

7 Análise não-determinística da solicitação de tornados sobre torres de transmissão

Conforme visto na seção 2.2.5, a análise não-determinística de efeitos estruturais pressupõe o conhecimento da curva de ameaça e das distribuições de demanda e capacidade estrutural. As curvas de ameaça a tornados obtidas para o território brasileiro estão mostradas na Figura 2.20 (Relatório 001/4, 2007). Aprofunda-se, neste capítulo, o estudo da demanda tornádica e propõe-se, a partir da mesma, uma metodologia para a estimativa da probabilidade de falha.

7.1 Estudo da demanda tornádica

Na análise estática, os valores de C_{rh} e C_{rv} (coeficientes de redução horizontal e vertical, definidos no capítulo 7) dependem, para determinada torre, de três parâmetros: δ_0 , D/r_{max} e β . Olhando-se para o problema sob ótica determinística, o interesse recai sobre situações críticas, em que esses coeficientes apresentem valores máximos, conforme capítulo anterior. Na condução da análise não-determinística, especificamente no estudo da demanda, faz-se necessária a obtenção da distribuição de probabilidade desses coeficientes.

Com esse intuito, assume-se que a espessura da camada limite do tornado, δ_0 , independa de outras características do mesmo e possua distribuição normal, com média 500 m e desvio-padrão arbitrado de tal forma a 80% das ocorrências localizarem-se entre 100 e 900 m. Tal estimativa é feita com base em valores médios utilizados na literatura. Atribui-se ainda aos parâmetros D/r_{max} e β uma distribuição probabilística uniforme e independente de δ_0 . Para obtenção das distribuições dos coeficientes de demanda, são realizadas diversas análises estruturais determinísticas para combinações desses parâmetros. Utilizam-se em torno de 500 discretizações. Consideram-se ainda as mesmas torres autoportantes

e estaiadas estudadas no capítulo anterior, representativas da faixa de alturas usuais dessas estruturas.

Opta-se pela realização do estudo a partir das funções de distribuição acumulada, por permitirem a análise comparativa de modo mais simples e eficaz. As Figuras 7.1 e 7.2 mostram as curvas de distribuição do coeficiente de demanda C_{rh} obtidas para força a cortante global em três modelos de torre autoportantes e estaiados, respectivamente.

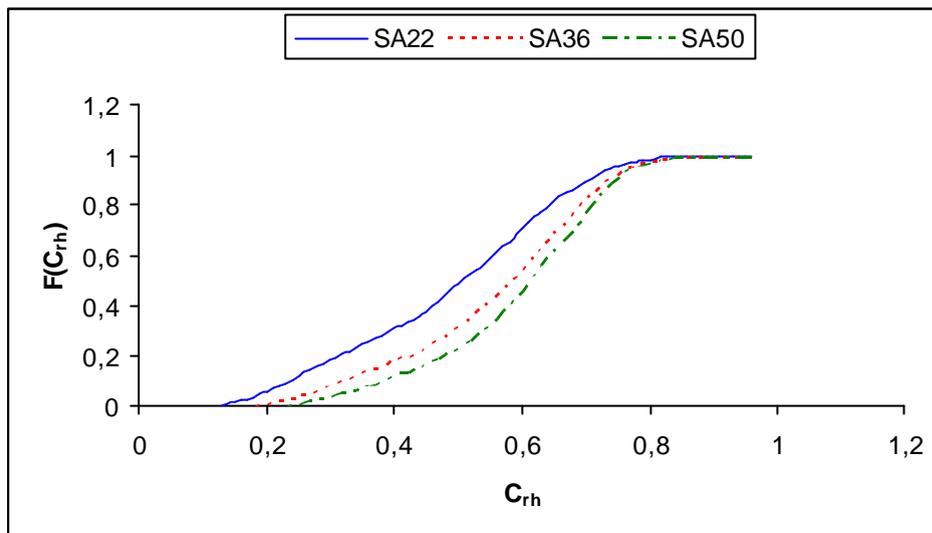


Figura 7.1 – Funções de distribuição acumulada de C_{rh} para a força cortante global nos modelos autoportantes

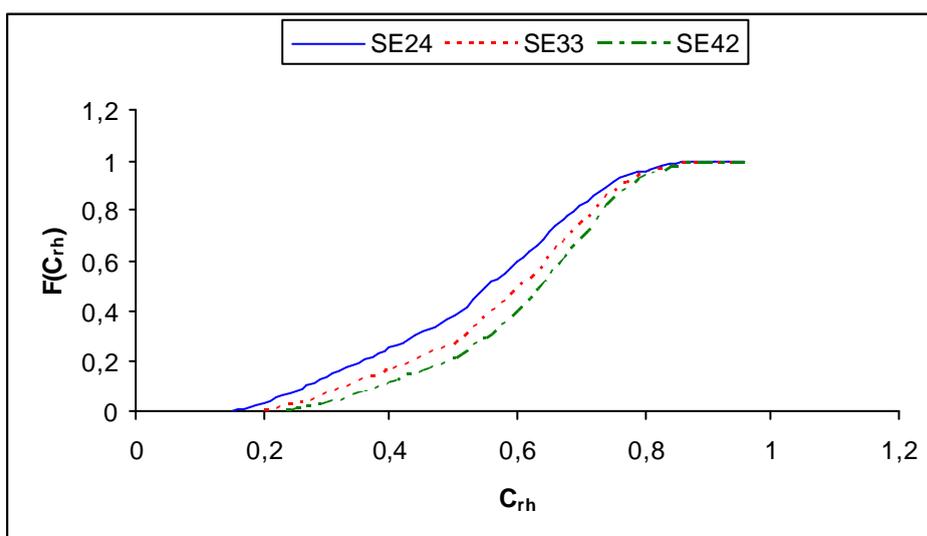


Figura 7.2 – Funções de distribuição acumulada de C_{rh} para a força cortante global nos modelos estaiados

O coeficiente varia entre aproximadamente 0,2 e 0,9. As torres mais altas apresentam comportamento mais crítico em relação à probabilidade de o coeficiente ultrapassar determinado nível. Tal constatação corrobora observações feitas no capítulo anterior (Figuras 6.5 e 6.6). Nas Figuras 7.3 e 7.4, observam-se as distribuições de C_{rh} calculadas agora a partir do momento de tombamento nas estruturas.

