

5 Exemplos de Aplicação

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados seis exemplos elaborados de forma que todas as opções de análises implementadas no programa de confiabilidade de estruturas, descritas no item 4.2.2. sejam utilizadas.

A seguir, é apresentado um resumo do que é realizado nos exemplos.

Do primeiro ao quarto exemplo avalia-se a confiabilidade da seção mais solicitada de uma viga de concreto armado (Figura 5.1a) para os modos de colapso ocasionados pela força cortante. Os modelos probabilísticos das variáveis consideradas aleatórias são definidos no primeiro exemplo. No segundo exemplo, o modelo probabilístico das cargas acidentais é variado. No terceiro, são incluídos os fatores de modelagem como variáveis aleatórias. No quarto, as propriedades geométricas são alteradas.

No quinto exemplo é estudada a seção mais solicitada de uma viga de concreto armado reforçada à força cortante com CFRP (Figura 5.1b), devido aos acréscimos de cargas acidentais, para os modos de colapso ocasionados pela força cortante. É efetuado o dimensionamento da taxa geométrica de reforço pelo projeto corrente e pelo projeto baseado em confiabilidade e é avaliada a confiabilidade da seção para valores fornecidos de taxa geométrica de reforço.

No sexto exemplo é efetuado o dimensionamento da taxa geométrica de reforço pelo projeto baseado em confiabilidade, sendo variado o valor da resistência à compressão do concreto.

Para desenvolvimento dos exemplos algumas decisões foram tomadas:

- Foi considerado que o dimensionamento da armadura transversal tenha sido efetuado, para o estado limite último, a partir do modelo de cálculo I da NBR 6118 (2003), com o valor da intensidade da força cortante solicitante de cálculo igual ao valor da resistência de cálculo:

$$V_{Sd} = V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (5.1)$$

onde $V_c = 59,68 \text{ kN}$, $V_{sw} = 73,19 \text{ kN}$ e $V_{Sd} = V_{Rd3} = 132,87 \text{ kN}$.

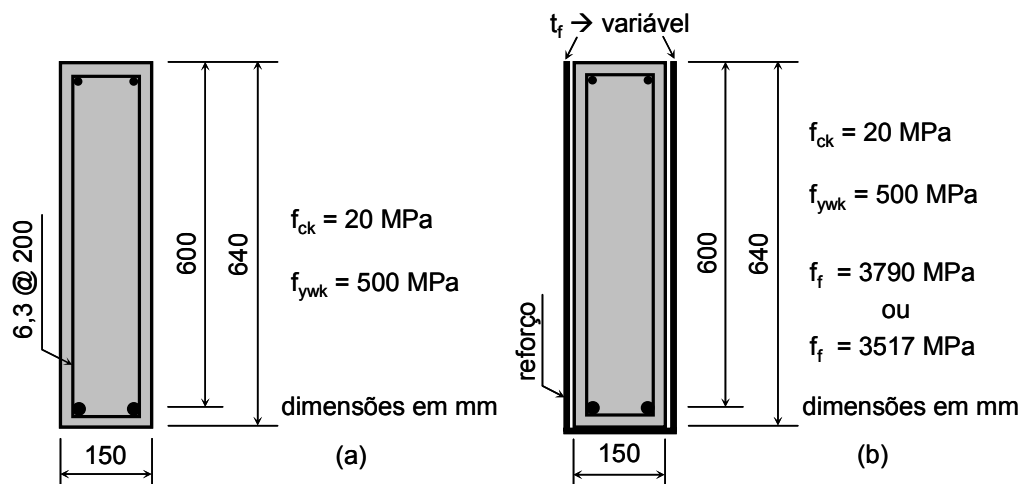


Figura 5.1 – Propriedades geométricas e mecânicas utilizadas nos exemplos: a) viga de concreto armado; b) viga reforçada.

- Adotou-se a força cortante solicitante constituída por duas parcelas de cargas, a primeira proveniente de cargas permanentes e a segunda de cargas acidentais.

$$V_{gk} = \frac{k_g V_{Sd}}{\gamma_g} \quad (5.2)$$

$$V_{qk} = \frac{k_q V_{Sd}}{\gamma_q} \quad (5.3)$$

com $\gamma_g = \gamma_q = 1,4$.

- Foram supostas duas situações distintas para a natureza da carga total, com predominância de parcela permanente ou acidental, de acordo com as proporções abaixo.

Tabela 5.1 – Proporções de carga permanente e acidental em relação à carga total.

Caso	Proporções de carga permanente e acidental em relação à carga total	
	k_g (%)	k_q (%)
1	75	25
2	25	75

5.2. Primeiro Exemplo

Este exemplo tem como objetivo avaliar a confiabilidade da seção mais solicitada de uma viga de concreto armado (Figura 5.1a) para os modos de colapso ocasionados pela força cortante. É utilizada a opção implementada no programa de confiabilidade de estruturas para análise de seções de concreto armado (letra (a) do item 4.2.2.).

Os resultados obtidos são comparados com os resultados fornecidos pelo Programa Comrel Versão 8.00 para aferição do programa implementado.

5.2.1. Modelos Probabilísticos das Resistências e das Solicitações

Neste exemplo são consideradas como variáveis aleatórias: a resistência à compressão do concreto (f_c), a resistência à tração do aço (f_{yw}), a parcela da força cortante proveniente das cargas permanentes (V_g) e a parcela da força cortante proveniente das cargas acidentais (V_q).

Os modelos probabilísticos adotados para as variáveis são sintetizados na tabela a seguir e definidos adiante. Estes modelos são utilizados também nos demais exemplos, exceto quando há alguma modificação relatada no exemplo.

Tabela 5.2 – Modelos probabilísticos das resistências do concreto e do aço e das solicitações permanente e acidental.

Caso	Variável Aleatória	Valor Característico	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Distribuição
1 e 2	f_c (MPa)	20	26,6	4	15,04	Lognormal
1 e 2	f_{yw} (MPa)	500	560	30	5,36	Lognormal
1	V_g (kN)	71,18	71,18	7,12	10	Normal
	V_q (kN)	23,73	23,73	5,93	25	Gumbel
2	V_g (kN)	23,73	23,73	2,37	10	Normal
	V_q (kN)	71,18	71,18	17,79	25	Gumbel

Definição dos modelos probabilísticos das variáveis aleatórias:

- 1) Resistência à compressão do concreto

O modelo probabilístico adotado para a resistência à compressão do concreto se baseia nas recomendações da NBR 8681 (2003), da NBR 12655 (1996) e do JCSS (2001).

Segundo a NBR 8681 (2003), a resistência característica inferior $f_{k,inf}$ dos materiais é admitida como sendo o valor que tem apenas 5% de probabilidade de não ser atingido pelos elementos de um dado lote de material. O valor de $f_{k,inf}$ é sempre menor do que a resistência média f_m , dada pela média aritmética das resistências dos elementos que compõe o lote considerado de material.

A NBR 12655 (1996) fornece para o cálculo da resistência média do concreto à compressão f_{cj} , prevista para a idade de j dias, a seguinte expressão:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 S_d \quad (5.4)$$

onde:

S_d - é o desvio padrão da dosagem, tabelado na norma de acordo com a condição de preparo do concreto (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Desvio Padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto.

Condição de Preparo	Desvio Padrão <i>MPa</i>
Boa	4,0
Média	5,5
Ruim	7,0

O valor constante (1,65) da equação 5.4 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 $P(f_c \leq f_{ck}) = 0,05$.

O JCSS (2001) sugere que seja adotada a distribuição Lognormal.

2) Resistência à tração da armadura de aço

O modelo probabilístico adotado para a resistência à tração do aço se baseia nas recomendações do JCSS (2001) que fornece para o cálculo da média da resistência de escoamento do aço a seguinte expressão:

$$\mu_{f_{yw}} = S_{nom} + 2\sigma_{f_{yw}} \quad (5.5)$$

onde:

S_{nom} - valor característico da resistência de escoamento f_{yw} , em MPa;

$\sigma_{f_{yw}}$ - desvio padrão da resistência de escoamento do aço, sendo recomendado pelo JCSS (2001) o valor de 30 MPa.

É sugerido adotar distribuição Lognormal.

3) Força cortante proveniente da carga permanente

Considera-se como carga permanente o peso próprio da estrutura e os elementos não estruturais conectados permanentemente à estrutura.

O modelo probabilístico adotado para a carga permanente é baseado em ELLINGWOOD et alii (1980), que propõe $CoV = 0,10$ e distribuição Normal, e na NBR 8681 (2003), onde é mencionado que para as cargas permanentes o valor característico é igual ao valor médio.

Considera-se que o modelo probabilístico adotado para a força cortante proveniente da carga permanente é o mesmo adotado para a carga permanente.

4) Força cortante proveniente da carga acidental

A carga acidental é dividida em duas categorias:

- a) contínua: constituída do peso dos móveis, dos equipamentos, das pessoas e de seus pertences.
- b) momentânea: constituída do peso das pessoas e de seus pertences que pode existir durante um evento não usual como numa emergência, quando todos se posicionam numa mesma sala, ou devido ao armazenamento de móveis numa determinada área.

Segundo NOWAK e COLLINS (2000), os parâmetros estatísticos das duas categorias de carga acidental dependem da área de influência, sendo, quanto maior a área de contribuição para a carga acidental menor é o valor nominal da carga. O valor do coeficiente de variação também diminui com o aumento da área de influência.

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 tempo de retorno considerado.

O modelo probabilístico adotado para a carga acidental máxima equivalente, para um período de retorno de 50 anos, é baseado em

ELLINGWOOD et alii (1980), que propõe $CoV = 0,25$; 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 cortante proveniente da carga acidental é o mesmo adotado para a carga acidental.

5.2.2. Resultados

Pela Tabela 5.4 constata-se que os valores obtidos pelos dois programas são muito próximos e que a seção de concreto armado analisada tem maior probabilidade de falhar devido à ruína de sua alma por tração diagonal, coincidindo com a filosofia adotada pela NBR 6118 (2003).

Observa-se que os índices de confiabilidade diminuem com o aumento da proporção de cargas acidentais, sendo que o valor da carga total é mantido.

Comparando os valores obtidos de índices de confiabilidade (β_2 e β_3) com o valor de $\beta_r = 3,8$, sugerido pelo Eurocode ENV (1990), verifica-se que para o Caso 1 os valores de β_2 e β_3 são exagerados, porém para o Caso 2, o valor de β_3 (referente à tração diagonal) é menor do que $\beta_r = 3,8$.

Esta diferença de nível de confiabilidade ocorre porque o método semi-probabilístico utilizado na NBR 6118 (2003) adota coeficientes de segurança iguais para cargas permanentes e acidentais, não levando em consideração a maior variabilidade das cargas acidentais. Na análise de confiabilidade de estruturas a diferença de variabilidade é considerada através da adoção de valores diferentes de coeficientes de variação para cargas permanentes e acidentais e, também, distintas distribuições de probabilidade.

Tabela 5.4 – Índices de confiabilidade e probabilidades de falha do primeiro exemplo para os modos de colapso.

Caso	Proporções das cargas (%)		Programa							
			Implementado em C				Comercial – Comrel			
	k_g	k_q	β_2	p_{f2}	β_3	p_{f3}	β_2	p_{f2}	β_3	p_{f3}
1	75	25	9,72	-	5,66	7,44E-9	9,72	1,26E-22	5,66	7,47E-9
2	25	75	6,74	7,68E-12	3,27	5,41E-4	6,74	7,70E-12	3,27	5,36E-4

A Tabela 5.5 mostra que os valores do índice de confiabilidade equivalente e da probabilidade de falha, considerando a formulação de sistemas em série, assumem os mesmos valores obtidos para o modo de falha referente à tração diagonal (contidos na Tabela 5.4).

Os valores do coeficiente de correlação entre as duas funções de falha (Tabela 5.5) indicam que os modos de ruptura são dependentes entre si, apresentando dependência maior para o Caso 2.

Tabela 5.5 – Índice de confiabilidade equivalente e probabilidade de falha do primeiro exemplo para sistema em série.

Caso	ρ_{ik}	$\beta_{e,série}$	$P_{f,série}$
1	0,88	5,66	7,44E-9
2	0,93	3,27	5,41E-4

Quanto aos fatores de importância observa-se, pela Tabela 5.6, que para a função de estado que avalia o esmagamento das bielas as variáveis aleatórias f_c e V_q apresentam fatores de importância próximos no Caso 1, porém V_q passa a ter uma importância bem maior no Caso 2, devido à proporção de cargas acidentais ser maior. Na função de estado que avalia a tração diagonal somente o fator de importância de V_q é significativo, isto pode estar relacionado com o fato de que o valor do coeficiente de variação adotado para V_q é bem maior do que os adotados para as demais variáveis.

Tabela 5.6 – Fatores de importância das variáveis aleatórias do primeiro exemplo para os modos de colapso.

Caso	Índice	Fatores de importância (%)							
		Programa Implementado				Programa Comrel			
		f_c	f_{yw}	V_g	V_q	f_c	f_{yw}	V_g	V_q
1	β_2	48,7	-	2,4	48,9	49,0	-	2,4	48,6
	β_3	9,6	3,1	6,9	80,4	9,6	3,5	6,9	80,0
2	β_2	26,6	-	0,1	73,3	26,7	-	0,1	73,2
	β_3	3,7	1,0	0,2	95,1	3,6	1,1	0,2	95,1

5.3. Segundo Exemplo

Este exemplo tem como objetivo analisar o elevado fator de importância obtido no exemplo anterior para a variável aleatória V_q .

O exemplo anterior é repetido considerando os mesmos modelos probabilísticos, porém alterando o valor do coeficiente de variação das cargas acidentais de 25% para 10%, passando a ter um valor igual ao adotado para as cargas permanentes. Posteriormente o valor do coeficiente de variação da variável V_q é variado, assumindo valores entre 10% a 30%, e finalmente a confiabilidade é avaliada adotando distribuição Normal e coeficiente de variação igual a 10% para a variável aleatória V_q .

5.3.1. Resultados

Adotando um coeficiente de variação menor para as cargas acidentais a seção de concreto armado passa a apresentar uma confiabilidade maior (Tabela 5.7), os valores dos índices de confiabilidade aumentam e valores de probabilidades de falha diminuem, comparado com os valores obtidos no primeiro exemplo (Tabela 5.4).

A partir da Tabela 5.7 observa-se que com o aumento de proporção de cargas acidentais (Caso 2) os valores dos índices de confiabilidade diminuem, conforme constatado, também, no primeiro exemplo. Isto indica que adotar distribuição Gumbel (distribuição de valores extremos máximos) para as cargas acidentais influencia muito o resultado, mostrando que uma variável com o comportamento representado pela distribuição Gumbel torna-se determinante na avaliação de falha da estrutura.

