

6 Metodologia para avaliação da ação mecânica global de tornados no projeto de torres de transmissão

Dos estudos já realizados, infere-se que a resposta de torres de transmissão a tornados pode ser avaliada a partir de simplificações importantes. A primeira delas é considerar a estrutura, no caso a torre de transmissão, como eixo material perante o tornado (avaliação de todas as ações em seu eixo de simetria). Estudos anteriores para edifícios fechados (Pecin, 2006) e resultados mostrados na seção 5.1 indicam que as forças cortantes e momentos globais não são substancialmente alterados por essa hipótese. Outra constatação importante diz respeito à desconsideração da parcela de inércia na equação de Morrison (eq. 3.8). Tal parcela não se mostra relevante porque é proporcional ao volume do alvo estrutural, pequeno em relação à área de exposição ao vento no caso de barras de torres de transmissão. Resultados mostrados na seção 5.2 corroboram tal observação. Por fim, estudos conduzidos nas seções 5.3 e 5.4 revelam que, para as torres e tornado considerados, a amplificação dinâmica não é significativa para as componentes de vento de interesse.

A metodologia é proposta a partir da seguinte abordagem do problema: obtêm-se os efeitos de vento tornádico nas direções horizontal e vertical (seções 6.1 a 6.3) para a torre e seus cabos, considerando-se as simplificações expostas. Ou seja, inicialmente, se assume o problema como sendo de natureza estática, com análise de eixo material e tomando-se apenas a força de arrasto. Posteriormente (seção 6.4), estuda-se cada uma dessas simplificações, de modo a se extraírem eventuais compensações por tê-las adotado *a priori*.

6.1 Ações horizontais de vento

Os efeitos estáticos da incidência tornádica, tomando-se a estrutura como eixo material e considerando-se somente a força de arrasto do vento, são analisados, separadamente para a torre e para os cabos.

6.1.1 Torre

Feitas as ponderações anteriores, o problema recai no estudo da interação entre o campo de vento do tornado, dado pelo modelo de Kuo/Wen, e as simulações das torres de transmissão. Particularmente, nessa interação, o modelo estrutural contribui apenas com sua área de obstrução às componentes do vento tornádico. A idéia mais intuitiva e elementar, já que se trata de uma solicitação estática, é a aplicação da máxima velocidade horizontal de vento do tornado, $V_{\max}$, tal como definida na Figura 3.1. Naturalmente, isso leva a superestimar as forças atuantes, pois tal velocidade não ocorre em todos os pontos do alvo estrutural simultaneamente. Procura-se então, neste item, por um coeficiente de redução horizontal adequado, C_{rh} , que, multiplicado por $V_{\max}$, resulte em efeitos globais semelhantes aos observados para as situações críticas de interação entre o tornado e a torre. Ou seja, tem-se que C_{rh} para determinada análise (entenda-se um tornado e torre determinados que interagem mediante trajetória relativa também conhecida) pode ser calculado através da raiz quadrada da razão entre os efeitos globais obtidos e aqueles resultantes da aplicação do vento horizontal máximo. Deste modo, define-se:

$$V_{PHest} = C_{rh} V_{\max} \quad (6.1)$$

onde V_{PHest} representa a velocidade horizontal estática de projeto a tornados, C_{rh} é o coeficiente de redução horizontal e $V_{\max}$ é a velocidade máxima horizontal de vento do tornado.

Definidos tornado e estrutura específicos, os efeitos globais dependem da trajetória em relação ao alvo, caracterizada por dois parâmetros: $D/r_{\max}$, que

representa a razão entre a distância do modelo à trajetória tornádica e o raio do núcleo desse; e β , ângulo entre essa trajetória e a linha de simetria da estrutura, conforme Figura 3.3. Sendo assim, convencionou-se o uso do termo $u(D/r_{\max})(\beta)$ ou $v(D/r_{\max})(\beta)$ para representar a posição relativa entre a torre e o tornado, sendo u e v as componentes horizontais de vento (eq. 3.5) atuantes nas faces transversal e longitudinal, indistintamente. Portanto, para cada dessas nomenclaturas, têm-se duas posições, conforme a componente considerada atue em uma das faces. O ângulo é dado em graus. Tome-se como exemplo a denominação $u(0,75)(30)$. Indica-se uma torre que está, portanto, a $\frac{3}{4}$ do raio do núcleo de distância da trajetória do tornado e inclinada 30° em relação a essa trajetória. A visualização é facilitada com auxílio da Figura 3.3. Duas posições de interação torre-tornado são possíveis: a componente u pode atuar na face transversal ou longitudinal da torre. Naturalmente, em quaisquer dos casos, a face perpendicular está submetida à componente $v(0,75)(30)$, de tal modo que ambas as faces são solicitadas simultaneamente pelas componentes u e v correspondentes a determinada posição. Para a estrutura atingida pelo núcleo tornádico, tem-se que $-1 = D/r_{\max} = 1$ e $0 = \beta = 90^\circ$.