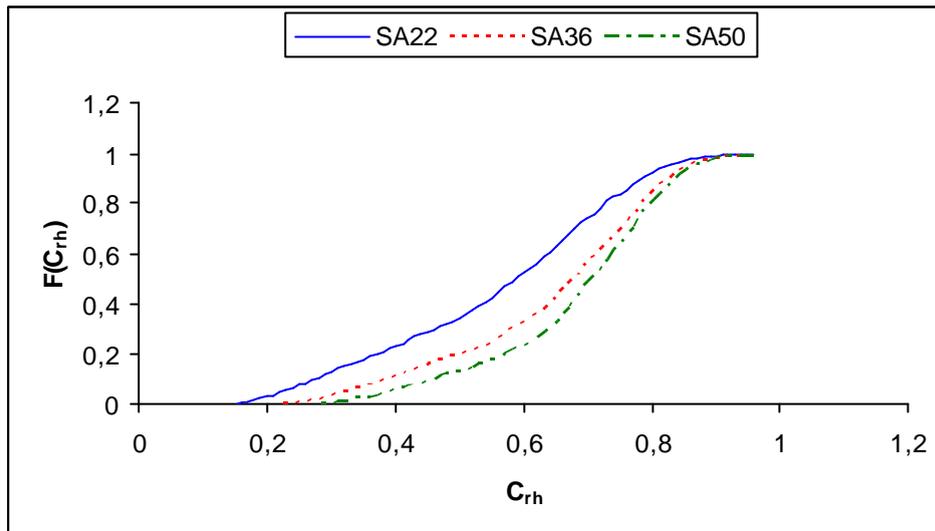


Figura 7.3 - Funções de distribuição acumulada de C_{rh} para o momento global nos modelos autoportantes

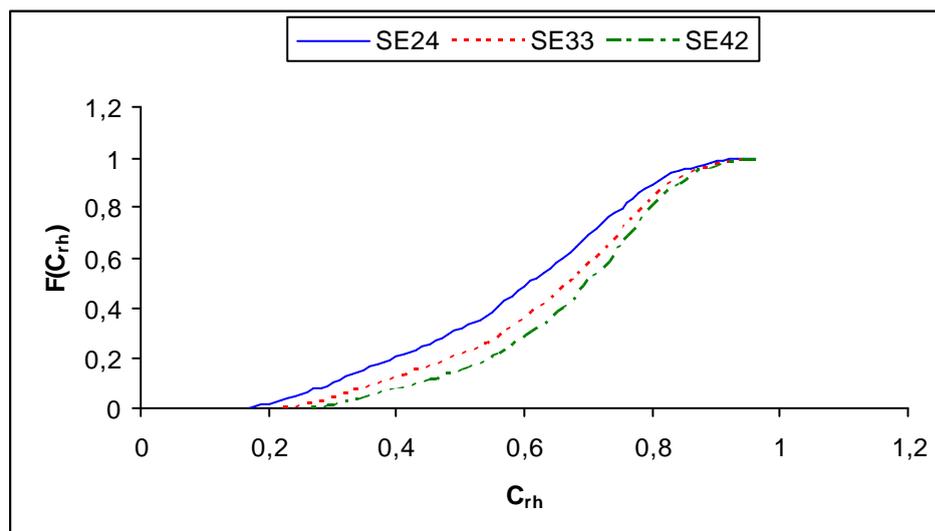


Figura 7.4 - Funções de distribuição acumulada de C_{rh} para o momento global nos modelos estaiados

O comportamento é bastante semelhante ao observado para a força cortante global, havendo um deslocamento das curvas no sentido do aumento da probabilidade de ultrapassagem de determinado nível, fato natural e coerente com observações anteriores relativas ao fato de os momentos de tombamento tenderem a apresentar coeficientes de redução mais elevados.

As distribuições para C_{rv} são também obtidas e apresentadas nas Figuras 7.5 e 7.6 para torres autoportantes e estaiadas.

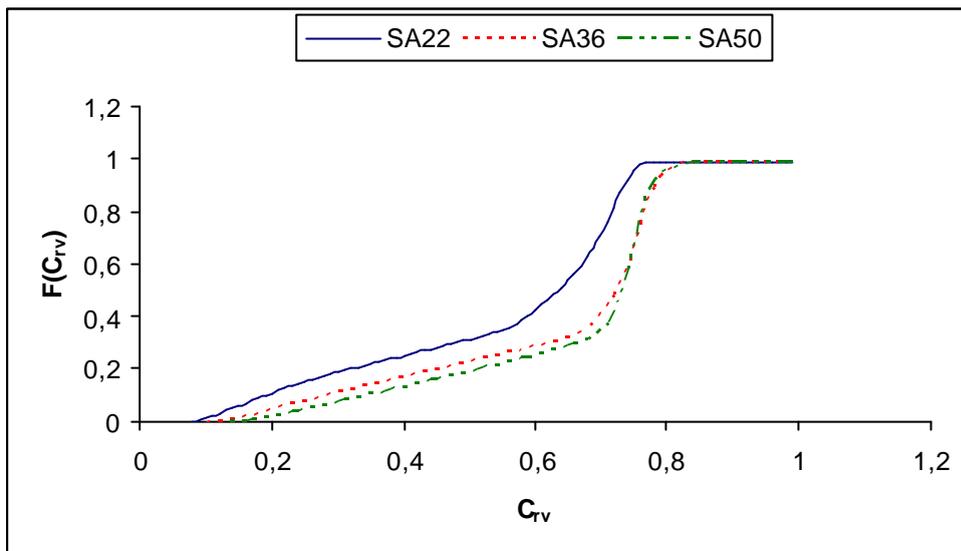


Figura 7.5 – Funções de distribuição acumulada para C_{rv} nas torres autoportantes