Tabela 5.7 – Índices de confiabilidade e probabilidades de falha do segundo exemplo para os modos de colapso, com $CoV_{Vq} = 10\%$.

Caso	Proporções das cargas (%)		Índices de confiabilidade e probabilidades de falha			
	k_g	k_q	β_2	p_{f2}	β_3	p_{f3}
1	75	25	11,41	-	7,96	8,88E-16
2	25	75	9,32	-	5,34	4,74E-8

A Tabela 5.8 mostra que os valores do índice de confiabilidade equivalente e da probabilidade de falha, considerando a formulação de sistemas em série, continuam assumindo os mesmos valores obtidos para o modo de falha referente à tração diagonal (contidos na Tabela 5.7).

Tabela 5.8 – Índice de confiabilidade e probabilidade de falha do segundo exemplo para sistema em série, com $CoV_{Vq} = 10\%$.

Caso	ρ_{ik}	$\beta_{e,série}$	$\rho_{f,série}$
1	0,78	7,96	8,88E-16
2	0,90	5,34	4,74E-8

Os valores dos fatores de importância obtidos para as variáveis aleatórias (Tabela 5.9) deixam claro a elevada influência da distribuição Gumbel, adotada para as cargas acidentais, pois mesmo no Caso 1 onde 75% da carga total é de natureza permanente a variável V_q apresenta, para a função de estado que avalia a tração diagonal, um fator de importância bem maior, chegando a ser aproximadamente duas vezes maior do que o apresentado para a variável V_g .

Tabela 5.9 – Fatores de importância das variáveis aleatórias do segundo exemplo para os modos de colapso, com $CoV_{Vq} = 10\%$.

Caso	Índice	Fatores de importância (%)			
		f_c	f_{yw}	V_g	V_q
1	β_2	79,5	-	10,2	10,3
	β_3	21,0	8,8	22,1	48,1
2	β_2	43,7	-	0,2	56,1
	β_3	7,9	2,5	0,6	89,0

Na Figura 5.2 é verificada a influência do valor do coeficiente de variação adotado para V_q nos valores dos índices de confiabilidade (β_2 e β_3).

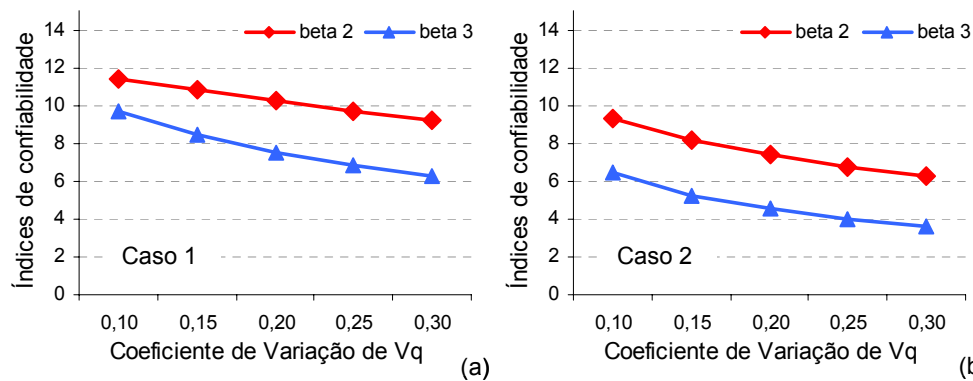


Figura 5.2 – Gráfico coeficiente de variação de V_q x índices de confiabilidade: (a) Caso 1, (b) Caso 2.

A Figura 5.3 apresenta gráficos que relacionam fatores de importância das variáveis aleatórias com coeficientes de variação adotados para a variável aleatória V_q para o Caso 1, onde 75% da carga total é de natureza permanente.

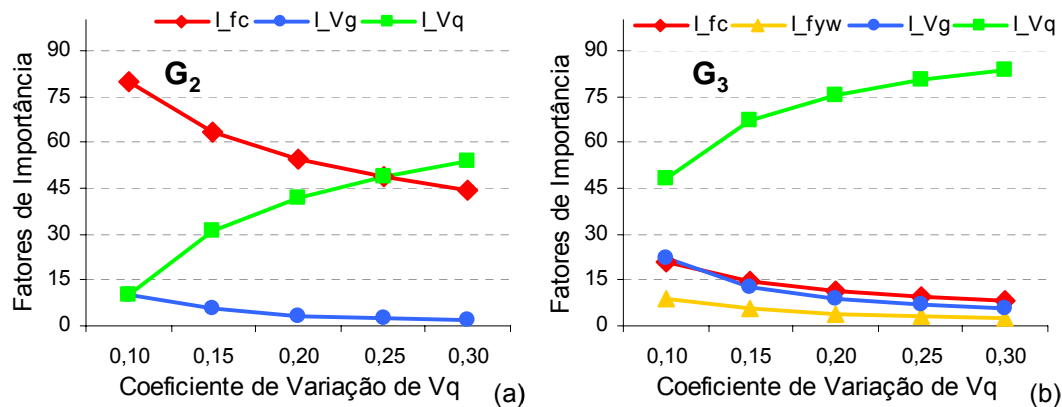


Figura 5.3 – Gráfico coeficiente de variação de V_q x fatores de importância das variáveis aleatórias (caso 1): (a) para função de estado que avalia o esmagamento das bielas, (b) para função de estado que avalia a tração diagonal.

Se fosse adotada a distribuição Normal e coeficiente de variação igual a 10% para as duas parcelas de cargas (permanentes e acidentais) os resultados dos índices de confiabilidade obtidos para os Casos 1 e 2 seriam iguais ($\beta_2 = 11,49$ e $\beta_3 = 8,54$) e a importância das variáveis aleatórias V_g e V_q se revezariam de acordo com a proporção adotada de carga permanente e acidental (Tabela 5.10), confirmando que o elevado valor do fator de importância da variável aleatória V_q , no primeiro exemplo, é principalmente devido a se adotar distribuição Gumbel para as cargas acidentais.

Tabela 5.10 – Fatores de importância das variáveis aleatórias do segundo exemplo para os modos de colapso, supondo distribuição Normal e CoV = 10% para cargas permanentes e acidentais.

Caso	Índice	Fatores de importância (%)			
		f_c	f_{yw}	V_g	V_q
1	β_2	86,0	-	12,6	1,4
	β_3	33,4	16,1	45,4	5,1
2	β_2	86,0	-	1,4	12,6
	β_3	33,4	16,1	5,1	45,4

5.4. Terceiro Exemplo

Este exemplo tem como objetivo acrescentar os fatores de modelagem como variáveis aleatórias.

O primeiro exemplo é repetido considerando os mesmos modelos probabilísticos, porém com o acréscimo os modelos probabilísticos referentes aos fatores de modelagem, definidos adiante.

5.4.1. Considerações e Modelos Probabilísticos dos Fatores de Modelagem

Os modelos de cálculo são de natureza numérica, analítica ou empírica. Na maioria das vezes, são incompletos e inexatos, devido à introdução de algumas simplificações. Para considerar as incertezas existentes nos modelos são utilizados os fatores de modelagem (tratados como variáveis aleatórias). Estes fatores são empregados nos seguintes modelos de cálculo:

- modelos de cálculo das cargas;
- modelos de cálculo dos efeitos das cargas;
- modelos de cálculo das resistências.

Segundo ELLINGWOOD et alii (1980), as incertezas existentes nos modelos de cálculo das cargas já estão sendo consideradas nos valores dos coeficientes de variação adotados para as cargas permanentes e acidentais (item 5.2.1.).

O JCSS (2001) recomenda modelos probabilísticos para os fatores de modelagem dos efeitos das cargas ϕ_S e das resistências ϕ_R em função do tipo

de estrutura e do material utilizado. Para o modelo de cálculo da força cortante atuante em vigas e para o modelo de cálculo da resistência à força cortante de elementos de concreto armado são recomendados os seguintes modelos probabilísticos para ϕ_S e ϕ_R , respectivamente.

Tabela 5.11 – Modelo probabilístico do fator de modelagem da solicitação e da resistência.

Caso	Variável Aleatória	Valor Característico	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Distribuição
1 e 2	ϕ_S	1,0	1,0	0,10	10	Lognormal
1 e 2	ϕ_R	1,4	1,4	0,35	25	Lognormal

O modelo probabilístico recomendado pelo JCSS (2001) para o fator de modelagem da resistência ϕ_R contém valores de média e de coeficiente de variação elevados. Estes valores são adotados neste trabalho, pois ainda existe discordância em relação ao modelo de cálculo da capacidade resistente à força cortante, no que diz respeito à parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de treliça, pois cada norma fornece uma equação diferente.

Acrescentando os fatores de modelagem como variáveis aleatórias passa-se de quatro para seis variáveis aleatórias nos problemas de análise de confiabilidade de seções de concreto armado. As funções de estado são modificadas, para incluir as novas variáveis:

$$G_i = \frac{\phi_R R_i}{\phi_S (S_i)} - 1 \quad (5.6)$$

5.4.2. Resultados

Utilizando os fatores de modelagem, a estrutura apresenta valores menores de índices de confiabilidade quando comparados com os fornecidos no primeiro exemplo, porque as imperfeições dos modelos de cálculo foram levadas em consideração e a estrutura foi melhor avaliada.

Verifica-se que o valores dos índices de confiabilidade (Tabela 5.12) diminuem mais para o Caso 1 do que para o Caso 2, comparado com os valores apresentados na Tabela 5.4, e que tanto para o Caso 1 quanto para o Caso 2 o valor de β_3 (referente à tração diagonal) é menor do que $\beta_r = 3,8$.

Tabela 5.12 – Índices de confiabilidade e probabilidades de falha do terceiro exemplo para os modos de colapso.

Caso	Proporções das cargas (%)		Índices de confiabilidade e probabilidades de falha			
	k_g	k_q	β_2	p_{f2}	β_3	p_{f3}
1	75	25	6,74	7,66E-12	3,63	1,44E-4
2	25	75	5,71	5,66E-9	3,11	9,23E-4

A partir da Tabela 5.13 percebe-se que os valores do índice de confiabilidade equivalente (Caso 1 e Caso 2), considerando a formulação de sistemas em série, continuam assumindo os mesmos valores dos obtidos para o modo de falha referente à tração diagonal (Tabela 5.12) porque os valores de β_3 são muito menores do que os valores de β_2 .

Tabela 5.13 – Índice de confiabilidade e probabilidade de falha do terceiro exemplo para sistema em série.

Caso	ρ_{ik}	$\beta_{e,série}$	$p_{f,série}$
1	0,96	3,63	1,44E-4
2	0,97	3,11	9,23E-4

A Tabela 5.14 mostra que o fator de modelagem da resistência ϕ_R é a variável aleatória que apresenta, no Caso 1, o maior fator de importância. No Caso 2, a variável aleatória V_q continua tendo importância elevada porque 75% da carga total é de natureza acidental.

Tabela 5.14 – Fatores de importância das variáveis aleatórias do terceiro exemplo para os modos de colapso.

Caso	Índice	Fatores de importância (%)					
		f_c	f_{yw}	V_g	V_q	ϕ_R	ϕ_S
1	β_2	18,3	-	3,6	8,2	60,0	9,9
	β_3	3,0	0,8	5,5	5,8	72,9	12,0
2	β_2	11,8	-	0,1	42,3	39,3	6,5
	β_3	1,9	0,5	0,2	43,8	46,0	7,6

5.5. Quarto Exemplo

Este exemplo é teórico e tem como objetivo ilustrar a necessidade de se considerar a formulação de sistemas em série.

O terceiro exemplo é repetido diminuindo a altura útil da seção transversal ($d = 220 \text{ mm}$), diminuindo o espaçamento da armadura transversal ($s = 100 \text{ mm}$) e aumentando a área de armadura transversal ($A_{sw} = 144 \text{ mm}^2$).

5.5.1. Resultados

A partir das Tabelas 5.15 e 5.16 verifica-se que quando os valores dos índices de confiabilidade β_2 (referente ao esmagamento das bielas) e β_3 (referente à tração diagonal) se aproximam, o índice de confiabilidade equivalente obtido considerando a formulação de sistemas em série assume um valor menor do que os valores obtidos para β_2 e β_3 , mostrando a importância de se considerar esta formulação. Neste exemplo, os fatores de modelagem são considerados.

Tabela 5.15 – Índices de confiabilidade e probabilidades de falha do quarto exemplo para os modos de colapso.

Caso	Proporções das cargas (%)		Índices de confiabilidade e probabilidades de falha			
	k_g	k_q	β_2	p_{f2}	β_3	p_{f3}
1	75	25	3,57	1,80E-4	3,66	1,25E-4
2	25	75	3,14	8,47E-4	3,14	8,52E-4

Tabela 5.16 – Índice de confiabilidade e probabilidade de falha do quarto exemplo para sistema em série.

Caso	ρ_{ik}	$\beta_{e,série}$	$p_{f,série}$
1	0,92	3,49	2,41E-4
2	0,95	3,03	1,21E-3

5.6. Quinto Exemplo

Este exemplo tem como objetivo dimensionar o reforço à força cortante necessário devido à suposição de dois acréscimos diferentes de cargas acidentais, conforme especificado na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Acréscimos de cargas acidentais.

Caso	V_{gk} (kN)	$V_{qk, inicial}$ (kN)	ΔV_{qk} (kN)	$V_{qk, final}$ (kN)	$\frac{V_{S, final}}{V_{S, inicial}}$
1a	71,18	23,73	47,45	71,18	1,50
2a	23,73	71,18		118,63	
1b	71,18	23,73	71,18	94,91	1,75
2b	23,73	71,18		142,36	

5.6.1. Considerações

Com os acréscimos de carga acidental os valores característicos, os valores médios e os valores dos desvios padrões contidos nos modelos probabilísticos (Caso 1 e Caso 2) de V_q são alterados. O valor do coeficiente de variação de V_q continua sendo 25%. As proporções das cargas permanentes e acidentais em relação à carga total também se alteram.

Tabela 5.18 – Alterações nos modelos probabilísticos das cargas acidentais e nas combinações de cargas devido aos acréscimos de carga acidental.