São estudados dez modelos de torres, cinco autoportantes e cinco estaiados, denominados SA22, SA36, SA50, SA100, SA200, SE24, SE33, SE42, SE126 e SE210. O número corresponde à altura aproximada da estrutura, em metro. Tais alturas são escolhidas de modo a representar a variação de torres usuais. Os modelos SA100 e SA200 são propostos a partir do SA50, mantendo, portanto, suas proporções. O mesmo diz-se das torres SE126 e SE210, criadas a partir da SE42. As demais estruturas são reais e representativas da região das bacias do Sul e Sudeste. As Figuras 4.1 e 4.2 correspondem às torres SA50 e SE42, analisadas no capítulo anterior. As outras são a elas semelhantes, a despeito das diferenças de altura.

Nas equações do modelo de campo de vento apresentadas (seção 3.1), há três parâmetros livres: $r_{\max}$, $T_{\max}$ e δ_0 . Os efeitos globais estáticos não dependem do primeiro diretamente (e sim de $D/r_{\max}$). Como as componentes de vento são proporcionais a $T_{\max}$ (Eqs. 3.1 a 3.4) e toma-se ainda $V \cong (1/6)T_{\max}$ (Dutta et al, 2002), tem-se que o coeficiente C_{rh} procurado independe da intensidade do tornado, $V_{\max}$. De fato, verifica-se que, dadas as considerações acima,

$V_{\max} \cong 1,3T_{\max}$. Assim sendo, as ações globais, advindas da incidência do tornado ou do vento horizontal máximo, são proporcionais a $T_{\max}^2$ (a força de arrasto é proporcional ao quadrado da velocidade, vide eq. 3.8). O coeficiente C_{th} provém da razão entre essas ações, sendo, por esse motivo, independente de $T_{\max}$ ou $V_{\max}$. Infere-se, assim, que o parâmetro tornádico de interesse para avaliação de C_{th} é a espessura da camada limite quando $r \gg 1$, δ_0 .

Como a torre é mobilizada simultaneamente em ambas as faces, um primeiro questionamento é se a eq. (6.1) pode ser avaliada, para cada posição de análise, a partir da ação do tornado atuante na face mais solicitada. Em outros termos, busca-se conhecer se a ação global resultante máxima sobre a torre pode ser aproximada satisfatoriamente pela ação global máxima atuante em uma das faces, de tal modo que quando essa face esteja submetida à excitação crítica, a solicitação na outra possa ser desprezada. De fato, as análises levam a essa conclusão. Como exemplo, apresentam-se os resultados obtidos para a força cortante global na base das torres SA50 e SE42 (Figuras 6.1 e 6.2). Toma-se $\delta_0 = 500$ m para o tornado. O parâmetro $D/r_{\max}$ varia entre -1 e 1, em intervalos de 0,25; β vai de 0 a 75° , em intervalos de 15° . O eixo ‘posição’ refere-se à seguinte convenção: (-1)(0) para a posição 1, (-1)(15) para a posição 2, etc. São, ao todo, portanto, 108 posições, sendo a primeira metade para a componente u atuante na face longitudinal e a segunda para a componente v atuante nessa face. Naturalmente, a face transversal é, em ambos os casos, submetida às componentes v e u, respectivamente.

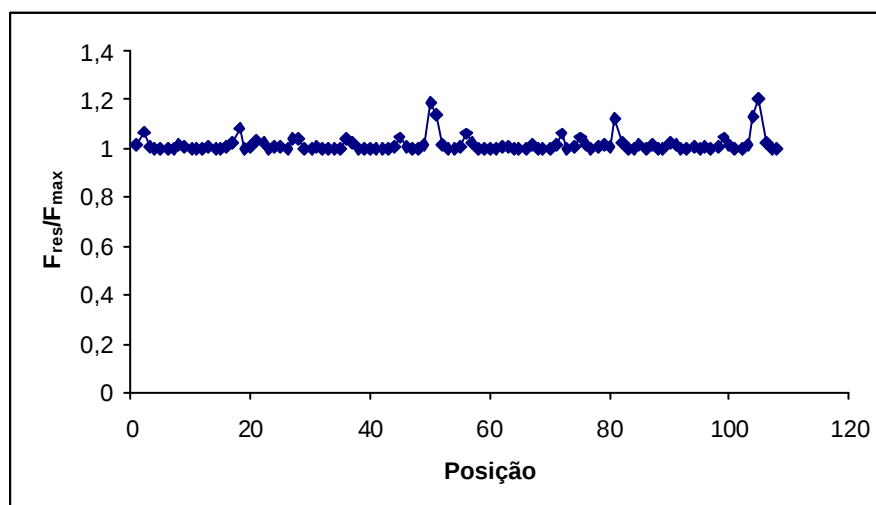


Figura 6.1 – Relação entre a força cortante global resultante máxima e a força global máxima atuante em uma face do modelo SA50, $\delta_0 = 500$ m