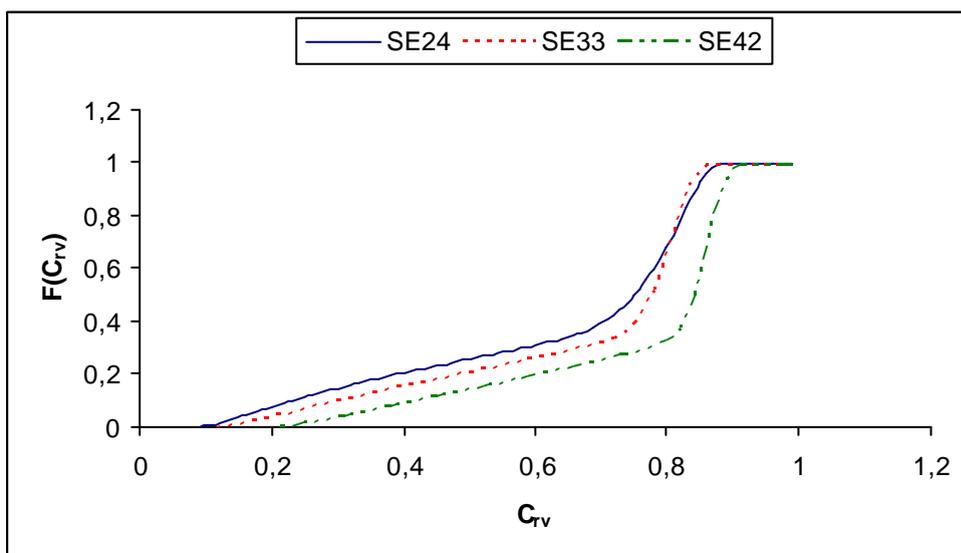


Figura 7.6 - Funções de distribuição acumulada para C_{rv} nas torres estaiadas

As curvas são bastante diferentes das calculadas para C_{rh} . De fato, a natureza das duas ações é notoriamente diferente, sendo a ação vertical, por exemplo, independente do ângulo β (eq. 3.5). Em concordância com o observado para as ações horizontais, há uma tendência de as torres mais altas apresentarem maior probabilidade de ultrapassagem de determinado coeficiente também para as ações verticais.

A força vertical depende, determinados uma torre e um tornado, apenas de r ($=r^2/r_{max}$), o que leva a uma distribuição concentrada em valores específicos, mais intensamente entre 0,6 e 0,8. De fato, tem-se que, fixada uma relação z/δ_0 , pode-se determinar o valor de r para o qual a ação vertical é máxima. Sabe-se que a torre experimenta essa ação máxima para qualquer D/r_{max} inferior a esse valor. Portanto, quando todos os módulos da torre se encontram nessa situação, não há alteração na força vertical máxima total, o que resulta em valores de C_{rv} idênticos. É possível inferir matematicamente essa conclusão através da interpretação das eqs. (3.3) a (3.5). Há ainda simetria da análise em relação ao parâmetro D/r_{max} .

As curvas de coeficientes de demanda até agora obtidas prestam-se ao estudo probabilístico de ações globais, tomadas isoladamente como horizontais ou verticais, não havendo intercâmbio direto entre as curvas de C_{rh} e C_{rv} , a despeito de ambas as ações ocorrerem de modo simultâneo. De especial interesse são os efeitos nas fundações, resultantes da interação entre as forças horizontais e verticais tornádicas. Deste modo, obtêm-se as distribuições de coeficientes de demanda de compressão e tração nos pontos de apoio das torres estudadas. Naturalmente, a partir dessas ações verticais nos elementos isolados de fundação, as ações horizontais nos mesmos podem ser estimadas.

Definem-se então os coeficientes de redução à compressão e à tração, chamados C_{rc} e C_{rt} , da mesma forma que C_{rh} e C_{rv} . O coeficiente C_{rc} para determinada análise é igual à raiz quadrada da relação entre a maior força de compressão observada em um ponto de apoio da torre e aquela obtida pela aplicação direta de V_{max} na face da torre que resulte em uma força de compressão mais elevada. Para esta última força, designada de referência, não se considera a ação vertical, que tende a diminuí-la. O cômputo de C_{rt} é semelhante, com a diferença de levar-se em conta a ação vertical de V_{max} no cálculo da força de referência à tração. As Figuras 7.7 e 7.8 mostram as distribuições acumuladas de C_{rc} para torres autoportantes e estaiadas, respectivamente.

As curvas obtidas para as torres autoportantes são semelhantes às aquelas apresentadas para o coeficiente de redução horizontal. No caso das torres estaiadas, esse comportamento se altera, com probabilidades significativas observadas também para valores menores de C_{rc} . Tal fato deve-se à natureza física das duas situações, que é diferente. No caso da torre autoportante, há quatro pontos de apoio que podem ser comprimidos (pernas), ao passo em que para a torre estaiada há apenas dois (mastros). A própria disposição geométrica desses elementos é bastante distinta.

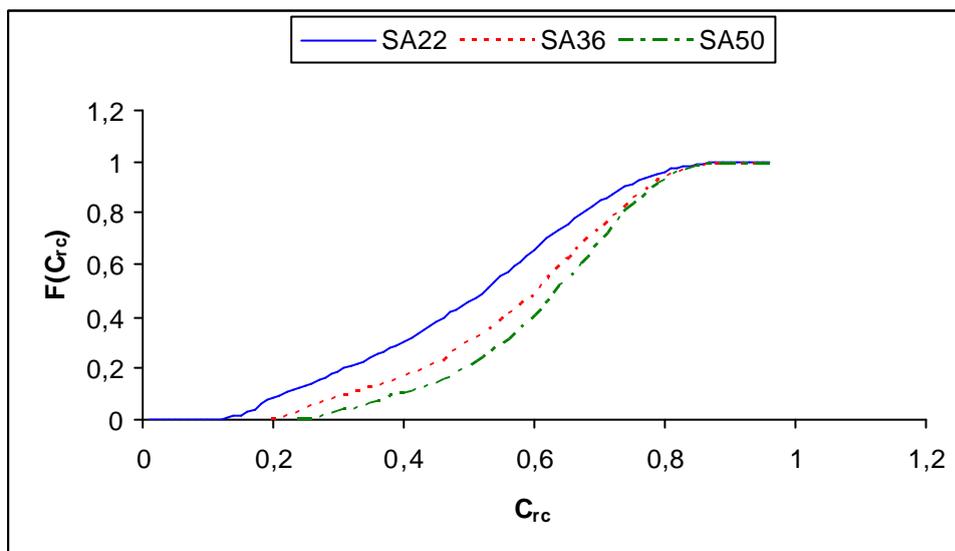


Figura 7.7 - Funções de distribuição acumulada para C_{rc} nas torres autoportantes