Caso	Valor Característico (kN)	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)	Proporções das cargas em relação à carga total	
				k_g (%)	k_q (%)
1a	71,18	71,18	17,79	50	50
2a	118,63	118,63	29,66	17	83
1b	94,91	94,91	23,73	43	57
2b	142,36	142,36	35,59	14	86

Avaliando-se os índices de confiabilidade da seção de concreto armado para as novas solicitações, devido aos acréscimos de carga acidental, verifica-se que os valores do índice de confiabilidade β_2 (referente ao esmagamento das

bielas) diminuem, mas ainda continuam maiores do que o valor de referência $\beta_r = 3,8$, enquanto que os valores do índice de confiabilidade β_3 (referente à tração diagonal) tornam-se muito baixos (Tabela 5.19).

Neste exemplo, são analisadas duas situações diferentes: I – sem considerar os fatores de modelagem e II – considerando os fatores de modelagem. Assim, pode-se observar a influência da adoção destes fatores, no entanto, ressalta-se que em problemas reais os fatores de modelagem devem sempre ser considerados.

Tabela 5.19 – Índices de confiabilidade e probabilidades de falha para os acréscimos de carga do quinto exemplo, para duas situações: I - sem considerar os fatores de modelagem e II – considerando os fatores de modelagem.

Caso	Sem fator de modelagem				Com fator de modelagem			
	β_2	p_{f2}	β_3	p_{f3}	β_2	p_{f2}	β_3	p_{f3}
1a	6,22	2,55E-10	2,10	1,76E-2	5,11	1,63E-7	2,13	1,65E-2
2a	5,04	2,26E-7	1,55	6,01E-2	4,55	2,67E-6	1,92	2,77E-2
1b	5,32	5,27E-8	1,14	1,26E-1	4,56	2,55E-6	1,61	5,41E-2
2b	4,47	3,97E-6	0,90	1,85E-1	4,14	1,77E-5	1,47	7,08E-2

A partir dos valores dos índices de confiabilidade apresentados na Tabela 5.19 verifica-se a possibilidade ($\beta_2 > \beta_r$) e a necessidade ($\beta_3 < \beta_r$) de se realizar o reforço à força cortante. O reforço é executado com CFRP colado em forma de “U” (Figura 5.4) com o ângulo de suas fibras principais $\beta = 90^\circ$.

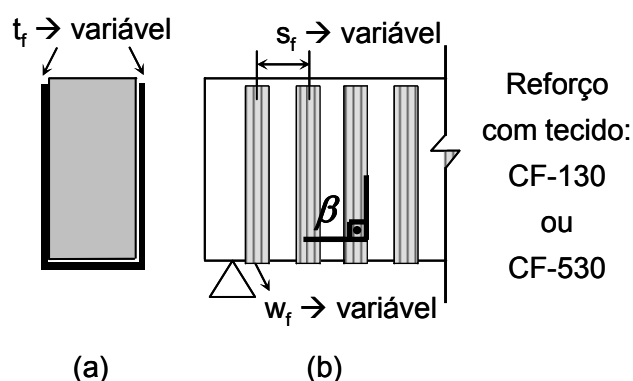


Figura 5.4 – Desenho esquemático do tipo de execução do reforço considerado nos exemplos.

As taxas geométricas de reforço necessárias para resistir aos acréscimos de carga acidental são dimensionadas por dois enfoques:

- semi-probabilístico – projeto corrente (rotinas de cálculo apresentadas no Anexo A);
- probabilístico – projeto baseado em confiabilidade (opção implementada no programa de confiabilidade de estruturas para dimensionamento do reforço à força cortante com CFRP (letra (c) dos itens 4.2.2. e 4.2.3.).

O material de reforço adotado é o tecido unidirecional de fibras de carbono impregnado “in situ” por resina epoxídica. São utilizados dois tipos diferentes de tecidos unidirecionais de fibras de carbono:

- Wabo®MBrace CF-130 (de alta resistência);
- Wabo®MBrace CF-530 (de alto módulo).

O dimensionamento da taxa geométrica de reforço necessária é realizado utilizando as propriedades geométricas e mecânicas desses dois tipos de tecidos (CF-130 e CF-530).

Os valores obtidos de taxas geométricas de reforço, para os dois enfoques de cálculo e para os dois tipos de tecidos considerados, são comparados.

5.6.2.

Modelo Probabilístico da Resistência à Tração do Compósito

Para realizar o dimensionamento baseado em confiabilidade é preciso adotar modelos probabilísticos para as resistências à tração dos dois compósitos considerados, de acordo com o tipo de tecido de fibras de carbono utilizado (CF-130 ou CF-530).

Segundo manual técnico da MBrace, o compósito de fibras de carbono é fortemente influenciado pelas propriedades mecânicas do tecido de fibras utilizado. No dimensionamento do reforço somente a resistência à tração e o módulo longitudinal do tecido de fibras são considerados. Estes valores são determinados a partir da realização do ensaio de tração direta em corpos de prova de CFRP, executados conforme recomendações da ASTM D3039/D3039M (2000). A resistência à tração última é determinada considerando apenas a área do tecido, para isso considera-se no cálculo da área a espessura nominal do tecido ($t_f = 0,165 \text{ mm}$). A resistência característica f_{fk} do CFRP, utilizada no dimensionamento, é determinada por:

$$f_{fk} = f_{fm} - 3\sigma_{f_t} \quad (5.7)$$

sendo:

- f_{fm} - valor médio da resistência à tração última do CFRP;
 σ_{f_f} - desvio padrão da resistência à tração última do CFRP.

A Tabela 5.20 fornece os valores médio e característico da resistência à tração última e os valores do módulo de elasticidade longitudinal dos compósitos constituídos pelos tecidos de fibras de carbono Wabo®MBrace. A Figura 5.5 apresenta as retas tensão x deformação dos mesmos compósitos.

Tabela 5.20 – Valores médio e característico da resistência à tração última e valores do módulo de elasticidade longitudinal dos compósitos constituídos pelos tecidos de fibras de carbono Wabo®MBrace.

Tecidos unidirecionais	f_{fm} (MPa)	f_{fk} (MPa)	E_f (GPa)
Wabo®MBrace CF-130	4275	3790	228
Wabo®MBrace CF-530	4027	3517	372

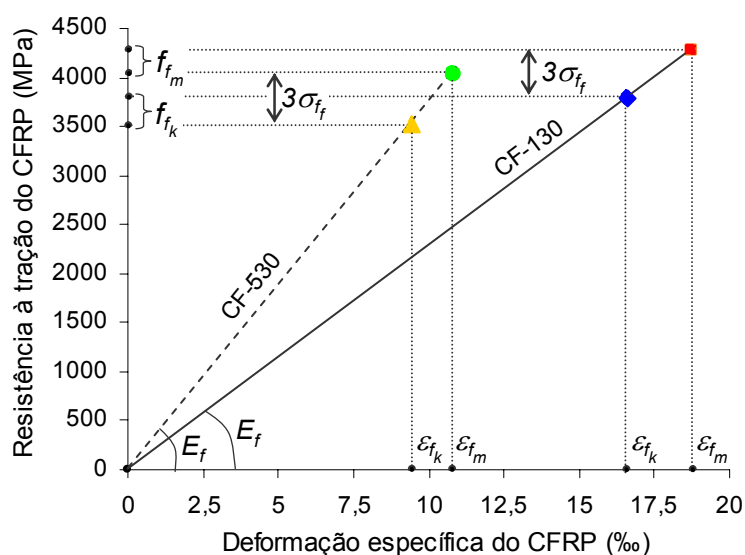


Figura 5.5 – Retas tensão x deformação dos compósitos constituídos pelos tecidos de fibras de carbono Wabo®MBrace.

Os modelos probabilísticos adotados para as resistências à tração dos dois compósitos de fibras de carbono Wabo®MBrace são baseados nos valores fornecidos na Tabela 5.20, conforme apresentado na Tabela 5.21. O módulo de elasticidade longitudinal é tratado como variável determinística.

A distribuição de probabilidades recomendada para a resistência à tração dos compósitos de fibras de carbono é a de valores extremos mínimos do Tipo III (Weibull), segundo PLEVRIS et alii (1995).

Tabela 5.21 – Modelos probabilísticos das resistências à tração dos compósitos constituídos pelos tecidos de fibras de carbono Wabo@MBrace.

Caso	Variável Aleatória	Valor Característico	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Distribuição
Tecido Wabo@MBrace CF-130						
1 e 2	f_f (MPa)	3790	4275	161,67	3,78	Weibull
Tecido Wabo@MBrace CF-530						
1 e 2	f_f (MPa)	3517	4027	170	4,22	Weibull

5.6.3.

Resultados

Os resultados apresentados nas tabelas a seguir (exceto Tabelas 5.24 e 5.25) foram obtidos utilizando a opção implementada no programa de confiabilidade de estruturas para dimensionamento da taxa geométrica de reforço (letra (d) do item 4.2.2.).

Os resultados das Tabelas 5.24 e 5.25 foram obtidos utilizando a opção implementada no programa de confiabilidade de estruturas para análise de seções de concreto armado reforçadas à força cortante com CFRP para um valor fornecido de taxa geométrica de reforço (letra (b) do item 4.2.2.). O valor de taxa geométrica fornecido no programa é o obtido pelo projeto corrente.

Os gráficos foram elaborados a partir dos resultados obtidos utilizando a opção implementada para análise de seções de concreto armado reforçadas à força cortante com CFRP com a taxa geométrica de reforço variando do valor mínimo ao máximo (letra (c) dos itens 4.2.2. e 4.2.3.).

Como mencionado no Capítulo 4, optou-se por dimensionar o reforço utilizando o modelo semi-empírico de CHEN e TENG (2003 a, b) e as prescrições do Bulletin 14 *fib* (2001). Os valores obtidos de taxa geométrica de reforço necessária, pelo enfoque semi-probabilístico e pelo enfoque probabilístico, são apresentados nas Tabelas 5.22 e 5.23, conforme o material de reforço utilizado (tecido unidirecional de fibras de carbono Wabo@MBrace CF-130 ou Wabo@MBrace CF-530). Para cada caso analisado, o reforço é dimensionado sem considerar os fatores de modelagem e, também, considerando, assim pode-se avaliar a influência dos fatores de modelagem.

Pelo enfoque semi-probabilístico, a taxa geométrica de reforço obtida utilizando o modelo de CHEN e TENG (2003 a, b) é maior do que utilizando as prescrições do Bulletin 14 *fib* (2001). Isto ocorre, principalmente, porque as

equações apresentadas pelo Bulletin 14 *fib* (2001) são dadas em função da resistência média do concreto à compressão, enquanto que as equações apresentadas no modelo CHEN e TENG (2003 a, b) são dadas em função da resistência característica do concreto à compressão. No enfoque probabilístico a resistência à compressão do concreto é considerada como variável aleatória utilizando nos dois modelos, CHEN e TENG (2003 a, b) e Bulletin 14 *fib* (2001), o mesmo modelo probabilístico de f_c .

De acordo com os valores apresentados nas Tabelas 5.22 e 5.23 verifica-se que quando é utilizado como material de reforço o tecido unidirecional de fibras de carbono Wabo@MBrace CF-530 a taxa geométrica de reforço necessária ρ_f é bem menor do que quando é utilizado o tecido Wabo@MBrace CF-130.

Quando os fatores de modelagem não são considerados, verifica-se que para os Casos 1a e 1b (maior proporção de carga permanente) as taxas geométricas de reforço obtidas pelo enfoque probabilístico são bem menores do que as obtidas pelo enfoque semi-probabilístico. Para os Casos 2a e 2b (maior proporção de carga acidental) ocorre o contrário.

Quando os fatores de modelagem são considerados, as taxas geométricas de reforço obtidas pelo enfoque probabilístico, para todos os casos, são bem maiores do que as obtidas pelo enfoque semi-probabilístico.

Nos casos onde o valor do índice de confiabilidade β_3 obtido para a seção original, antes do acréscimo de carga (Caso 1, quando os fatores de modelagem não são considerados – Tabela 5.4) é maior do que $\beta_r = 3,8$ a taxa geométrica de reforço fornecida pelo projeto probabilístico é menor do que a obtido pelo projeto corrente, pois a seção de concreto armado original será responsável por suportar uma parcela da carga que foi acrescida. Nesta situação a seção reforçada passa a apresentar uma confiabilidade menor do que apresentava antes, porém ainda assim dentro de um nível aceitável de confiabilidade.

Nos casos onde o valor do índice de confiabilidade β_3 obtido para a seção sem reforço (Caso 1 e Caso 2, quando os fatores de modelagem são considerados – Tabela 5.12) a taxa geométrica de reforço fornecida pelo projeto probabilístico é maior do que a obtido pelo projeto corrente, pois o reforço é responsável por aumentar o índice de confiabilidade da seção original, sem reforço, para $\beta_r = 3,8$ e ainda suportar a carga acidental acrescida mantendo

este valor de índice de confiabilidade. Nesta situação o reforço é responsável, também, por suportar uma parcela da carga acidental já existente antes do acréscimo de carga e a seção passa a apresentar uma confiabilidade maior do que apresentava antes.

Tabela 5.22 – Taxas geométricas de reforço obtidas para o quinto exemplo, utilizando o tecido unidirecional de fibras de carbono Wabo®MBrace CF-130.

Caso	Δ (%)	Proporções das cargas (%)		ρ_f (%) projeto corrente		Sem fator de modelagem		Com fator de modelagem	
						ρ_f (%) dimensionamento baseado em confiabilidade			
		k_g	k_q	Chen	fib	Chen	fib	Chen	fib
1a	50	50	50	0,1747	0,1327	0,0845	0,0715	0,2284	0,2367
2a		17	83			0,3041	0,3503	0,4780	0,5564
1b	75	43	57	0,4343	0,3335	0,2542	0,2784	0,5099	0,5987
2b		14	86			0,6601	0,7658	0,9718	1,1231

Tabela 5.23 – Taxas geométricas de reforço obtidas para o quinto exemplo, utilizando o tecido unidirecional de fibras de carbono Wabo®MBrace CF-530.

Caso	Δ (%)	Proporções das cargas (%)		ρ_f (%) projeto corrente		Sem fator de modelagem		Com fator de modelagem	
						ρ_f (%) dimensionamento baseado em confiabilidade			
		k_g	k_q	Chen	fib	Chen	fib	Chen	fib
1a	50	50	50	0,1164	0,0813	0,0631	0,0445	0,1325	0,1451
2a		17	83			0,1850	0,2147	0,2969	0,3410
1b	75	43	57	0,3099	0,2044	0,1493	0,1706	0,3151	0,3670
2b		14	86			0,4032	0,4693	0,5979	0,6884

A seguir, são apresentadas tabelas (Tabelas 5.24 e 5.25) com valores dos índices de confiabilidade obtidos para as taxas geométricas de reforço dimensionadas pelo projeto corrente. Verifica-se que, quando os fatores de modelagem não são considerados, os valores dos índices de confiabilidade β_4 obtidos para o Caso 2a e o Caso 2b são menores que $\beta_r = 3,80$. Quando os fatores de modelagem são considerados todos os casos apresentam $\beta_4 < \beta_r$.