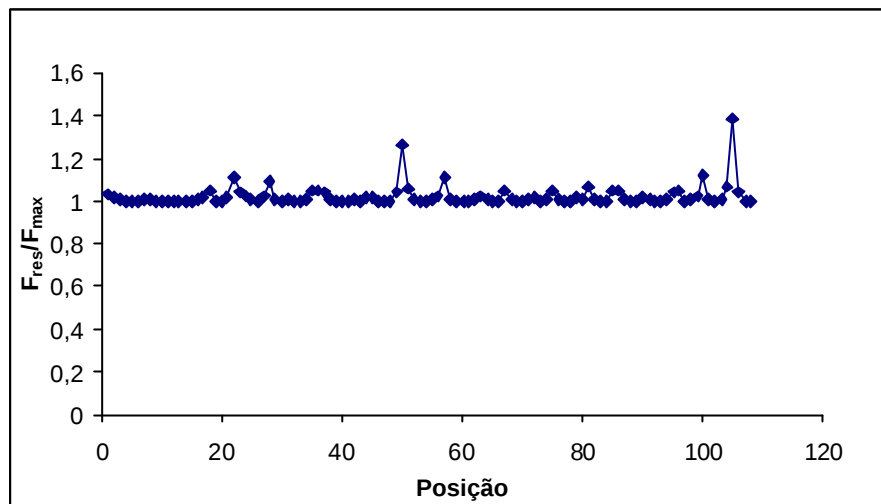


Figura 6.2 - Relação entre a força cortante global resultante máxima e a força global máxima atuante em uma face do modelo SE42, $\delta_0 = 500$ m

Exceto para algumas posições localizadas na fronteira do núcleo ($D/r_{\max} = 1$), a relação entre as forças é aproximadamente unitária. Essa região constitui caso particular, em que as ações máximas nas faces da torre ocorrem simultaneamente. Assim, no prosseguimento deste estudo, toma-se a ação máxima atuante em uma face da torre (a que se revelar mais crítica) como representativa da ação resultante máxima sobre o modelo.

Nas Figuras 6.3 e 6.4 são mostrados os valores de C_{rh} obtidos para as torres SA50 e SE42, respectivamente, para diferentes valores de δ_0 . O efeito analisado é a força cortante global.

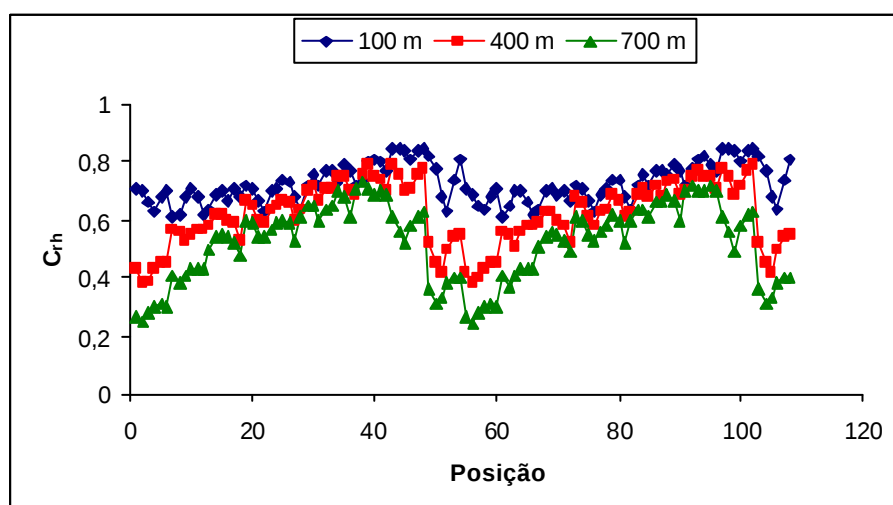


Figura 6.3 – Variação de C_{rh} no modelo SA50 para diferentes valores de δ_0

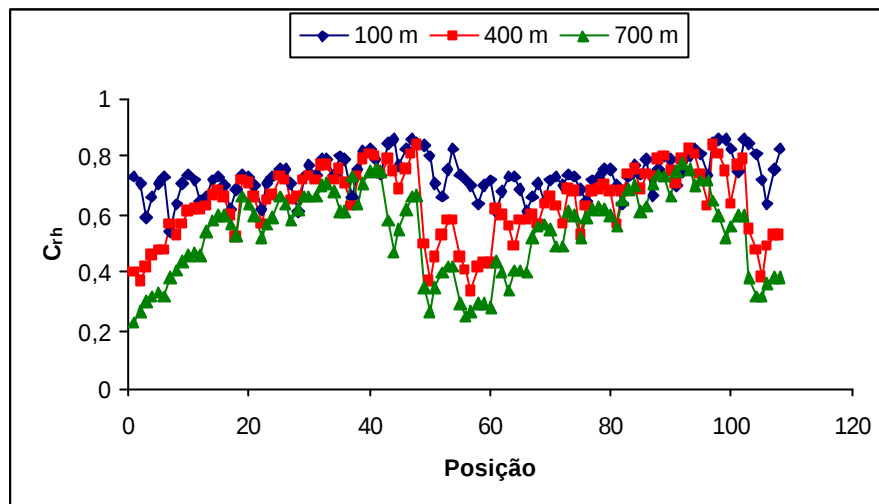


Figura 6.4 - Variação de C_{rh} no modelo SE42 para diferentes valores de δ_0

Há uma tendência de queda do valor de C_{rh} quando há aumento da espessura da camada limite. Tal comportamento é observado também para os outros modelos analisados. Na Figura 6.5, visualiza-se a variação dos valores máximos de C_{rh} para a força cortante global atuante nas torres autoportantes em função de δ_0 .

