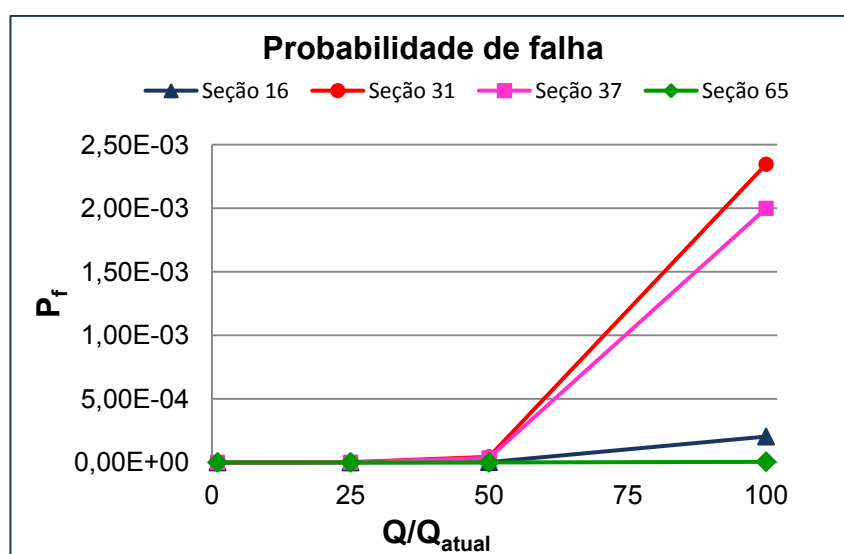


Figura 6.16 Probabilidade de falha em função da variação de Q sem coeficientes de segurança

6.3.

Análise no Estado Limite de Serviço na Formação de Fissuras

Conforme descrito no capítulo 5, a Função de Estado Limite para formação de fissuras é:

$$G(\mathbf{X}) = \frac{\alpha \cdot 0,21 \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot I_c}{y_c} - (M_{sp1} \gamma + M_{spadic}) - (M_{sq1} Q \cdot \varphi)$$

Na análise são consideradas as quatro seções descritas na Tabela 6.1. O cálculo do momento de fissuração e os momentos solicitantes segue o exposto no Capítulo 5, desse modo as funções de estado limite encontradas para cada seção são:

$$S_{16} \rightarrow M_f - (49,8349 \gamma + 699,7296) - 9,799 Q \varphi$$

$$S_{31} \rightarrow M_f - (148,8511 \gamma + 1925,6493) - 16,201 Q \varphi$$

$$S_{37} \rightarrow M_f - (98,3570 \gamma + 1310,5215) - 12,627 Q \varphi$$

$$S_{65} \rightarrow M_f - (44,8920 \gamma + 617,5244) - 7,824 Q \varphi$$

A resistência à compressão do concreto (f_{ck}), o peso específico do concreto (γ), a carga móvel (Q) e o coeficiente de impacto (φ) são consideradas como variáveis aleatórias na análise, com os modelos probabilísticos da Tabela 6.2. Os resultados seguindo a metodologia do FORM são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 6.28. Resultados (via FORM), para o estado limite de formação de fissuras

Seção	Variável Aleatória	FORM			
		Iterações	β	P_f	α^2
S ₁₆	f_{ck}				0,3322
	γ	5	2,459	6,96E-03	0,0178
	Q				0,3998
	φ				0,2502
S ₃₁	f_{ck}				
S ₃₁	γ	5	3,987	3,34E-05	0,0545
	Q				0,3261
	φ				0,1728
	S ₃₇				f_{ck}
S ₃₇	γ	8	5,362	4,11E-08	0,0558
	Q				0,4223
	φ				0,1297
	S ₆₅				f_{ck}
S ₆₅	γ	4	1,413	7,88E-02	0,0178
	Q				0,3649
	φ				0,2530

O JCSS recomenda um índice de confiabilidade de referência $\beta_T = 1.7$ ($P_f=5*10^{-2}$). Dos resultados obtidos para formação de fissuras observa-se que as seções 16, 31 e 37 atendem a recomendação do JCSS. O mesmo não acontece para a seção 65, que apresenta um valor do índice de confiabilidade menor do que β_T , devendo passar por análise mais elaborada de confiabilidade.

Segundo a Tabela 6.28, encontra-se que a resistência à compressão do concreto tem um fator de importância significativo em comparação com o estado limite último, sendo a variável mais importante para a seção 31, para as outras seções a intensidade da carga móvel continua sendo a variável mais significativa no cálculo da probabilidade de falha.