Tabela 5.24 – Índices de confiabilidade e probabilidades de falha obtidos para as taxas geométricas de reforço dimensionadas pelo projeto corrente, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130.

Caso	Sem fator de modelagem					Com fator de modelagem				
	β_2	β_3		β_4		β_2	β_3		β_4	
		Chen	<i>fib</i>	Chen	<i>fib</i>		Chen	<i>fib</i>	Chen	<i>fib</i>
1a	6,22	6,74	5,71	4,51	4,20	5,11	5,08	4,48	3,70	3,50
2a	5,04	5,14	4,35	3,41	3,18	4,55	4,46	3,93	3,26	3,09
1b	5,32	8,62	6,41	4,30	3,95	4,56	6,34	4,05	3,67	3,43
2b	4,47	7,12	5,18	3,43	3,15	4,14	4,91	3,63	3,39	3,08

Tabela 5.25 – Índices de confiabilidade e probabilidades de falha obtidos para as taxas geométricas de reforço dimensionadas pelo projeto corrente, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-530.

Caso	Sem fator de modelagem					Com fator de modelagem				
	β_2	β_3		β_4		β_2	β_3		β_4	
		Chen	<i>fib</i>	Chen	<i>fib</i>		Chen	<i>fib</i>	Chen	<i>fib</i>
1a	6,22	5,47	4,53	4,51	4,20	5,11	4,30	3,71	3,70	3,50
2a	5,04	4,14	3,42	3,41	3,18	4,55	3,78	4,05	3,26	3,43
1b	5,32	7,17	4,87	4,48	3,95	4,56	3,78	5,47	3,26	3,79
2b	4,47	7,12	5,18	3,43	3,15	4,14	4,91	3,63	3,39	3,08

Adiante, são apresentadas tabelas com valores dos índices de confiabilidade e suas respectivas probabilidades de falha considerando ou não a formulação de sistemas em série, para as taxas geométricas de reforço obtidas pelo dimensionamento baseado em confiabilidade.

Utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130 (Tabelas 5.26 e 5.28), verifica-se que os valores dos índices de confiabilidade β_2 e β_3 são muito maiores do que os valores de β_4 , portanto os valores de $\beta_{e,série}$ (Tabelas 5.27 e 5.29), considerando a formulação de sistemas em série, assumem valores iguais aos valores de β_4 e o reforço é dimensionado tendo como restrição $\beta_{e,série} = \beta_4 = 3,8$. A seção transversal analisada tende a falhar devido ao descolamento do compósito. No entanto, no Caso 2b o valor do índice de confiabilidade β_2 se aproxima do valor apresentado por β_4 e para que $\beta_{e,série} = 3,8$ é preciso que β_4 assumira valor um pouco maior do que $\beta_r = 3,8$.

No Caso 2b (utilizando formulação de CHEN e TENG (2003 a, b)), quando os fatores de modelagem não são considerados, o índice de

confiabilidade β_4 assume valor maior que $\beta_r = 3,8$, porque a formulação de CHEN e TENG (2003 a, b) apresenta descontinuidade por ser dada em função da espessura do compósito t_f . Para a taxa geométrica de reforço $\rho_f = 0,66\%$ ($t_f = 3 \cdot 0,165 \text{ mm}$ - três camadas de CFRP) $\rightarrow \beta_4 = 3,78$ e para $\rho_f = 0,66001\%$ ($t_f = 4 \cdot 0,165 \text{ mm}$ - quatro camadas de CFRP) $\rightarrow \beta_4 = 3,81$. O índice de confiabilidade $\beta_{e,série}$ assume valor igual a β_4 .

Tabela 5.26 – Índices de confiabilidade e probabilidades de falha do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130, sem considerar os fatores de modelagem.

Caso	β_2	ρ_{f2}	Chen		fib		Chen		fib	
			β_3	ρ_{f3}	β_3	ρ_{f3}	β_4	ρ_{f4}	β_4	ρ_{f4}
1a	6,22	2,55E-10	4,89	4,96E-7	4,75	1,02E-6	3,80	7,23E-5	3,80	7,23E-5
2a	5,04	2,26E-7	6,70	1,05E-11	5,98	1,09E-9				
1b	5,32	5,27E-8	6,72	9,05E-12	6,02	8,65E-10				
2b	4,47	3,97E-6	8,69	-	6,96	1,74E-12	3,81	6,94E-5	3,80	7,22E-5

Tabela 5.27 – Índice de confiabilidade equivalente e probabilidade de falha do quinto exemplo para sistema em série, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130, sem considerar os fatores de modelagem.

Caso	Chen					fib				
	ρ_{23}	ρ_{24}	ρ_{34}	$\beta_{e,série}$	$\rho_{f,série}$	ρ_{23}	ρ_{24}	ρ_{34}	$\beta_{e,série}$	$\rho_{f,série}$
1a	0,89	0,93	0,99	3,800	7,23E-5	0,92	0,94	0,99	3,800	7,23E-5
2a	0,90	0,95	0,98			0,94	0,96	0,99		
1b	0,87	0,94	0,98			0,92	0,94	0,99		
2b	0,88	0,95	0,97	3,810	6,94E-5	0,93	0,96	0,98		

sendo: ρ_{23} – coeficiente de correlação entre os modos de ruptura G_2 e G_3 ; ρ_{24} – coeficiente de correlação entre os modos de ruptura G_2 e G_4 ; ρ_{34} – coeficiente de correlação entre os modos de ruptura G_3 e G_4 .

Tabela 5.28 – Índices de confiabilidade e probabilidades de falha do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130, considerando os fatores de modelagem.

Caso	β_2	ρ_{f2}	Chen		fib		Chen		fib	
			β_3	ρ_{f3}	β_3	ρ_{f3}	β_4	ρ_{f4}	β_4	ρ_{f4}
1a	5,11	1,63E-7	5,59	1,12E-8	5,17	1,14E-7	3,80	7,23E-5	3,80	7,23E-5
2a	4,55	2,67E-6	6,37	9,63E-11	5,63	9,06E-9				
1b	4,56	2,55E-6	6,71	9,72E-12	5,88	2,10E-9				
2b	4,14	1,77E-5	7,54	2,41E-14	6,20	2,72E-10	3,80	7,14E-5	3,80	7,18E-5

Tabela 5.29 – Índice de confiabilidade equivalente e probabilidade de falha do quinto exemplo para sistema em série, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130, considerando os fatores de modelagem.

Caso	Chen					fib				
	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{23}	$\beta_{e,série}$	$\rho_{f,série}$	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{23}	$\beta_{e,série}$	$\rho_{f,série}$
1a	0,94	0,97	0,99	3,800	7,23E-5	0,96	0,97	0,99	3,800	7,23E-5
2a	0,95	0,98	0,99			0,97	0,98	0,99		
1b	0,93	0,97	0,99			0,96	0,97	0,99		
2b	0,94	0,98	0,99			0,96	0,98	0,99		

Quando o tecido Wabo®MBrace CF-530 é utilizado constata-se o mesmo observado anteriormente, para o tecido Wabo®MBrace CF-130, com a diferença de que para o Caso 1a (utilizando formulação do Bulletin 14 *fib* (2001)), quando os fatores de modelagem não são considerados, os valores de β_3 e β_4 são próximos e maiores que 3,8 para que $\beta_{e,série} = 3,8$.

Tabela 5.30 – Índices de confiabilidade e probabilidades de falha do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-530, sem considerar os fatores de modelagem.

Caso	β_2	ρ_{f2}	Chen		fib		Chen		fib	
			β_3	ρ_{f3}	β_3	ρ_{f3}	β_4	ρ_{f4}	β_4	ρ_{f4}
1a	6,22	2,55E-10	4,24	1,12E-5	3,85	5,88E-5	3,80	7,23E-5	3,81	6,97E-5
2a	5,04	2,26E-7	5,13	1,44E-7	4,62	1,92E-6			3,80	7,23E-5
1b	5,32	5,27E-8	4,99	2,98E-7	4,58	2,36E-6			3,80	7,23E-5
2b	4,47	3,97E-6	6,64	1,62E-11	5,26	7,00E-8	3,80	7,22E-5	3,80	7,22E-5

Tabela 5.31 – Índice de confiabilidade equivalente e probabilidade de falha do quinto exemplo para sistema em série, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-530, sem considerar os fatores de modelagem.

Caso	Chen					fib				
	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{23}	$\beta_{e,série}$	$\rho_{f,série}$	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{23}	$\beta_{e,série}$	$\rho_{f,série}$
1a	0,90	0,93	0,99	3,800	7,23E-5	0,92	0,94	1,00	3,800	7,23E-5
2a	0,91	0,95	0,99			0,94	0,96	0,99		
1b	0,89	0,94	0,99			0,92	0,94	0,99		
2b	0,90	0,95	0,97			0,94	0,96	0,99		

Tabela 5.32 – Índices de confiabilidade (β_3 e β_4) e probabilidades de falha do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-530, considerando os fatores de modelagem.

Caso	β_2	ρ_{f2}	Chen		fib		Chen		fib	
			β_3	ρ_{f3}	β_3	ρ_{f3}	β_4	ρ_{f4}	β_4	ρ_{f4}
1a	5,11	1,63E-7	4,50	3,34E-6	4,25	1,05E-5	3,80	7,23E-5	3,80	7,23E-5
2a	4,55	2,67E-6	5,28	6,58E-8	4,62	1,89E-6				
1b	4,56	2,55E-6	5,51	1,81E-8	4,76	9,52E-7				
2b	4,14	1,77E-5	6,26	1,91E-10	5,06	2,04E-7				

Tabela 5.33 – Índice de confiabilidade equivalente e probabilidade de falha do quinto exemplo para sistema em série, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-530, considerando os fatores de modelagem.

Caso	Chen					fib				
	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{23}	$\beta_{e,série}$	$\rho_{f,série}$	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{23}	$\beta_{e,série}$	$\rho_{f,série}$
1a	0,95	0,97	0,99	3,800	7,23E-5	0,96	0,97	1,00	3,800	7,23E-5
2a	0,95	0,98	0,99			0,97	0,98	1,00		
1b	0,94	0,97	0,99			0,96	0,98	0,99		
2b	0,94	0,98	0,99			0,97	0,98	0,99		

Nas figuras a seguir (Figuras 5.6 e 5.7) são apresentados gráficos que relacionam valores de taxa geométrica de reforço com os valores dos índices de confiabilidade (β_2 , β_3 , β_4 e β_r) para o Caso 2a, quando os fatores de modelagem são considerados.

Os valores de taxa geométrica de reforço variam do valor mínimo, definido pelo espaçamento máximo permitido, para o valor máximo, definido pelo número máximo de camadas de reforço recomendado.

Para este exemplo $s_{f,max} = 270\text{ mm}$ (entre eixos de estribos de CFRP). Adotando largura dos estribos de CFRP igual a 50 mm o valor mínimo da taxa geométrica de reforço é $\rho_{f,min} = 0,041\%$. O valor máximo é $\rho_{f,max} = 1,1\%$, considerando a utilização de cinco camadas de reforço com $w_f = s_f$.

As figuras indicam que a seção analisada neste exemplo tende sempre a falhar devido ao descolamento do reforço, independente da taxa geométrica de reforço utilizada e que enquanto o valor de β_3 aumenta consideravelmente com o aumento da taxa de reforço, o valor de β_4 tende a ficar constante.

O valor do índice de confiabilidade β_3 é referente a função de estado que avalia a tração diagonal, devido à ruptura à tração do reforço, portanto quanto maior a área de compósito utilizada maior é o valor da resistência alcançada pelo reforço, tornando maior o valor de β_3 .

O valor do índice de confiabilidade β_4 é referente a função de estado que avalia a tração diagonal, devido ao descolamento do reforço, neste caso, quanto mais espessa a camada de reforço maior é a propensão do mesmo descolar e com isso a resistência atingida pelo reforço tende a ficar constante, assim como o valor de β_4 .

A partir das Figuras 5.6 e 5.7 verifica-se que quando as equações propostas pelo modelo de CHEN e TENG (2003 a, b) são utilizadas nas funções de estado obtém-se valores maiores de β_3 e β_4 do que quando são utilizadas as equações propostas pelas prescrições do Bulletin 14 *fib* (2001), a não ser quando $\rho_f \leq 0,10\%$.

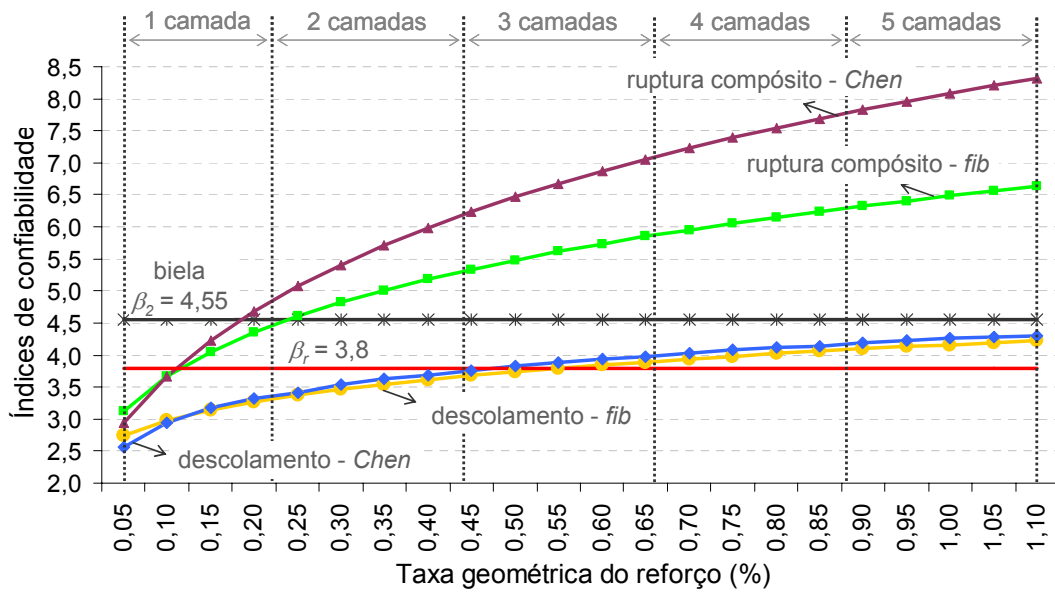


Figura 5.6 – Gráfico taxa geométrica do reforço x índices de confiabilidade para o Caso 2a do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-130, considerando os fatores de modelagem.