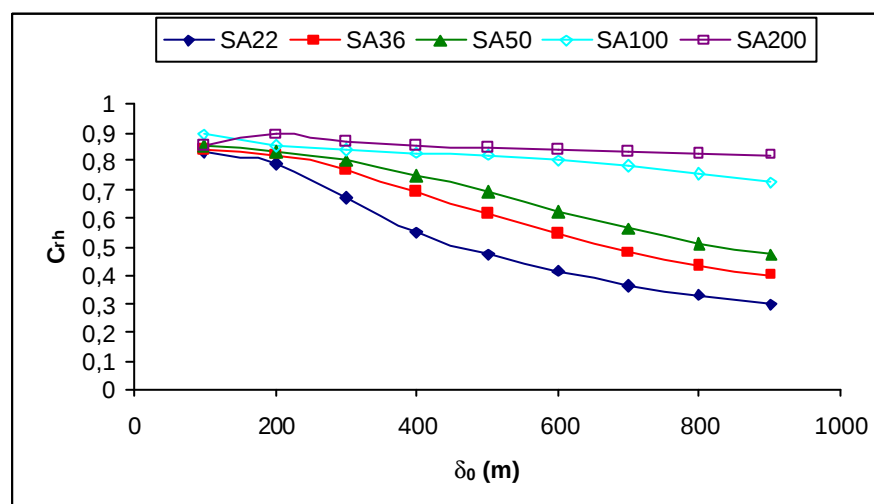


Figura 6.5 - Variação de C_{rh} em função de δ_0 para modelos autoportantes

Nota-se que torres de maior altura tendem a apresentar valores de C_{rh} mais elevados. No entanto, para pequenos valores de δ_0 (< 200 m), os valores do coeficiente tendem a se igualar para todos os modelos, atingindo o máximo de

aproximadamente 0,9. Os resultados obtidos para os modelos estaiados podem ser visualizados na Figura 6.6, de onde se extraem conclusões semelhantes.

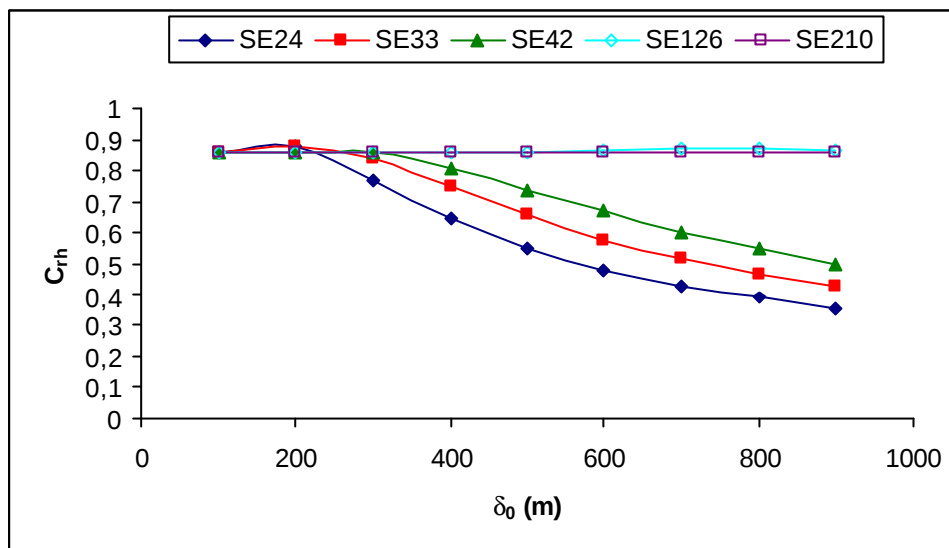


Figura 6.6 - Variação de C_{rh} em função de δ_0 para modelos estaiados

Os coeficientes de redução apresentam grande sensibilidade ao parâmetro δ_0 , exceto para torres de elevada altura. No entanto, valores característicos do mesmo não são reportados com grande frequência na literatura e correlações com outros parâmetros tornádicos são fracamente estabelecidas. Opta-se, neste trabalho, por se prosseguir com os estudos para $\delta_0 = 100$ m, valor arbitrado de modo a representar uma situação que se julga factível e crítica.

A comparação entre os valores de C_{rh} obtidos para a força cortante total na base e aqueles referentes ao momento de tombamento pode ser feita através das Figuras 6.7 e 6.8, onde se mostram os resultados obtidos para as vinte posições mais críticas dos modelos SA50 e SE42. Neste exemplo, toma-se a face transversal das torres.

Os valores de C_{rh} tendem a ser maiores para o momento de tombamento do que para a força cortante total. As direções críticas, onde se notam os maiores efeitos mecânicos da incidência tornádica, são aproximadamente na região de $D/r_{max} = 0,75$. Os valores máximos de C_{rh} obtidos para os demais modelos são mostrados nas Figuras 6.9 e 6.10, corroborando a preponderância dos coeficientes de redução para o momento global.