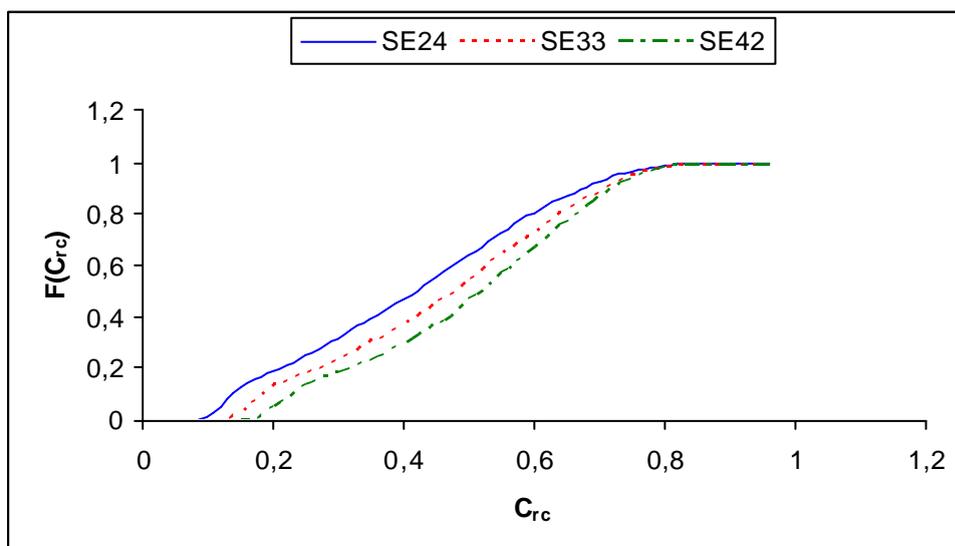


Figura 7.8 - Funções de distribuição acumulada para C_{rc} nas torres estaiadas

As distribuições dos coeficientes C_{rt} podem ser visualizadas nas Figuras 7.9 e 7.10, respectivamente para torres autoportantes e estaiadas. Naturalmente, nas torres autoportantes a máxima tração ocorre em um dos pontos de apoio das quatro pernas. Nas estaiadas, em um dos pontos de fixação dos quatro estais. Em decorrência dessa semelhança física e geométrica do problema, os perfis não se distinguem consideravelmente e apresentam comportamento próximo ao observado para o C_{rh} obtido para o momento de tombamento (Figuras 7.3 e 7.4).

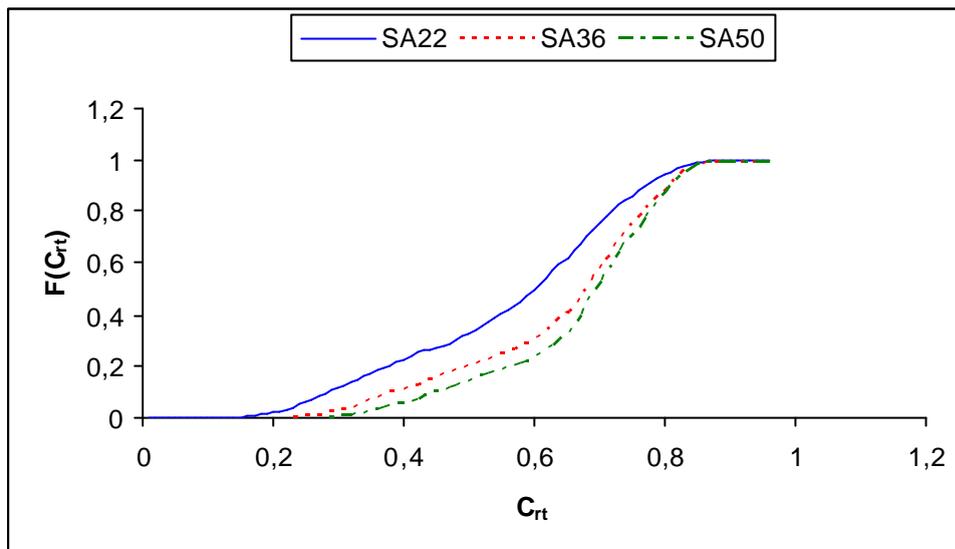


Figura 7.9 - Funções de distribuição acumulada para C_{rt} nas torres autoportantes