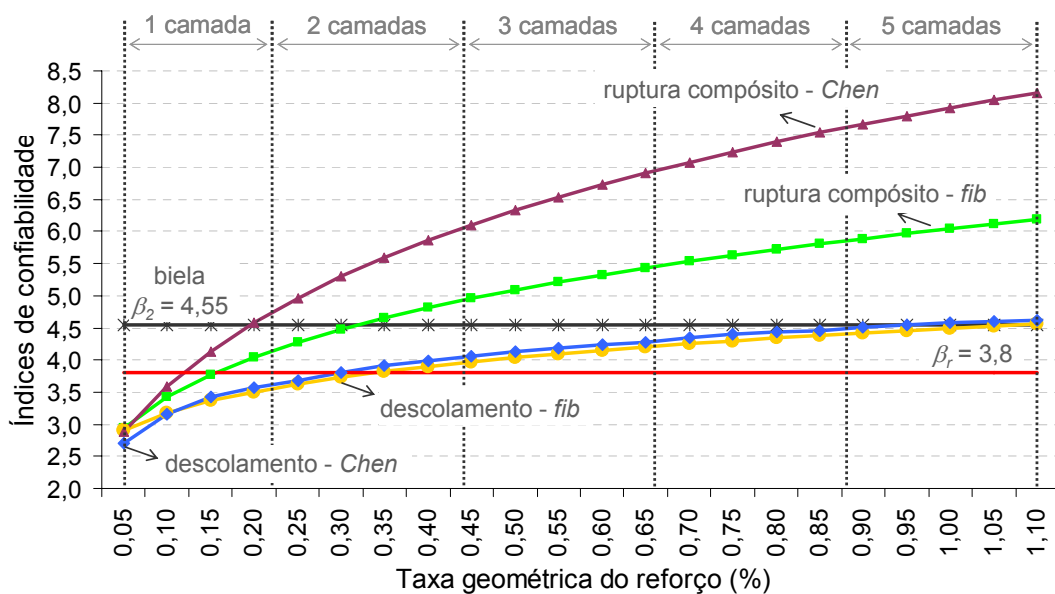


Figura 5.7 – Gráfico taxa geométrica do reforço x índices de confiabilidade para o Caso 2a do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-530, considerando os fatores de modelagem.

Nas figuras a seguir (Figuras 5.8 e 5.9) são apresentados gráficos que relacionam valores de taxa geométrica de reforço com os valores dos índices de confiabilidade (β_4 e β_r) para o Caso 1b, sem considerar os fatores de modelagem e, também, considerando.

Os gráficos ilustram a necessidade de acréscimo de taxa geométrica de reforço quando os fatores de modelagem são considerados para $\beta_4 \geq \beta_r = 3,8$.

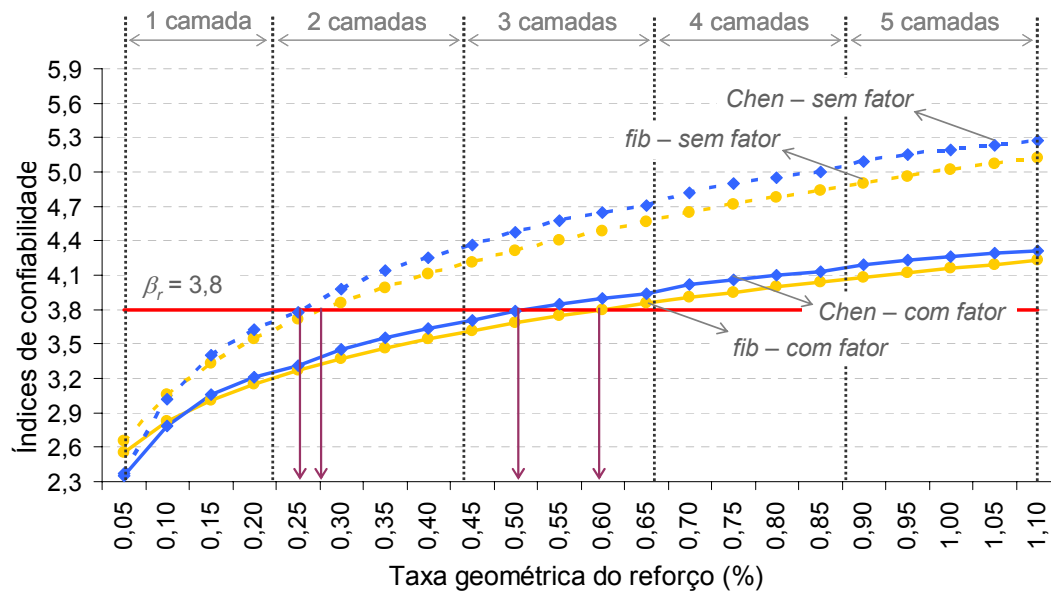


Figura 5.8 – Gráfico taxa geométrica do reforço x índice de confiabilidade β_4 para o Caso 1b do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-130.

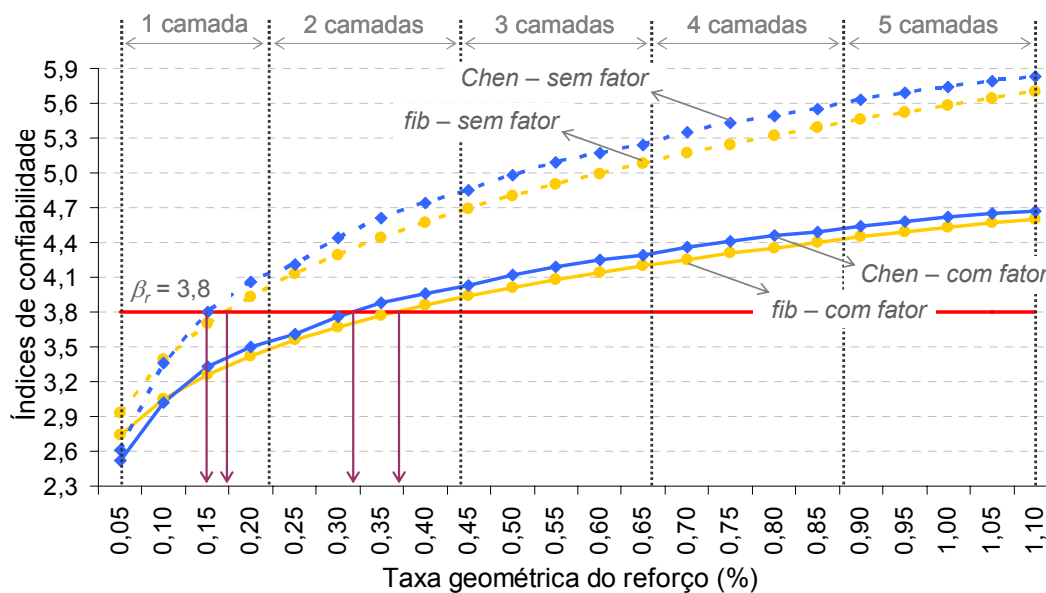


Figura 5.9 – Gráfico taxa geométrica do reforço x índice de confiabilidade β_4 para o Caso 1b do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-530.

As equações propostas por CHEN e TENG (2003 a, b) para calcular $V_{f,d}$, apresentadas no item 4.2.4.2, são dadas em função da espessura do reforço t_f . Quando mais de uma camada de CFRP é utilizada o valor de t_f é multiplicado

peelo número de camadas. Portanto, o índice de confiabilidade β_4 avaliado pela função de estado G_4 varia de acordo com o número de camadas de CFRP.

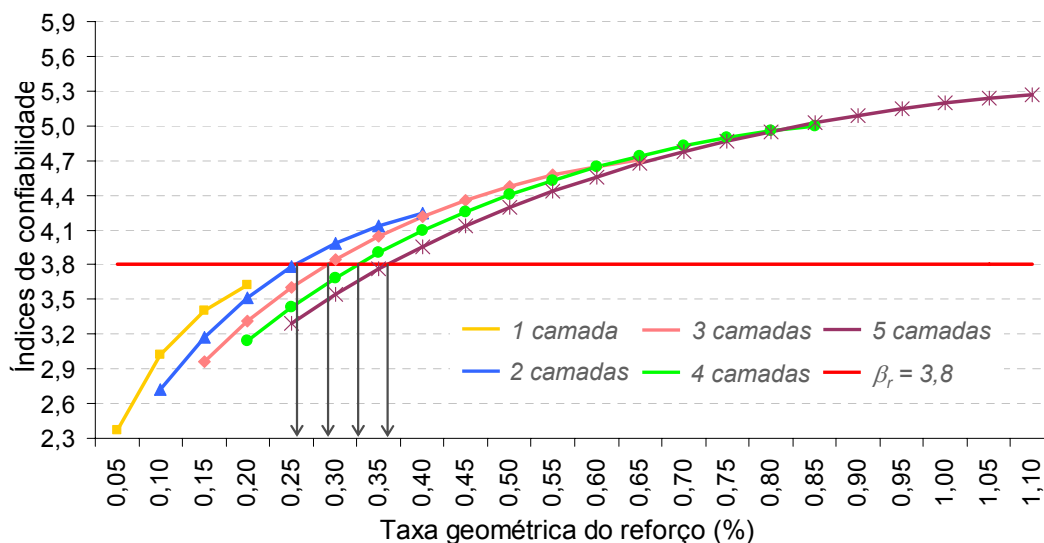


Figura 5.10 – Gráfico taxa geométrica do reforço x índice de confiabilidade β_4 , variando a quantidade de camadas de reforço, para o Caso 1b do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130, sem considerar os fatores de modelagem.

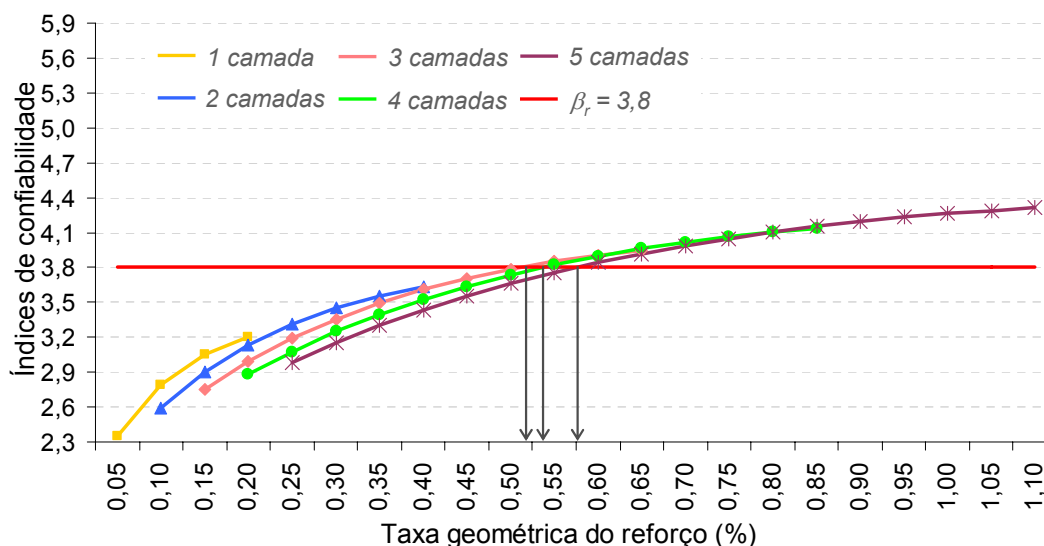


Figura 5.11 – Gráfico taxa geométrica do reforço x índice de confiabilidade β_4 , variando a quantidade de camadas de reforço, para o Caso 1b do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130, considerando os fatores de modelagem.

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.10 a 5.13 mostram que o valor de β_4 diminui para a mesma taxa geométrica de reforço quando a quantidade

de camadas aumenta. Pode-se afirmar que é mais apropriado adotar sempre o menor número de camadas possível.

Estes gráficos indicam os valores de ρ_f necessários para $\beta_4 \geq \beta_r$ de acordo com o número de camadas utilizadas.

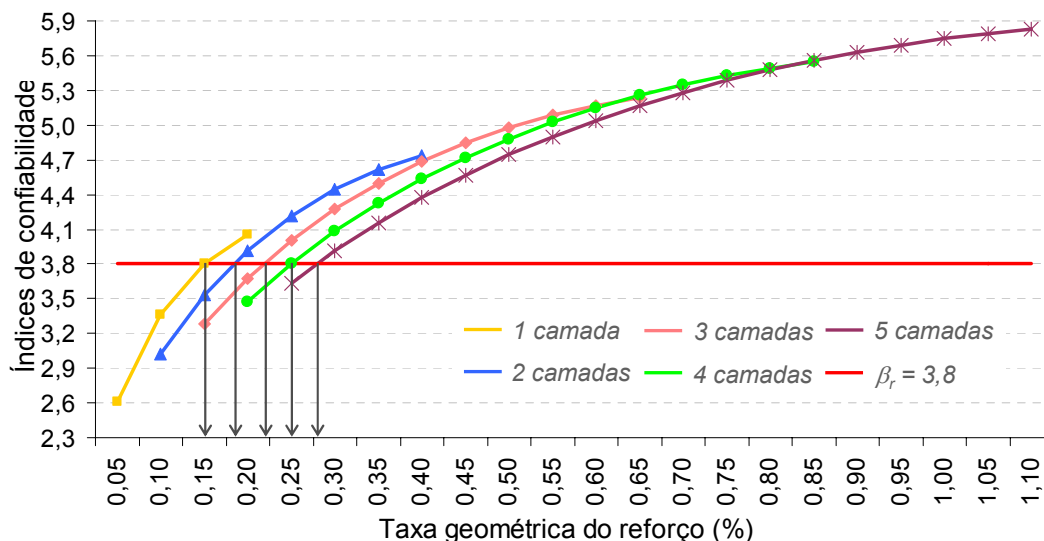


Figura 5.12 – Gráfico taxa geométrica do reforço x índice de confiabilidade β_4 , variando a quantidade de camadas de reforço, para o Caso 1b do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-530, sem considerar os fatores de modelagem.