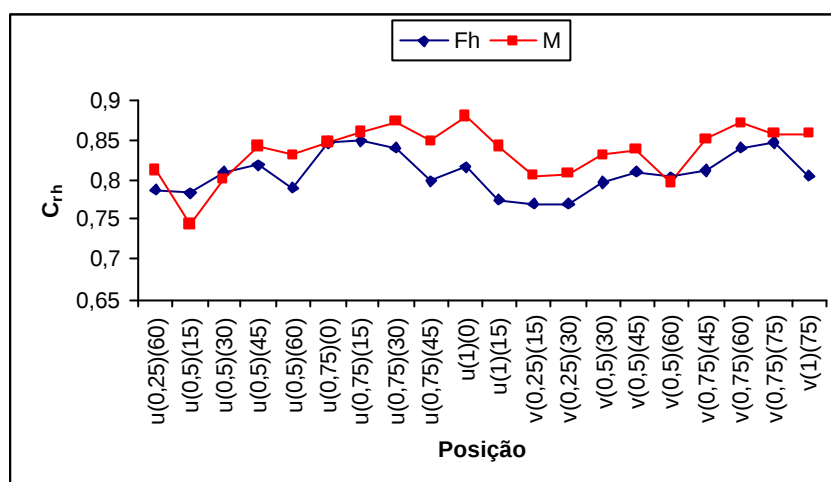


Figura 6.7 - Variação de C_{rh} para diversas posições torre-tornado na face transversal do modelo SA50, $\delta_0 = 100$ m

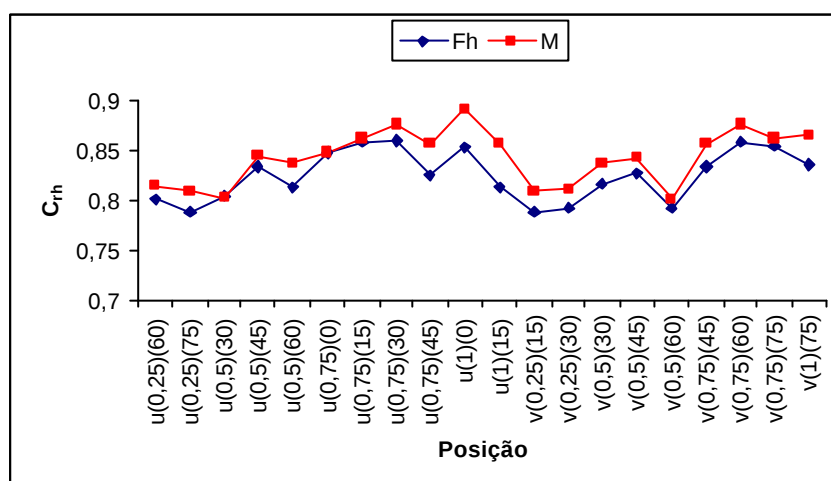


Figura 6.8 - Variação de C_{rh} para diversas posições torre-tornado na face transversal do modelo SE42, $\delta_0 = 100$ m

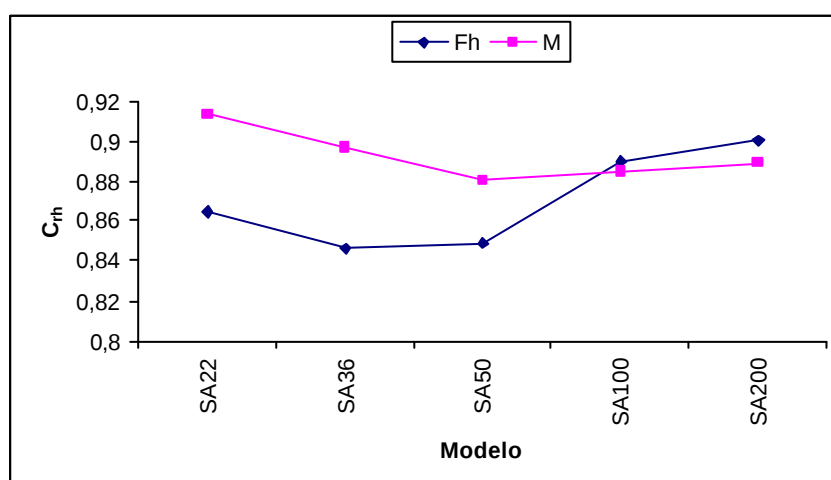


Figura 6.9 - Valores máximos de C_{rh} para os modelos autoportantes, $\delta_0 = 100$ m

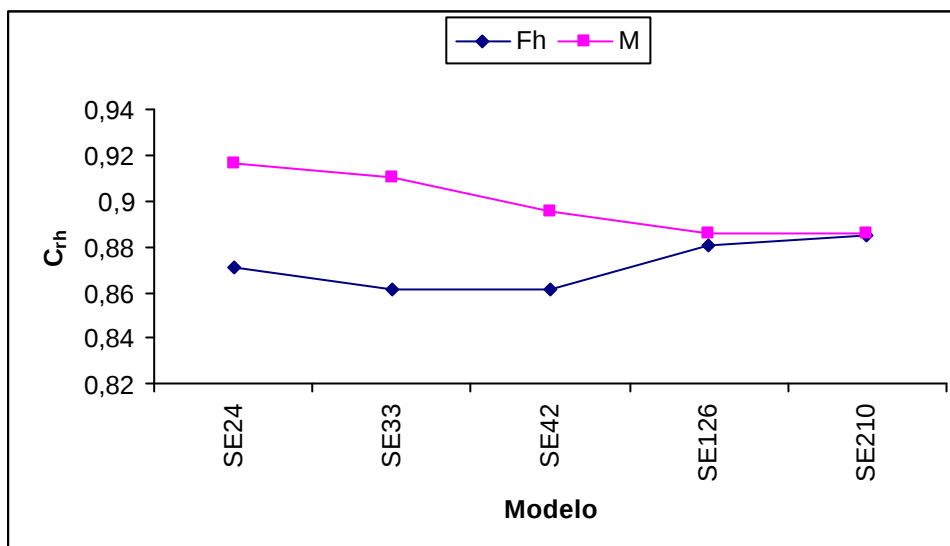


Figura 6.10 - Valores máximos de C_{rh} para os modelos estaiados, $\delta_0 = 100$ m