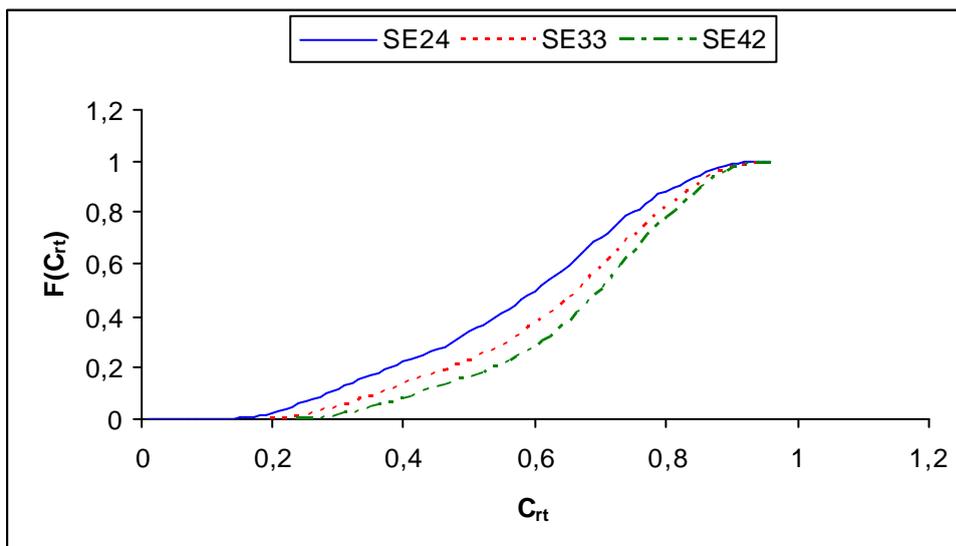


Figura 7.10 - Funções de distribuição acumulada para C_{rt} nas torres estaiadas

Durante a solicitação tornádica em torres de transmissão, há a possibilidade de os mastros sofrerem também efeitos de tração. Por esse motivo, é de interesse a avaliação da distribuição da menor força de compressão atuante no mastro (que pode ser uma força de tração). A Figura 7.11 apresenta as curvas dos coeficientes de demanda obtidos para a tração no mastro, $C_{rt\text{mast}}$. Valores negativos, de compressão, referem-se a situações nas quais o mastro não é tracionado.

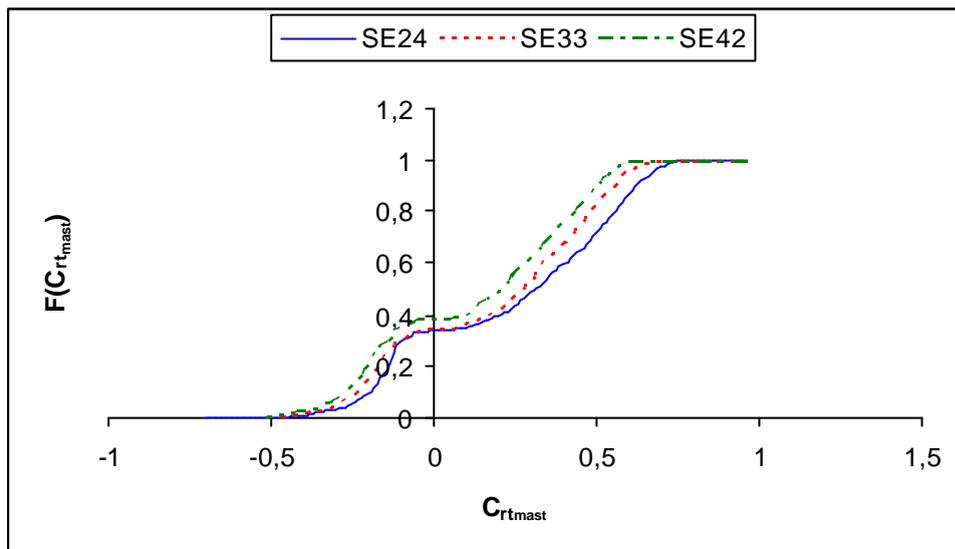


Figura 7.11 - Funções de distribuição acumulada para $C_{rt\text{mast}}$ nas torres estaiadas

Os coeficientes $C_{rt\text{mast}}$ são calculados tomando-se como referência a força de tração atuante em um dos pontos de apoio devido à aplicação de V_{max} na direção vertical, sem ação horizontal. Em aproximadamente 40% das ocorrências, o mastro não sofre efeitos de tração. Limites superiores para $C_{rt\text{mast}}$ são da ordem de 0,75.

Nas análises de compressão e tração nos pontos de apoio, exceto para a força de tração nos mastros, uma observação é constante e condizente com o observado para as ações globais (C_{rh} e C_{rv}): as torres mais altas apresentam maior probabilidade de ultrapassagem de um determinado coeficiente limite. A despeito de algumas exceções e hipóteses, crê-se, portanto, que tal generalização não incorre em erro grosseiro.

Com o intuito de fornecer uma ferramenta para análise da probabilidade de falha de torres de transmissão a tornados, busca-se reunir as curvas apresentadas anteriormente em um conjunto tanto menor e representativo quanto possível.

Assim, perfis de distribuição acumulada semelhantes, que não levem a diferenças significativas na avaliação da probabilidade anual de falha, são agrupados e apresentados para três diferentes classes de altura: 25, 35 e 45 m que são valores aproximados tomados para as torres estudadas.

As curvas de C_{rt} e C_{rh} (para momento de tombamento) apresentam comportamento semelhante para torres de alturas próximas, tanto autoportantes quanto estaiadas. Reúnem-se as mesmas, conforme Figura 7.12. Do mesmo modo, os perfis de C_{rh} obtidos para a força cortante global e as distribuições de C_{rc} nas pernas podem ser vistos na Figura 7.13.

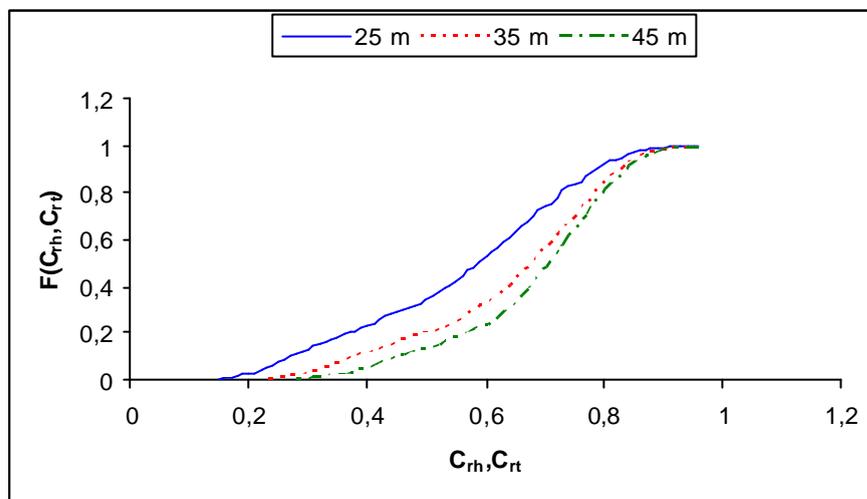


Figura 7.12 – Funções de distribuição propostas para C_{rh} (momento global) e C_{rt}