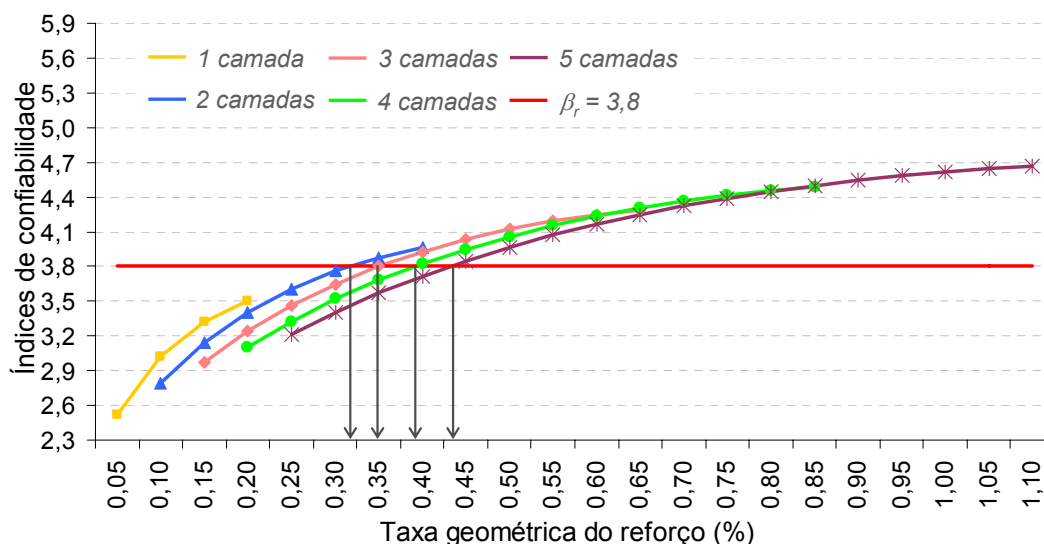


Figura 5.13 – Gráfico taxa geométrica do reforço x índice de confiabilidade β_4 , variando a quantidade de camadas de reforço, para o Caso 1b do quinto exemplo, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-530, considerando os fatores de modelagem.

No reforço à força cortante o compósito não deve se deformar muito, então utilizando um material que apresenta alto módulo de elasticidade

consegue-se chegar a resistências maiores com menores quantidades de reforço e com o mesmo valor de deformação específica efetiva obtido para um material que apresenta alta resistência, e conseqüentemente maior valor de deformação específica última. A Tabela 5.34 apresenta os valores da deformação específica efetiva para os dois materiais de reforço e para cada situação analisada.

Tabela 5.34 – Deformação específica efetiva do reforço.

Caso	Deformação Específica Efetiva (‰)							
	Wabo®MBrace CF-130 $\varepsilon_{fu} = 16,6\%$				Wabo®MBrace CF-530 $\varepsilon_{fu} = 9,4\%$			
	Sem fator		Com fator		Sem fator		Com fator	
	Chen	<i>fib</i>	Chen	<i>fib</i>	Chen	<i>fib</i>	Chen	<i>fib</i>
1a	4,9	5,8	3,1	3,0	4,0	5,7	3,3	3,0
2a	2,8	2,4	2,2	1,9	2,8	2,4	2,2	1,9
1b	3,0	2,7	2,1	1,8	3,1	2,7	2,1	1,8
2b	1,8	1,5	1,5	1,3	1,8	1,5	1,5	1,3

A Tabela 5.35 fornece a quantidade de camadas de compósito necessária para atender os valores de taxas geométricas de reforço apresentados nas Tabelas 5.22 e 5.23, sendo $t_f = 0,165\text{ mm}$.

Utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-530 realiza-se o reforço necessário com uma quantidade menor de camadas, o que torna o reforço mais eficiente.

As prescrições do Bulletin 14 *fib* (2001) recomendam que não se utilizem mais de cinco camadas de reforço, assim, considerando os fatores de modelagem, para o Caso 2b, deve-se optar por utilizar o tecido CF-530.

Tabela 5.35 – Número de camadas de compósito necessárias para o reforço.

Caso	Nº de camadas de compósito necessária para o reforço							
	Wabo®MBrace CF-130				Wabo®MBrace CF-530			
	Sem fator		Com fator		Sem fator		Com fator	
	Chen	<i>fib</i>	Chen	<i>fib</i>	Chen	<i>fib</i>	Chen	<i>fib</i>
1a	1	1	2	2	1	1	1	1
2a	2	2	3	3	1	1	2	2
1b	2	2	3	3	1	1	2	2
2b	4	4	5	6	2	3	3	4

Quanto aos fatores de importância das variáveis aleatórias observa-se, para as situações onde os fatores de modelagem não são considerados (Tabelas 5.36 e 5.38), que na função de estado que avalia o esmagamento das bielas G_2 , a variável aleatória f_c influencia bem menos para a seção reforçada, enquanto V_q influencia mais, pois a carga acidental foi acrescida e o valor da resistência do concreto continuou o mesmo.

Nas funções de estado que avaliam a tração diagonal, devido à ruptura do reforço G_3 ou devido ao descolamento do reforço G_4 , somente o fator de importância de V_q é significativo.

Estas funções de estado (G_3 e G_4) dependem do modelo, ou prescrição, adotados para efetuar o cálculo da parcela de força cortante V_f resistida pelo reforço, conforme já mencionado no item 4.2.4.2. Os valores obtidos para os fatores de importância das variáveis aleatórias permitem avaliar se o modelo proposto por CHEN e TENG (2003 a, b) e as prescrições do Bulletin 14 *fib* (2001) tratam as variáveis aleatórias da mesma forma.

Na função de estado que avalia a tração diagonal devido à ruptura do reforço G_3 , observa-se que as variáveis aleatórias f_c e f_f têm influências diferentes, no modelo proposto por CHEN e TENG (2003 a, b) e nas prescrições do Bulletin 14 *fib* (2001). Enquanto o modelo proposto por CHEN e TENG (2003 a, b) dá importância maior à variável f_f do que à variável f_c , nas prescrições do Bulletin 14 *fib* (2001) ocorre o contrário. A importância da variável aleatória f_f aumenta de acordo com o aumento da taxa geométrica de reforço utilizada.

A função G_3 avalia a tração diagonal devido à ruptura do reforço, portanto é mais coerente que a variável aleatória da resistência à tração do compósito f_f tenha importância maior do que f_c , como propõe o modelo proposto por CHEN e TENG (2003 a, b).

Tabela 5.36 – Fatores de importância das variáveis aleatórias do quinto exemplo para os modos de falha, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130, sem considerar os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Fatores de Importância (%)				
			f_c	f_{yw}	f_f	V_g	V_q
1a	β_2	-	31,09	-	-	0,64	68,27
	β_3	Chen	1,76	0,50	0,58	1,02	96,14
		<i>fib</i>	3,67	0,53	0,52	1,07	94,21
	β_4	Chen	4,75	0,79	-	1,60	92,86
		<i>fib</i>	5,68	0,79	-	1,60	91,93
	2a	β_2	-	21,96	-	-	0,04
β_3		Chen	0,37	0,10	2,28	0,02	97,23
		<i>fib</i>	2,23	0,13	1,43	0,03	96,18
β_4		Chen	2,83	0,29	-	0,06	96,82
		<i>fib</i>	3,69	0,29	-	0,06	95,96
1b		β_2	-	27,76	-	-	0,48
	β_3	Chen	0,56	0,16	2,60	0,31	96,37
		<i>fib</i>	2,84	0,19	1,66	0,39	94,92
	β_4	Chen	4,00	0,45	-	0,90	94,65
		<i>fib</i>	5,12	0,45	-	0,90	93,53
	2b	β_2	-	20,68	-	-	0,03
β_3		Chen	0,13	0,04	4,90	0,01	94,92
		<i>fib</i>	2,22	0,07	3,08	0,01	94,62
β_4		Chen	2,77	0,20	-	0,05	96,98
		<i>fib</i>	3,68	0,20	-	0,04	96,08

Na função de estado que avalia a tração diagonal devido ao descolamento do reforço G_4 , observa-se que apesar das formulações apresentadas no modelo proposto por CHEN e TENG (2003 a, b) e nas prescrições do Bulletin 14 *fib* (2001) serem muito diferentes, elas dão importâncias semelhantes às variáveis que foram consideradas como aleatórias.

Quando os fatores de modelagem são considerados, os fatores de importância das demais variáveis aleatórias diminuem (Tabelas 5.37 e 5.39). A variável aleatória V_q é a que mais reduz sua importância.

Tabela 5.37 – Fatores de importância das variáveis aleatórias do quinto exemplo para os modos de falha, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130, considerando os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Fatores de Importância (%)						
			f_c	f_{yw}	f_f	V_g	V_q	ϕ_R	ϕ_S
1a	β_2	-	14,23	-	-	0,82	29,73	47,43	7,79
		β_3	Chen	0,24	0,07	0,56	0,73	36,46	53,21
	<i>fib</i>		1,23	0,09	0,47	0,83	35,18	53,43	8,77
	β_4	Chen	2,02	0,23	-	1,30	29,73	57,31	9,41
		<i>fib</i>	2,58	0,23	-	1,30	29,51	57,02	9,36
	2a	β_2	-	11,18	-	-	0,04	45,03	37,58
β_3			Chen	0,07	0,02	0,73	0,02	48,45	43,56
		<i>fib</i>	0,85	0,03	0,56	0,03	49,23	42,35	6,95
β_4		Chen	1,46	0,12	-	0,06	49,50	41,97	6,89
		<i>fib</i>	1,93	0,12	-	0,06	49,25	41,78	6,86
1b		β_2	-	13,52	-	-	0,57	33,17	45,30
	β_3		Chen	0,07	0,02	0,92	0,30	40,85	49,69
		<i>fib</i>	0,98	0,03	0,71	0,38	40,49	49,32	8,09
	β_4	Chen	1,82	0,15	-	0,77	35,78	52,81	8,67
		<i>fib</i>	2,43	0,15	-	0,76	35,51	52,53	8,62
	2b	β_2	-	11,04	-	-	0,03	45,58	37,24
β_3			Chen	0,02	0,01	1,11	0,01	46,58	44,90
		<i>fib</i>	0,78	0,01	0,75	0,02	48,83	42,62	6,99
β_4		Chen	1,44	0,08	-	0,04	50,34	41,32	6,78
		<i>fib</i>	1,93	0,09	-	0,04	50,08	41,11	6,75

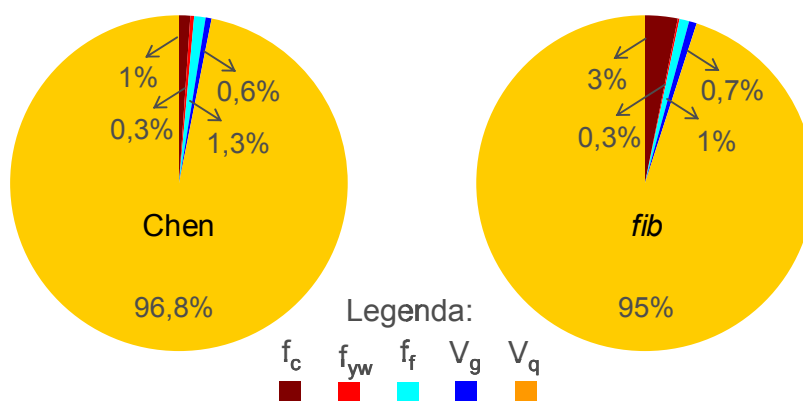


Figura 5.14 – Gráfico representando a importância de cada variável aleatória para o modo de falha avaliado em G_3 , para o Caso 1b apresentado na Tabela 5.38.

Tabela 5.38 – Fatores de importância das variáveis aleatórias do quinto exemplo para os modos de falha, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-530, sem considerar os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Fatores de Importância (%)				
			f_c	f_{yw}	f_f	V_g	V_q
1a	β_2	-	31,09	-	-	0,64	68,27
	β_3	Chen	2,29	0,65	0,45	1,32	95,29
		<i>fib</i>	4,17	0,77	0,30	1,57	93,19
	β_4	Chen	4,79	0,79	-	1,60	92,82
		<i>fib</i>	5,67	0,79	-	1,59	91,95
2a	β_2	-	21,96	-	-	0,04	78,00
	β_3	Chen	0,61	0,17	1,16	0,04	98,02
		<i>fib</i>	2,17	0,20	0,82	0,05	96,76
	β_4	Chen	2,82	0,29	-	0,06	96,83
		<i>fib</i>	3,69	0,29	-	0,06	95,96
1b	β_2	-	27,76	-	-	0,48	71,76
	β_3	Chen	0,98	0,27	1,25	0,55	96,95
		<i>fib</i>	2,97	0,32	0,95	0,65	95,11
	β_4	Chen	3,98	0,45	-	0,90	94,67
		<i>fib</i>	5,12	0,45	-	0,90	93,53
2b	β_2	-	20,68	-	-	0,03	79,29
	β_3	Chen	0,26	0,07	3,79	0,02	95,86
		<i>fib</i>	2,00	0,11	1,55	0,02	96,32
	β_4	Chen	2,75	0,20	-	0,04	97,01
		<i>fib</i>	3,68	0,20	-	0,04	96,08

O fator de modelagem ϕ_R é a variável aleatória que apresenta maior fator de importância nos Casos 1a e 1b, onde 75% da carga total é de natureza permanente. Nos Casos 2a e 2b, onde 75% da carga total é de natureza acidental, V_q continua apresentando fator de importância maior, porém a importância de ϕ_R , nestes casos, é bem próxima da importância apresentada por V_q .

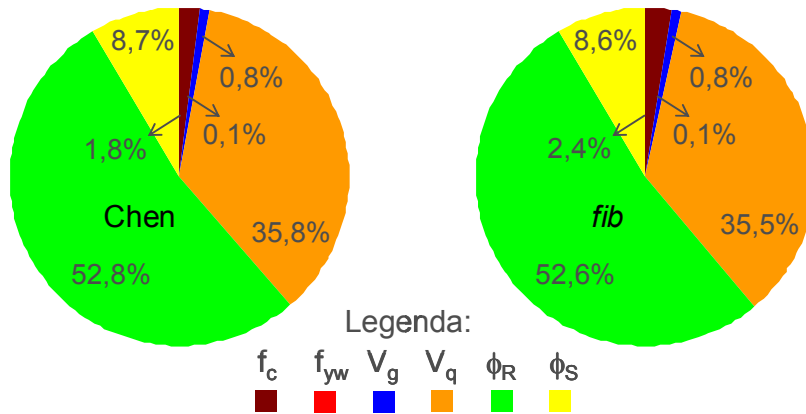


Figura 5.15 – Gráfico representando a importância de cada variável aleatória para o modo de falha avaliado em G_4 , para o Caso 1b apresentado na Tabela 5.39.