Nas situações até agora consideradas, toma-se a velocidade de translação, V , como sendo $1/8$ da máxima velocidade horizontal de vento, V_{max} (Dutta et al, 2002). A título de exemplo, a Figura 6.11 ilustra a variação do coeficiente C_{rh} para a força cortante global na face transversal da torre SA50 quando tal relação se modifica. De forma geral, os valores de C_{rh} tendem a aumentar para velocidades de translação menores.

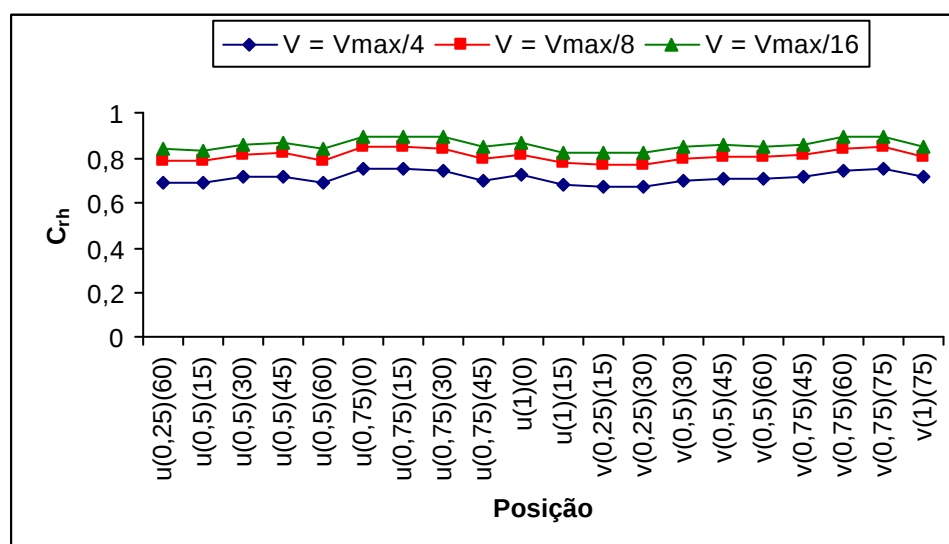


Figura 6.11 – Variação de C_{rh} na face transversal do modelo SA50 para diferentes velocidades de translação, $\delta_0 = 100$ m

Nos estudos realizados, uma observação é recorrente, a despeito da variação de C_{rh} para as diversas situações e modelos: o mesmo apresenta valor máximo igual a aproximadamente 0,9. Eventualmente, tal valor é levemente ultrapassado, conforme se tome uma ou outra situação específica. Entretanto, no contexto das incertezas relacionadas à excitação tornádica e à definição de parâmetros para a análise dos efeitos mecânicos resultantes dessa excitação, julga-se conveniente propor o valor mencionado para representar a solicitação estática máxima em uma torre de transmissão por conta da incidência de um tornado. Deste modo, tem-se:

$$V_{PHest} = 0,9V_{max} \quad (6.2)$$

6.1.2 Cabos condutores e pára-raios

A solicitação horizontal de vento nos cabos decorrente da incidência do tornado deve-se a três parcelas: tangencial, radial e translacional. A componente tangencial, anti-simétrica, tem seu efeito resultante no cabo nulo, conforme Figura 6.12 (considera-se apenas um ponto de fixação na torre para condutores e pára-raios). O mesmo não ocorre para a componente radial, que apresenta resultante sobre o cabo, como mostra a Figura 6.13.