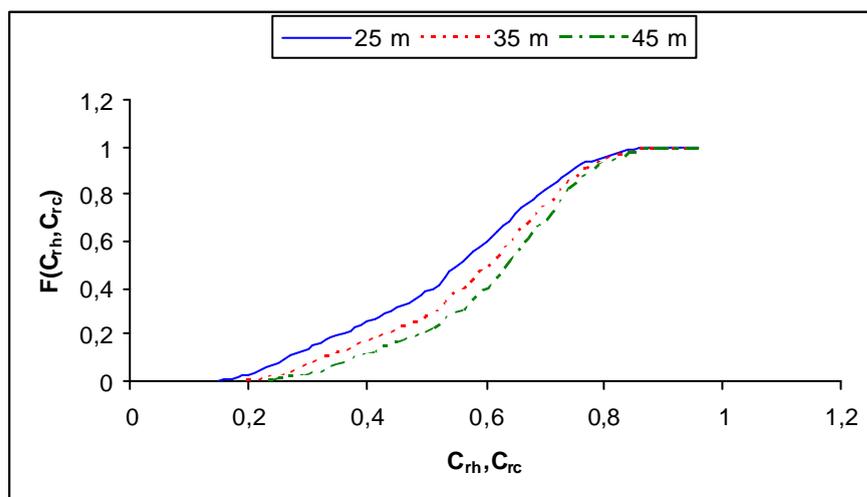


Figura 7.13 - Funções de distribuição propostas para C_{rh} (força cortante global) e C_{rc} (torres autoportantes)

A distribuição dos coeficientes de demanda para as forças de compressão e tração nos pontos de apoio dos mastros das torres estaiadas é apresentada nas Figuras 7.14 e 7.15. Nas Figuras 7.16 e 7.17, mostram-se as curvas para o coeficiente C_v , referentes à ação global vertical, para as torres autoportantes e estaiadas, respectivamente.