Tabela 5.39 – Fatores de importância das variáveis aleatórias do quinto exemplo para os modos de falha, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-530, considerando os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Fatores de Importância (%)						
			f_c	f_{yw}	f_f	V_g	V_q	ϕ_R	ϕ_S
1a	β_2	-	14,23	-	-	0,82	29,73	47,43	7,79
	β_3	Chen	0,52	0,14	0,42	1,03	33,37	55,42	9,10
		fib	1,49	0,17	0,35	1,12	31,98	55,74	9,15
	β_4	Chen	2,01	0,23	-	1,30	29,74	57,31	9,41
		fib	2,58	0,23	-	1,30	29,51	57,02	9,36
2a	β_2	-	11,18	-	-	0,04	45,03	37,58	6,17
	β_3	Chen	0,15	0,04	0,64	0,03	49,90	42,30	6,94
		fib	0,96	0,06	0,47	0,04	49,96	41,67	6,84
	β_4	Chen	1,46	0,12	-	0,06	49,49	41,98	6,89
		fib	1,93	0,12	-	0,06	49,25	41,78	6,86
1b	β_2	-	13,52	-	-	0,57	33,17	45,30	7,44
	β_3	Chen	0,16	0,04	0,83	0,42	40,51	49,86	8,18
		fib	1,14	0,07	0,61	0,54	38,98	50,39	8,27
	β_4	Chen	1,83	0,15	-	0,77	35,78	52,80	8,67
		fib	2,43	0,15	-	0,76	35,51	52,53	8,62
2b	β_2	-	11,04	-	-	0,03	45,58	37,24	6,11
	β_3	Chen	0,05	0,01	1,04	0,02	48,94	42,90	7,04
		fib	0,84	0,03	0,67	0,02	50,32	41,34	6,78
	β_4	Chen	1,44	0,08	-	0,04	50,34	41,32	6,78
		fib	1,93	0,09	-	0,04	50,08	41,11	6,75

A variável aleatória ϕ_R tem importância significativa devido aos valores elevados de seu coeficiente de variação ($CoV = 25\%$) e de sua média ($\mu_{\phi_R} = 1,4$). A variável aleatória ϕ_S apresenta importância significativa, porém bem menor do que a apresentada por ϕ_R , devido aos valores de seu coeficiente de variação ($CoV = 10\%$) e de sua média ($\mu_{\phi_R} = 1,0$) serem menores.

As tabelas, a seguir, apresentam as coordenadas do ponto de projeto obtido para cada situação analisada. Verifica-se que, quando os fatores de modelagem não são considerados (Tabelas 5.41 e 5.43), a variável aleatória f_c assume valores menores do que seu valor característico (Tabela 5.40) nos pontos de projeto obtidos para a função de estado que avalia o esmagamento das bielas G_2 . Nos pontos de projeto obtidos para as demais funções de estado (G_3 e G_4) ocorre o contrário, $f_c > 20\text{ MPa}$.

Quando os fatores de modelagem são considerados (Tabelas 5.42 e 5.44), f_c só assume valor menor do que seu valor característico no ponto de projeto obtido para o Caso 1a para a função de estado que avalia o esmagamento das bielas G_2 .

As variáveis aleatórias f_{yw} , f_f , V_g e V_q assumem valores maiores do que seus valores característicos nos pontos de projeto obtidos para todas as situações analisadas. Estas variáveis aleatórias têm seus valores mais próximos dos valores característicos quando o ponto de projeto é obtido para a função de estado G_4 que é o modo de falha que comanda o dimensionamento de ρ_f .

A variável aleatória ϕ_R (Tabelas 5.42 e 5.44) assume sempre valores bem menores do que seu valor característico, sendo que para a função de estado G_4 o valor obtido no ponto de projeto para ϕ_R é um pouco maior do que os valores obtidos para as demais funções de estado.

A variável aleatória ϕ_S assume em todas as situações valores maiores do que seu valor característico, sendo que para a função de estado G_4 o valor obtido no ponto de projeto para ϕ_S é um pouco menor do que os valores obtidos para as demais funções de estado.

Tabela 5.40 – Valores característicos das variáveis aleatórias no quinto exemplo.

Caso	Valores característicos das variáveis aleatórias						
	f_c (MPa)	f_{yw} (MPa)	f_f (MPa)	V_g (kN)	V_q (kN)	ϕ_R	ϕ_S
1a	20	500	3790	71,18	71,18	1,4	1,0
2a			(CF130)	23,73	118,63		
1b			3517	71,18	94,91		
2b			(CF530)	23,73	142,36		

Tabela 5.41 – Coordenadas do ponto de projeto do quinto exemplo para os modos de falha, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130, sem considerar os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Coordenadas do Ponto de Projeto				
			f_c (MPa)	f_{yw} (MPa)	f_f (MPa)	V_g (kN)	V_q (kN)
1a	β_2	-	15,7	-	-	74,71	282,09
	β_3	Chen	23,9	549	4242	74,69	257,92
		fib	23,0	549	4247	74,68	245,20
	β_4	Chen	23,2	549	-	74,60	187,83
		fib	23,0	549	-	74,60	186,85
2a	β_2	-	18,5	-	-	23,96	391,74
	β_3	Chen	24,8	553	4132	23,96	675,28
		fib	23,0	553	4186	23,96	566,25
	β_4	Chen	23,9	553	-	23,96	320,10
		fib	23,6	553	-	23,96	318,58
1b	β_2	-	17,3	-	-	73,80	317,54
	β_3	Chen	24,4	551	4117	73,86	539,23
		fib	22,6	551	4175	73,84	453,84
	β_4	Chen	23,5	552	-	73,75	252,99
		fib	23,1	552	-	73,75	251,41
2b	β_2	-	19,4	-	-	23,92	411,20
	β_3	Chen	25,2	555	4046	23,97	1108,05
		fib	22,5	554	4090	23,92	840,97
	β_4	Chen	24,0	554	-	23,94	378,88
		fib	23,6	554	-	23,92	382,57

Tabela 5.42 – Coordenadas do ponto de projeto do quinto exemplo para os modos de falha, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-130, considerando os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Coordenadas do Ponto de Projeto						
			f_c (MPa)	f_{yw} (MPa)	f_f (MPa)	V_g (kN)	V_q (kN)	ϕ_R	ϕ_S
1a	β_2	-	19,7	-	-	74,47	145,32	0,57	1,15
	β_3	Chen	25,2	555	4235	74,58	172,81	0,50	1,17
		fib	24,1	555	4245	74,54	157,89	0,53	1,16
	β_4	Chen	24,2	554	-	74,29	117,62	0,67	1,12
		fib	24,0	554	-	74,28	117,35	0,67	1,12
2a	β_2	-	21,0	-	-	23,95	262,21	0,68	1,11
	β_3	Chen	25,6	557	4215	23,96	389,12	0,48	1,18
		fib	24,3	556	4235	23,96	339,95	0,55	1,15
	β_4	Chen	24,6	555	-	23,94	234,38	0,74	1,10
		fib	24,3	555	-	23,94	233,91	0,74	1,10
1b	β_2	-	20,5	-	-	73,62	184,94	0,64	1,13
	β_3	Chen	25,6	556	4198	73,79	299,20	0,42	1,20
		fib	24,1	556	4223	73,76	256,06	0,49	1,18
	β_4	Chen	24,4	555	-	73,55	166,65	0,69	1,11
		fib	24,1	555	-	73,55	166,23	0,69	1,11
2b	β_2	-	21,4	-	-	23,91	291,26	0,73	1,10
	β_3	Chen	25,9	558	4172	23,92	565,21	0,39	1,22
		fib	24,2	557	4216	23,92	454,80	0,50	1,17
	β_4	Chen	24,6	556	-	23,91	283,32	0,74	1,10
		fib	24,3	556	-	23,91	282,67	0,74	1,10

Tabela 5.43 – Coordenadas do ponto de projeto do quinto exemplo para os modos de falha, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-530, sem considerar os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Coordenadas do Ponto de Projeto				
			f_c (MPa)	f_{yw} (MPa)	f_f (MPa)	V_g (kN)	V_q (kN)
1a	β_2	-	15,7	-	-	74,71	282,09
	β_3	Chen	23,9	549	4006	74,65	215,16
		<i>fib</i>	23,4	549	4018	74,61	190,89
	β_4	Chen	23,2	549	-	74,60	187,79
		<i>fib</i>	23,0	549	-	74,60	187,34
	2a	β_2	-	18,5	-	-	23,96
β_3		Chen	24,8	553	3961	23,96	463,32
		<i>fib</i>	23,8	553	3985	23,96	401,28
β_4		Chen	23,9	553	-	23,96	320,13
		<i>fib</i>	23,6	553	-	23,96	318,58
1b		β_2	-	17,3	-	-	73,80
	β_3	Chen	24,4	551	3960	73,82	354,86
		<i>fib</i>	23,4	551	3980	73,80	314,01
	β_4	Chen	23,5	552	-	73,75	253,03
		<i>fib</i>	23,1	552	-	73,75	251,41
	2b	β_2	-	19,41	-	-	23,92
β_3		Chen	25,00	554	3815	23,92	790,24
		<i>fib</i>	23,53	554	3943	23,92	568,91
β_4		Chen	23,94	554	-	23,92	384,56
		<i>fib</i>	23,59	554	-	23,92	382,57

Tabela 5.44 – Coordenadas do ponto de projeto do quinto exemplo para os modos de falha, utilizando o tecido Wabo®MBrace CF-530, considerando os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Coordenadas do Ponto de Projeto						
			f_c (MPa)	f_{yw} (MPa)	f_f (MPa)	V_g (kN)	V_q (kN)	ϕ_R	ϕ_S
1a	β_2	-	19,7	-	-	74,47	145,32	0,57	1,15
	β_3	Chen	25,1	554	4005	74,44	137,58	0,59	1,14
		fib	24,3	554	4012	74,39	129,86	0,62	1,13
	β_4	Chen	24,3	554	-	74,29	117,62	0,67	1,12
		fib	24,0	554	-	74,28	117,35	0,67	1,12
2a	β_2	-	21,0	-	-	23,95	262,21	0,68	1,11
	β_3	Chen	25,5	556	3984	23,96	319,02	0,58	1,14
		fib	24,6	556	4002	23,95	279,16	0,65	1,12
	β_4	Chen	24,6	555	-	23,94	234,37	0,74	1,10
		fib	24,3	555	-	23,94	233,91	0,74	1,10
1b	β_2	-	20,5	-	-	73,62	184,94	0,64	1,13
	β_3	Chen	25,4	556	3970	73,74	239,37	0,52	1,16
		fib	24,4	555	3992	73,68	204,82	0,59	1,14
	β_4	Chen	24,4	555	-	73,55	166,65	0,69	1,11
		fib	24,1	555	-	73,55	166,23	0,69	1,11
2b	β_2	-	21,4	-	-	23,91	291,26	0,73	1,10
	β_3	Chen	25,7	557	3946	23,92	460,29	0,50	1,17
		fib	24,5	556	3985	23,92	368,27	0,61	1,13
	β_4	Chen	24,6	556	-	23,91	283,32	0,74	1,10
		fib	24,3	556	-	23,91	282,67	0,74	1,10

A seguir são apresentadas tabelas com valores dos fatores parciais de segurança para as variáveis consideradas como aleatórias.

Os fatores parciais de segurança são calculados para o modo de falha que comanda o dimensionamento da taxa geométrica de reforço. Em todas as situações analisadas G_4 é a função de estado que avalia o modo de falha que apresenta maior probabilidade de falha e menor índice de confiabilidade. A variável aleatória f_f não é considerada nesta função de falha.

Tabela 5.45 – Fatores parciais de segurança do quinto exemplo para o modo de falha preponderante, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-130, sem considerar os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Fatores Parciais de Segurança				
			f_{ck}/f_c^*	f_{ywk}/f_{yw}^*	f_f/f_f^*	V_g^*/V_{gk}	V_q^*/V_{qk}
1a	β_4	Chen	0,86	0,91	-	1,05	2,64
		<i>fib</i>	0,87	0,91	-	1,05	2,62
2a		Chen	0,84	0,90	-	1,01	2,70
		<i>fib</i>	0,85	0,90	-	1,01	2,68
1b		Chen	0,85	0,91	-	1,04	2,66
		<i>fib</i>	0,86	0,91	-	1,04	2,65
2b		Chen	0,83	0,90	-	1,01	2,66
		<i>fib</i>	0,85	0,90	-	1,01	2,69

Tabela 5.46 – Fatores parciais de segurança do quinto exemplo para o modo de falha preponderante, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-130, considerando os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Fatores Parciais de Segurança						
			f_{ck}/f_c^*	f_{ywk}/f_{yw}^*	f_f/f_f^*	V_g^*/V_{gk}	V_q^*/V_{qk}	ϕ_{Rk}/ϕ_R^*	ϕ_S^*/ϕ_{Sk}
1a	β_4	Chen	0,82	0,90	-	1,04	1,65	2,10	1,12
		<i>fib</i>	0,83	0,90	-	1,04	1,65	2,09	1,12
2a		Chen	0,81	0,90	-	1,01	1,98	1,89	1,10
		<i>fib</i>	0,82	0,90	-	1,01	1,97	1,89	1,10
1b		Chen	0,82	0,90	-	1,03	1,76	2,03	1,11
		<i>fib</i>	0,83	0,90	-	1,03	1,75	2,03	1,11
2b		Chen	0,81	0,90	-	1,01	1,99	1,88	1,10
		<i>fib</i>	0,82	0,90	-	1,01	1,98	1,88	1,10

Os valores apresentados nas Tabelas 5.45 a 5.48 indicam que, para dimensionar o reforço pelo enfoque semi-probabilístico tendo como requisito o valor do índice de confiabilidade de referência $\beta_r = 3,8$, devem ser considerados no projeto estrutural os seguintes valores de projeto para as resistências, as solicitações e os fatores de modelagem:

- valor de projeto para a resistência à compressão do concreto maior do que seu valor característico, em torno de 18% quando não são considerados os fatores de modelagem e 22% quando são considerados;

Tabela 5.47 – Fatores parciais de segurança do quinto exemplo para o modo de falha preponderante, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-530, sem considerar os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Fatores Parciais de Segurança				
			f_{ck}/f_c^*	f_{ywk}/f_{yw}^*	f_f/f_f^*	V_g^*/V_{gk}	V_q^*/V_{qk}
1a	β_4	Chen	0,86	0,91	-	1,05	2,64
		<i>fib</i>	0,87	0,91	-	1,05	2,63
2a		Chen	0,84	0,90	-	1,01	2,70
		<i>fib</i>	0,85	0,90	-	1,01	2,68
1b		Chen	0,85	0,91	-	1,04	2,67
		<i>fib</i>	0,86	0,91	-	1,04	2,65
2b		Chen	0,84	0,90	-	1,01	2,70
		<i>fib</i>	0,85	0,90	-	1,01	2,69

Tabela 5.48 – Fatores parciais de segurança do quinto exemplo para o modo de falha preponderante, utilizando o tecido Wabo@MBrace CF-530, considerando os fatores de modelagem.