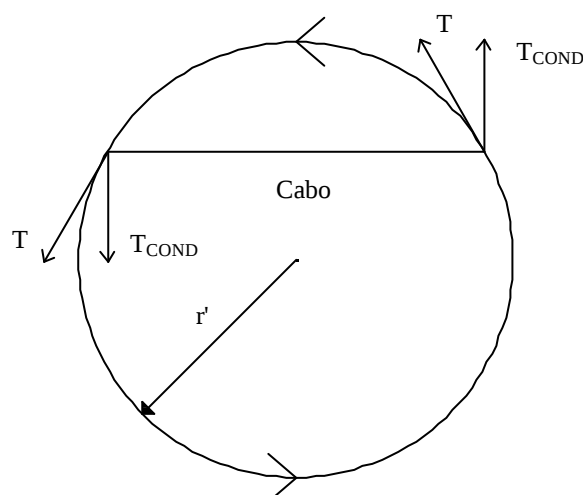


Figura 6.12 – Velocidade tangencial atuante no cabo de uma linha de transmissão

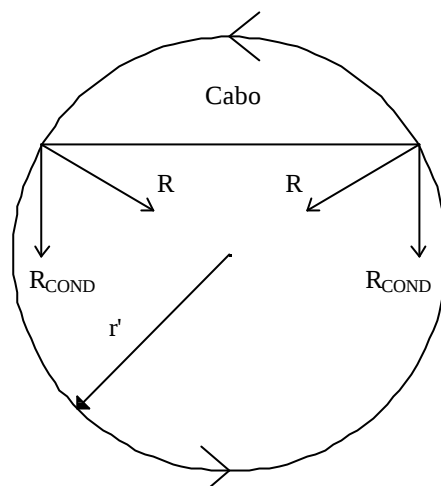


Figura 6.13 - Velocidade radial atuante no cabo de uma linha de transmissão

Na Figura 6.14, tem-se o valor da velocidade radial equivalente no cabo, R_{eq} , em relação à velocidade tangencial máxima, para diversas alturas e instantes de análise, representados pelo parâmetro D/r_{max} (neste caso, D é a distância do cabo ao centro do tornado). Considera-se o vão básico de vento igual a 700 m para a linha. Simplificações importantes são feitas, como a não-consideração da flexibilidade do cabo, não-linearidades geométricas, etc. O valor de pico é inferior a $0,1T_{max}$.

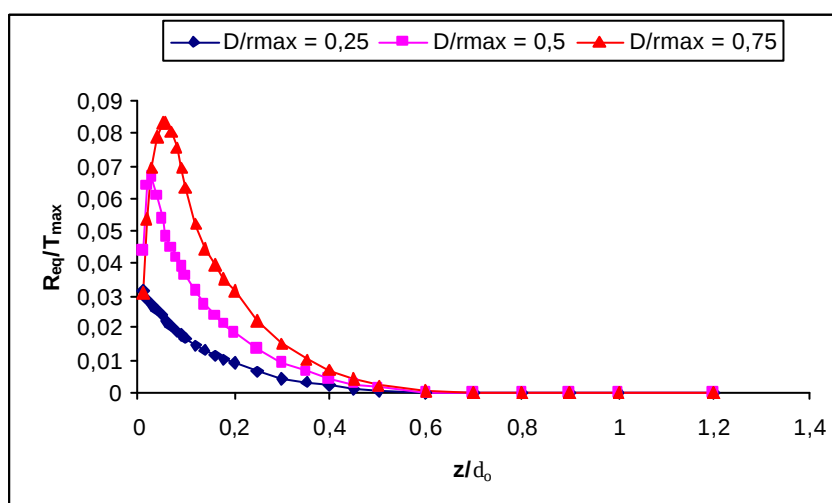


Figura 6.14 – Velocidade radial equivalente nos cabos da linha de transmissão

A velocidade de translação atua na região do cabo atingida pelo tornado, possuindo, naturalmente, o sentido do movimento desse. Valores característicos

da velocidade de translação variam de 5 a 30 m/s. No entanto, tornados não ocorrem desvinculados de severas tempestades. Ou seja, a região do cabo externa ao núcleo tornádico experimenta a ação de vento ordinário, resultante dessas tempestades.

Uma abordagem inicial e conservadora da questão conduz a considerar a máxima velocidade translacional (aproximadamente 30 m/s) atuando em todo o cabo, não apenas na região atingida pelo núcleo do tornado. A essa se somaria a velocidade radial equivalente. Entretanto, considerando a natureza aproximada da estimativa das velocidades tornádicas atuantes na linha de transmissão, e observando-se ainda que tais estimativas conduzem, em princípio, a valores próximos aos ventos usuais de projeto, V_p , opta-se pela recomendação destes últimos na análise da solicitação horizontal nos cabos. Tem-se então:

$$V_{PHcabo} = V_p \quad (6.3)$$

6.2 Ações verticais de vento

6.2.1 Torre

De modo similar à abordagem utilizada para a solicitação horizontal de vento, procura-se, neste item, por um coeficiente de redução vertical adequado, C_{rv} , que, multiplicado pela velocidade horizontal máxima característica do tornado, V_{max} , corresponda à solicitação estática máxima na direção vertical, conforme eq. (6.4):

$$V_{PVest} = C_{rv} V_{max} \quad (6.4)$$

V_{PVest} representa a velocidade vertical estática de projeto a tornados, C_{rv} é o coeficiente de redução vertical e V_{max} é a velocidade máxima horizontal de vento do tornado considerado.

Uma simplificação importante neste caso merece menção: as ações verticais independem do ângulo β e podem ser avaliadas somente para as posições onde

$D/r_{\max} = 0$. Nas outras situações, a função de tempo da força vertical ascendente é parte da função obtida para essa condição.

Deste modo, apresentam-se os valores do coeficiente C_{rv} em função de δ_0 . Nas Figura 6.15 e 6.16, visualizam-se os resultados obtidos para as torres autoportantes e estaiadas, respectivamente. Considera-se $V = V_{\max}/8$ (Dutta et al, 2002).

O comportamento é diferente do observado para a ação horizontal. Não há uma tendência clara de queda do coeficiente com aumento de δ_0 para todos os tipos de torre. Geralmente, observa-se uma ascensão inicial, com pico em uma região intermediária, que depende do modelo analisado, seguido por um movimento de queda. O coeficiente apresenta valor máximo de cerca de 0,85, observado para o modelo SE-24.