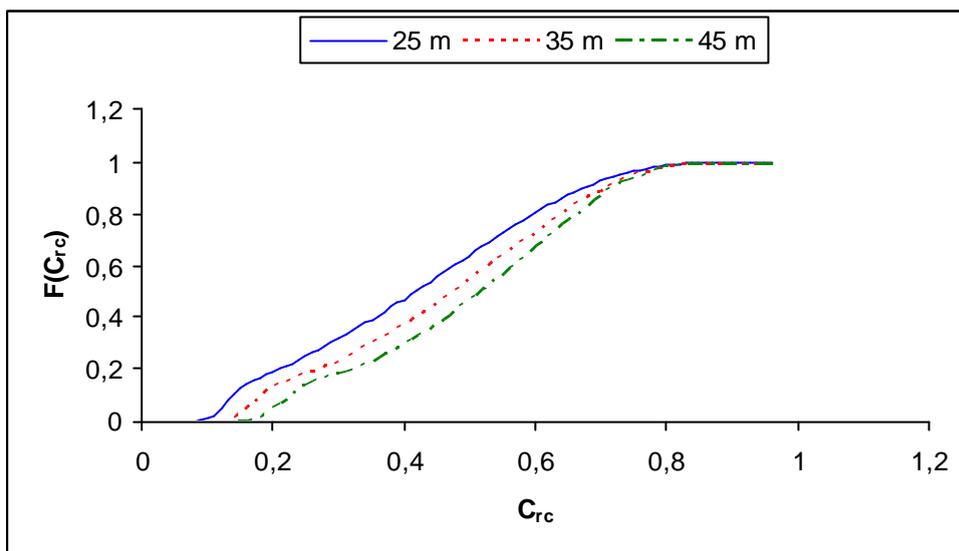


Figura 7.14 - Funções de distribuição propostas para C_{rc} nas torres estaiadas

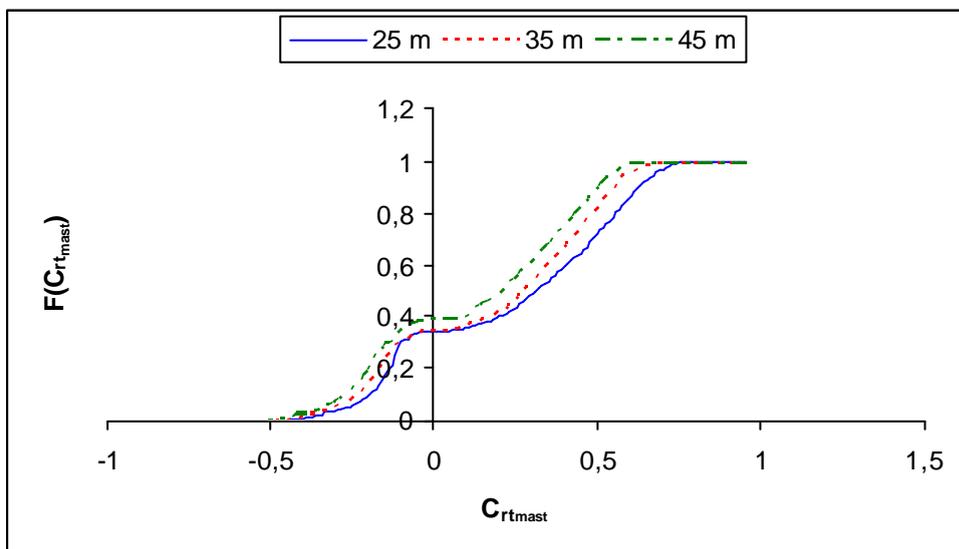


Figura 7.15 - Funções de distribuição propostas para C_{rt} nas torres estaiadas

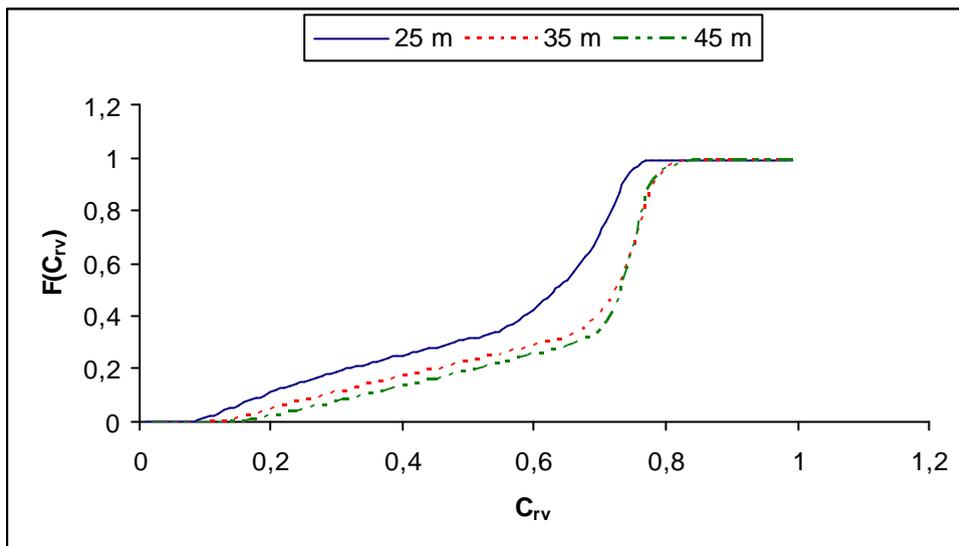


Figura 7.16 - Funções de distribuição propostas para C_{rv} nas torres autoportantes

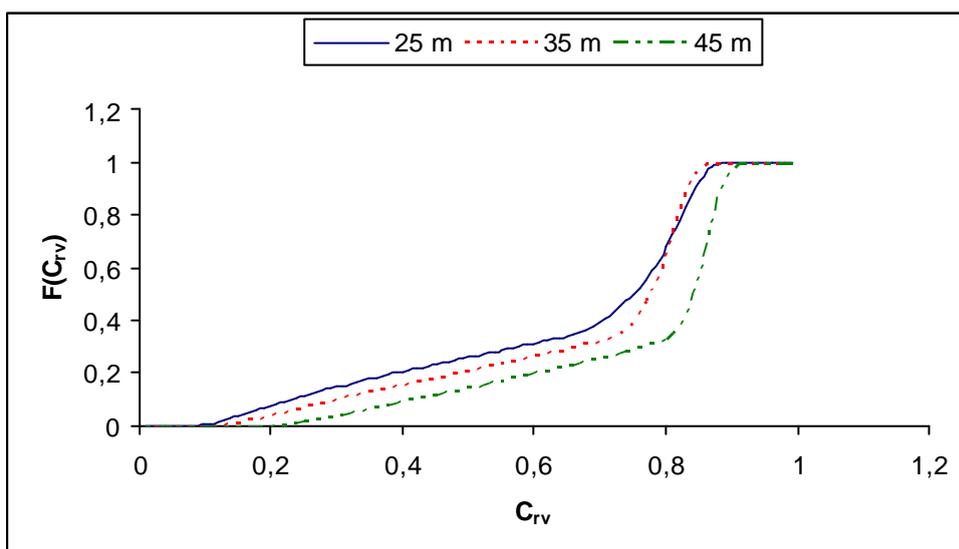


Figura 7.17 - Funções de distribuição propostas para C_{rv} nas torres estaiadas

As funções propostas não podem ser representadas por distribuições clássicas. No entanto, as curvas mostradas nas Figuras 7.12 a 7.14 são ajustáveis com boa precisão por polinômios de quinto grau, conforme Tabela 7.1. Na última coluna, apresentam-se os coeficientes de correlação.

Tabela 7.1 – Ajuste das funções de distribuição dos coeficientes de demanda tornádicos

Função distribuição	Altura (m)	Coeficientes polinômio						
		5ª pot.	4ª pot.	3ª pot.	2ª pot.	1ª pot.	Indep.	R ²
C _{rh} (momento global) e C _{rt}	25	-12,049	24,192	-17,887	7,4336	-0,8302	0,018	0,999
	35	-22,3	46,645	-33,329	11,215	-1,3979	0,0401	0,9986
	45	-27,473	57,588	-40,228	12,421	-1,4841	0,0426	0,9979
C _{rh} (força cortante global) e C _{rc} (torres autportantes)	25	-4,2869	4,9814	-1,8928	2,2696	-0,1967	-0,0005	0,9986
	35	-8,8585	12,691	-4,7303	1,918	-0,1969	0,0021	0,9981
	45	-14,349	23,672	-11,244	3,008	-0,3032	0,0061	0,9979
C _{rc} (torres estaiadas)	25	2,8938	-7,2237	3,9277	0,5868	0,8191	-0,0394	0,9988
	35	0,5175	-3,0637	1,3871	1,8695	0,2356	-0,0211	0,9986
	45	-0,5486	-2,3722	2,2928	1,5655	-0,0332	-0,0083	0,9984

7.2 Metodologia para avaliação da probabilidade de falha de torres de transmissão a tornados

Baseando-se no estudo de demanda apresentado, propõe-se uma metodologia para avaliação da probabilidade anual de falha de torres de transmissão por conta da incidência de tornados e exemplifica-se para o caso brasileiro.

7.2.1 Metodologia

A probabilidade anual de falha pode ser estimada conforme seguintes passos:

- Escolha de um efeito mecânico definidor da falha e da curva de distribuição de probabilidade do coeficiente de demanda a ele correspondente (Figuras 7.12 a 7.17);
- Obtenção da distribuição da demanda do efeito de interesse condicionada a determinado valor de ameaça, empregando a curva escolhida anteriormente;
- Definição da densidade de probabilidade da capacidade estrutural;
- Avaliação da probabilidade de falha condicionada através da eq. (2.24);

- Repetição do procedimento para outros valores de ameaça e obtenção da curva de fragilidade da estrutura;
- Com as curvas de fragilidade estrutural e ameaça para o sítio em questão, obtém-se a probabilidade anual de falha através da convolução das mesmas, conforme eq. (2.22).