Caso	Índice	Modelo	Fatores Parciais de Segurança						
			f_{ck}/f_c^*	f_{ywk}/f_{yw}^*	f_f/f_f^*	V_g^*/V_{gk}	V_q^*/V_{qk}	ϕ_{Rk}/ϕ_R^*	ϕ_S^*/ϕ_{Sk}
1a	β_4	Chen	0,82	0,90	-	1,04	1,65	2,10	1,12
		<i>fib</i>	0,83	0,90	-	1,04	1,65	2,09	1,12
2a		Chen	0,81	0,90	-	1,01	1,98	1,89	1,10
		<i>fib</i>	0,82	0,90	-	1,01	1,97	1,89	1,10
1b		Chen	0,82	0,90	-	1,03	1,76	2,03	1,11
		<i>fib</i>	0,83	0,90	-	1,03	1,75	2,03	1,11
2b		Chen	0,81	0,90	-	1,01	1,99	1,88	1,10
		<i>fib</i>	0,82	0,90	-	1,01	1,98	1,88	1,10

- valor de projeto para a resistência à tração do aço um pouco maior do que seu valor característico, em torno de 10%, para todas as situações analisadas;
- valor de projeto para as ações permanentes aproximadamente igual ao valor característico, para todas as situações analisadas;
- valor de projeto para as ações acidentais bem maior do que seu valor característico, em torno de 2,6 vezes, quando não são considerados os fatores de modelagem, e em torno de 1,8 vezes, quando são considerados;
- valor de projeto para o fator de modelagem da resistência aproximadamente 50% menor do que seu valor característico;
- valor de projeto para o fator de modelagem da solicitação aproximadamente 10% maior do que seu valor característico.

5.7. Sexto Exemplo

Este exemplo tem como objetivo analisar a influência do acréscimo do valor de f_{ck} no comportamento de ruptura da seção transversal.

O Caso 1a do exemplo anterior é repetido para os dois tecidos de fibras de carbono Wabo®Mbrace, sem considerar os fatores de modelagem e, também, considerando-os.

5.7.1. Considerações

A filosofia adotada, de $V_{Rd3} = V_{Sd}$, continua sendo considerada e de acordo com o valor de f_{ck} tem-se:

Tabela 5.49 – Valores de V_c , V_{Rd3} e V_{Sd} , de acordo com variações de f_{ck} .

f_{ck} (MPa)	V_c (kN)	V_{SW} (kN)	$V_{Rd3} = V_{Sd}$ (kN)
20	59,68	73,19	132,87
25	69,25		142,44
30	78,2		151,39
35	86,67		159,86
40	94,74		167,93

Tabela 5.50 – Acréscimos de cargas acidentais, de acordo com variações de f_{ck} .

f_{ck} (MPa)	V_{gk} (kN)	$V_{qk, inicial}$ (kN)	ΔV_{qk} (kN)	$V_{qk, final}$ (kN)
20	71,18	23,73	47,45	71,18
25	76,31	25,44	50,87	76,31
30	81,10	27,03	54,07	81,10
35	85,64	28,54	57,09	85,64
40	89,96	29,99	59,97	89,96

5.7.2.**Modelos Probabilísticos da Resistência do Concreto à Compressão e das Solicitações**

Os modelos probabilísticos das variáveis aleatórias são os mesmos utilizados no exemplo anterior, exceto os modelos de f_c , V_g e V_q que são modificados, conforme tabela a seguir.

Tabela 5.51 – Modelos probabilísticos da resistência do concreto à compressão e das solicitações, de acordo com f_{ck} .

f_{ck}	Variável Aleatória	Valor Característico	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Distribuição
20	f_c (MPa)	20	26,6	4	15,04	Lognormal
	V_g (kN)	71,18	71,18	7,12	10	Normal
	V_q (kN)	23,73	23,73	5,93	25	Gumbel
25	f_c (MPa)	25	31,6	4	12,66	Lognormal
	V_g (kN)	76,31	76,31	7,63	10	Normal
	V_q (kN)	25,44	25,44	6,36	25	Gumbel
30	f_c (MPa)	30	36,6	4	10,93	Lognormal
	V_g (kN)	81,10	81,10	8,11	10	Normal
	V_q (kN)	27,03	27,03	6,76	25	Gumbel
35	f_c (MPa)	35	41,6	4	9,62	Lognormal
	V_g (kN)	85,64	85,64	8,56	10	Normal
	V_q (kN)	28,54	28,54	7,14	25	Gumbel
40	f_c (MPa)	40	46,6	4	8,58	Lognormal
	V_g (kN)	89,96	89,96	9,00	10	Normal
	V_q (kN)	29,99	29,99	7,50	25	Gumbel

5.7.3. Resultados

Os resultados deste exemplo são apresentados nos gráficos a seguir. A Figura 5.16 indica que para se obter valores de β_3 e β_4 maiores que $\beta_r = 3,8$ é preciso aumentar o valor da taxa geométrica de reforço conforme aumento da resistência característica do concreto à compressão.

Quando é utilizado o tecido Wabo®Mbrace CF-530 precisa-se de um valor de ρ_f menor, principalmente quando os fatores de modelagem são considerados.

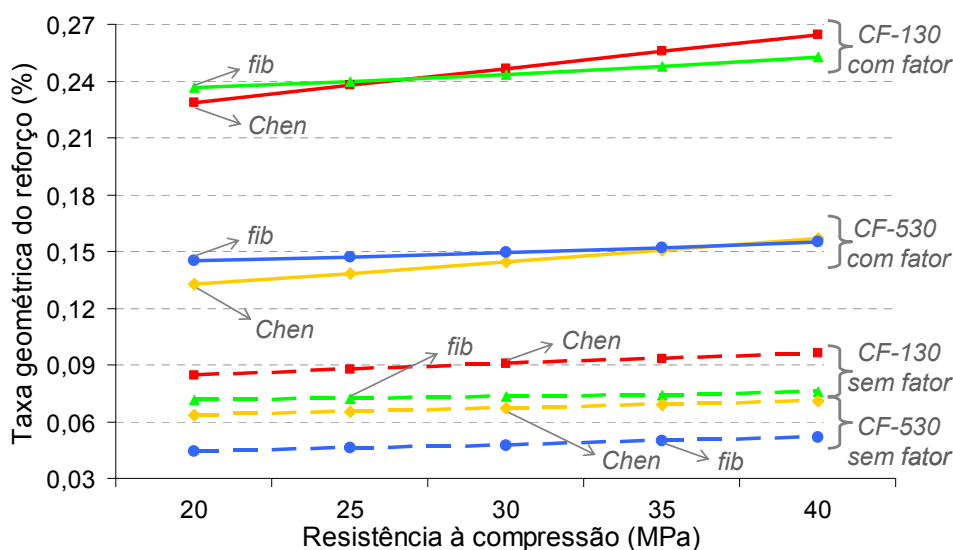


Figura 5.16 – Gráfico resistência característica do concreto à compressão x taxa geométrica do reforço, do sexto exemplo.

A partir da Figura 5.17 verifica-se que os valores dos índices de confiabilidade β_2 diminuem quando os fatores de modelagem são considerados e os valores dos índices de confiabilidade β_3 aumentam. Quando é utilizado o tecido Wabo®Mbrace CF-130 obtêm-se valores maiores de β_3 comparando com os valores obtidos quando se utiliza o tecido Wabo®Mbrace CF-530.

Para o tecido Wabo®Mbrace CF-130 a Figura 5.17 informa que, tanto sem considerar os fatores de modelagem quanto considerando, os valores dos índices de confiabilidade β_3 diminuem com o aumento de f_{ck} e que β_4 tem valor constante igual a $\beta_r = 3,8$. O índice de confiabilidade $\beta_{e,série}$ assume, em todas as situações, valor igual a β_4 . O modo de falha dominante é ruptura da alma por tração diagonal devido ao descolamento do reforço.

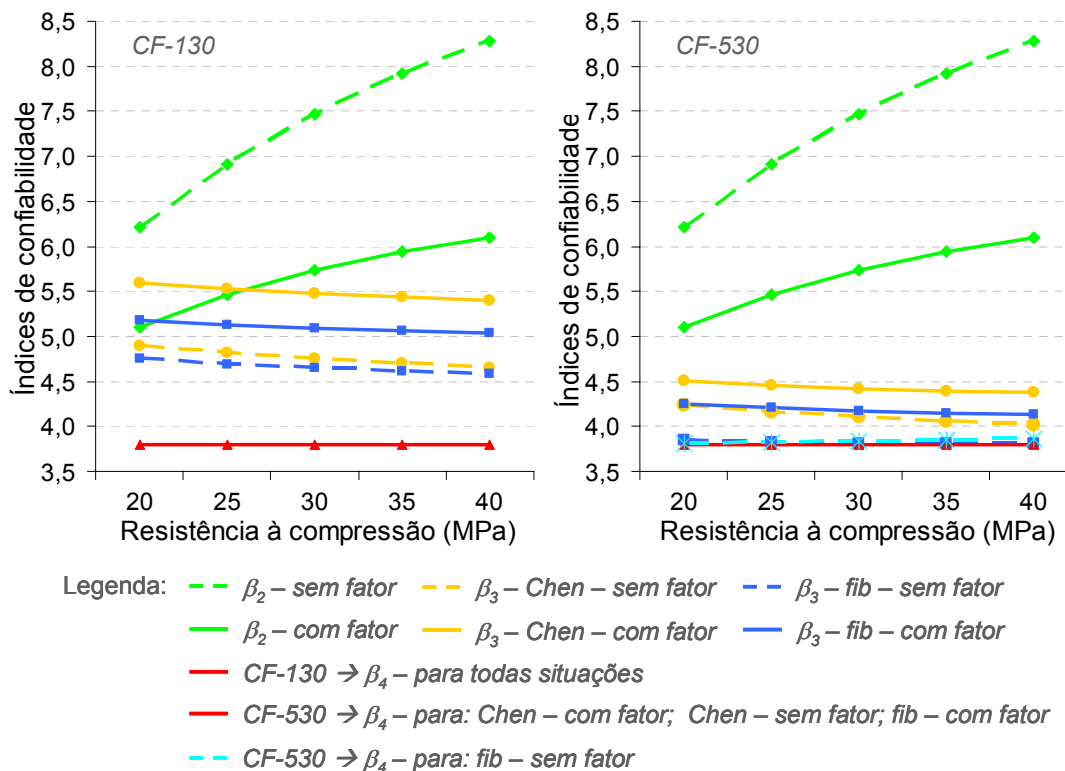


Figura 5.17 – Gráfico resistência característica do concreto à compressão x índices de confiabilidade (β_2 , β_3 e β_4), do sexto exemplo.

Para o tecido Wabo®Mbrace CF-530 a Figura 5.17 mostra que, tanto sem considerar os fatores de modelagem quanto considerando, os valores dos índices de confiabilidade β_3 diminuem com o aumento de f_{ck} . Quando os fatores de modelagem não são considerados e são utilizadas na função de estado as equações do Bulletin 14 fib (2001) o valor de β_4 é maior do que $\beta_r = 3,8$ e aumenta com o aumento de f_{ck} . A partir de $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ o valor do índice de confiabilidade β_3 passa a ser menor do que o valor de β_4 e a ruptura da alma por tração diagonal devido à ruptura do reforço passa a comandar o dimensionamento. O índice de confiabilidade $\beta_{e,série}$ assume valor igual a $\beta_r = 3,8$. Quando os fatores de modelagem são considerados, β_4 tem valor constante igual a $\beta_r = 3,8$ e obtém-se $\beta_{e,série} = \beta_4$. O modo de falha dominante é ruptura da alma por tração diagonal devido ao descolamento do reforço.

A partir da Figura 5.18 pode-se verificar melhor os valores de β_3 e β_4 quando as equações do Bulletin 14 fib (2001) são utilizadas nas funções de estado.

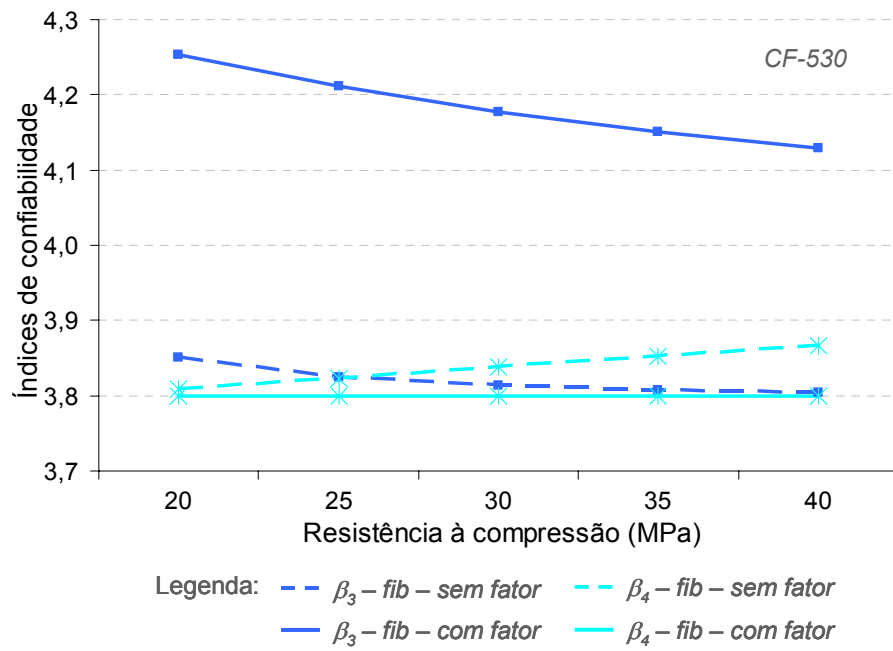


Figura 5.18 – Gráfico resistência característica do concreto à compressão x índices de confiabilidade ($\beta_3 - fib$ e $\beta_4 - fib$), do sexto exemplo para o tecido Wabo®MBrace CF-530.