7.2.2 Exemplo

Para ilustrar a aplicação da metodologia, obtém-se a probabilidade anual de falha da torre SA50 à força cortante global devido à incidência de tornados. Considera-se a torre localizada na Província da Bacia do Prata.

Toma-se então, para a avaliação da demanda, a função de distribuição do C_{rh} para força cortante global apresentada na Figura 7.13 para altura 45 m. Para cada valor de ameaça, V_{max} , obtém-se uma curva de demanda para a força cortante global. Essa relaciona-se com o coeficiente C_{rh} através da expressão:

$$F_q = \frac{1}{2} \rho \sum C_i A_i (C_{rh} V_{max})^2 \quad (7.1)$$

onde ρ é a massa específica do ar; C_i e A_i são o coeficiente de arrasto e a área de exposição do módulo i . A escolha da face de análise é irrelevante para a estimativa da probabilidade de falha. Toma-se aqui a face transversal. Como se nota, trata-se apenas de uma transformação da velocidade incidente de vento na força cortante global, utilizando para isso a massa específica do ar e propriedades geométricas da torre. De forma semelhante, é possível obter, a partir da velocidade de vento incidente e características geométricas da torre analisada, outros efeitos globais, como momento de tombamento e força vertical total, além de forças de compressão e tração máximas atuantes nos elementos de apoio.

Arbitra-se para a capacidade uma distribuição normal com desvio-padrão igual a 10% da média. Essa é calculada de tal forma que a torre apresente 10% de probabilidade de falha ao ser submetida ao vento de projeto.

A distribuição da capacidade é, naturalmente, mantida invariável e, para cada curva de demanda, a eq. (2.24) é avaliada numericamente, de modo a se

obter a probabilidade de falha condicionada à ameaça, $P_{f/V_{\max}}$. As funções de densidade de probabilidade da capacidade e da demanda para um tornado com $V_{\max} = 85$ m/s (correspondente a um F3 médio) são mostradas na Figura 7.18, a título de exemplo.

Os valores de $P_{f/V_{\max}}$ obtidos para diversos valores de V_{\max} permitem a construção da curva de fragilidade da torre SA50 em relação ao efeito considerado, mostrada na Figura 7.19. Tal curva indica a probabilidade de falha dado que um tornado, com determinado V_{\max} , ocorre no sítio em questão e atinge a torre.

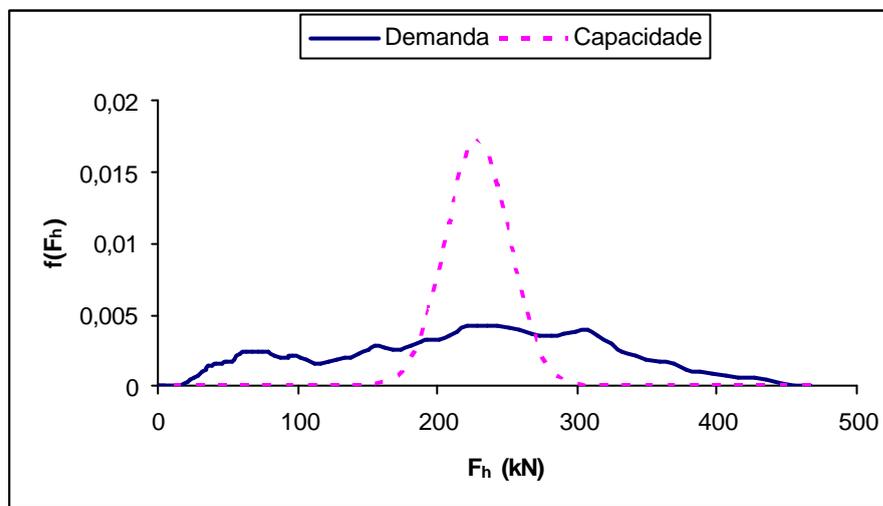


Figura 7.18 – Funções de densidade de probabilidade da demanda, $V_{\max} = 85$ m/s, e da capacidade para força cortante global na torre SA50

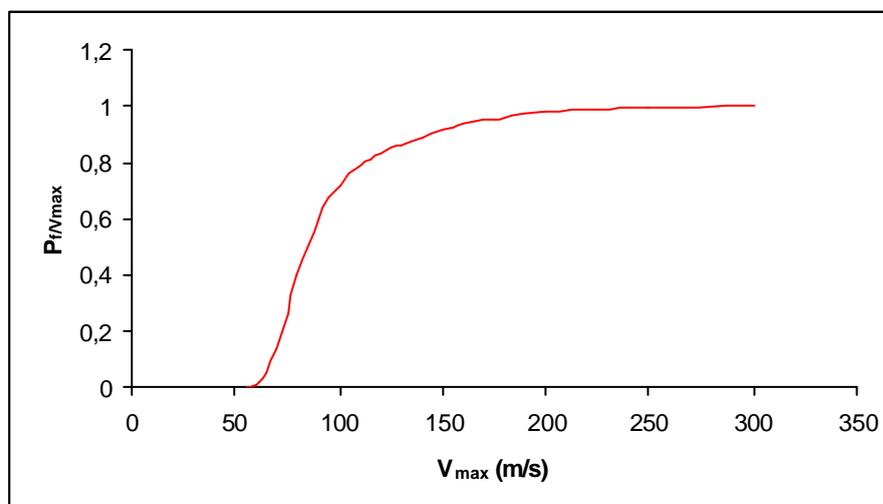


Figura 7.19 – Curva de fragilidade a tornados para força cortante global na torre SA50

Por fim, a probabilidade anual de falha é calculada através da convolução das curvas de fragilidade e ameaça, conforme eq. (2.22). Utiliza-se a curva de ameaça correspondente à Província da Bacia do Prata (PBP), mostrada na Figura 2.20. Integrando-se numericamente, obtém-se:

$$P_f = 1,03 \times 10^{-7} \quad (7.2)$$

Ressalta-se que esse valor está associado a uma distribuição hipotética da capacidade estrutural da torre.