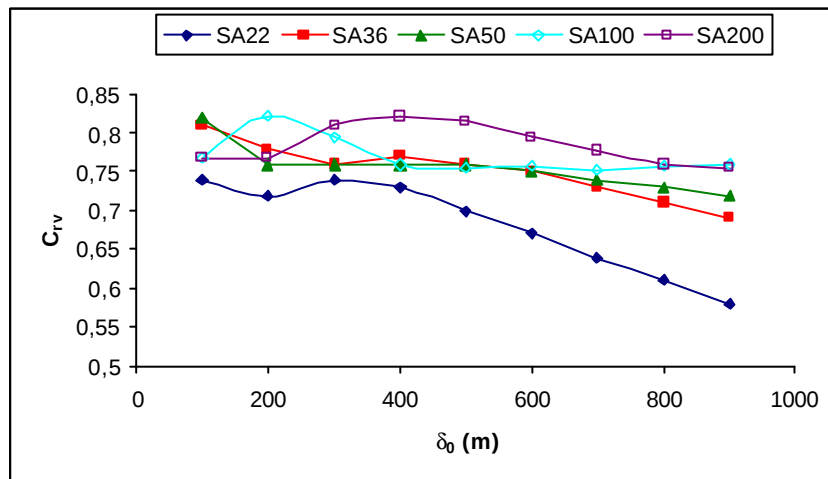


Figura 6.15 – Variação de C_{rv} em função de δ_0 para modelos autoportantes

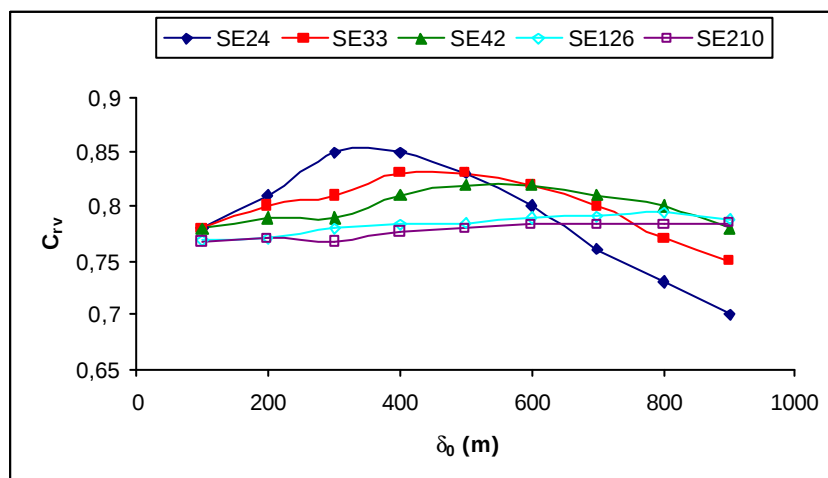


Figura 6.16 – Variação de C_{rv} em função de δ_0 para modelos estaiados

Os valores de C_v são mais sensíveis à velocidade de translação, V . Isso porque, conforme já mencionado e explicitado na eq. (3.5), a componente vertical é independente da inclinação da torre em relação à trajetória do tornado. Tem-se que, para determinado tornado de projeto, caracterizado por uma velocidade horizontal máxima $V_{\max}$, o valor de $T_{\max}$ é tanto maior quanto menor é o valor da velocidade translacional V (vide definição de $V_{\max}$ na Figura 3.1). Assim, para tornados com $V < V_{\max}/8$, há aumento proporcional nos valores de C_{rv} . No entanto, mesmo para baixas velocidades de translação, o coeficiente de redução vertical é, na grande maioria dos casos, inferior a 0,9, valor que se mostra, novamente, característico de uma situação crítica de solicitação estática.

Analisando as respostas obtidas, julga-se recomendável a adoção de um C_{rv} único, a despeito da variação observada nos coeficientes em função da altura e do tipo de modelo estrutural avaliado. De fato, tal variação não é significativa a ponto de justificar eventuais metodologias que levem em conta a altura ou a configuração da torre. Assim, escreve-se:

$$V_{pVest} = 0,9V_{\max} \quad (6.5)$$

6.2.2 Cabos condutores e pára-raios

A ação tornádica vertical ascendente nos cabos é, naturalmente, função do tempo. Adota-se, neste item, a simplificação também mencionada na seção 6.1.2: desconsidera-se a flexibilidade do cabo, a não-linearidade geométrica do problema, etc. Estima-se então a ação estática vertical crítica. A velocidade atuante no cabo é função do parâmetro z/δ_0 (representação adimensional da altura sobre o solo). Os perfis são semelhantes para diferentes valores desse parâmetro. Como exemplo, na Figura 6.17 mostram-se quatro situações. Na abscissa, $l/r_{\max}$ representa a região do cabo atingida pela excitação (a região entre -1 e 1 corresponde ao núcleo tornádico). Toma-se $V_{\max} \sim 1,3T_{\max}$.

A solicitação sobre o cabo é igual a um duplo pulso simétrico, característico de ações verticais tornádicas, como apresentado em ocasiões anteriores. A partir da velocidade incidente, chega-se ao duplo pulso aproximado da Figura 6.18, representativo da pressão crítica sobre o condutor. Nele, considera-se a pressão de

vento atuando apenas na região do núcleo. O pico é de 0,74 em relação à pressão resultante da incidência do vento máximo horizontal que caracteriza o tornado, $V_{\max}$.

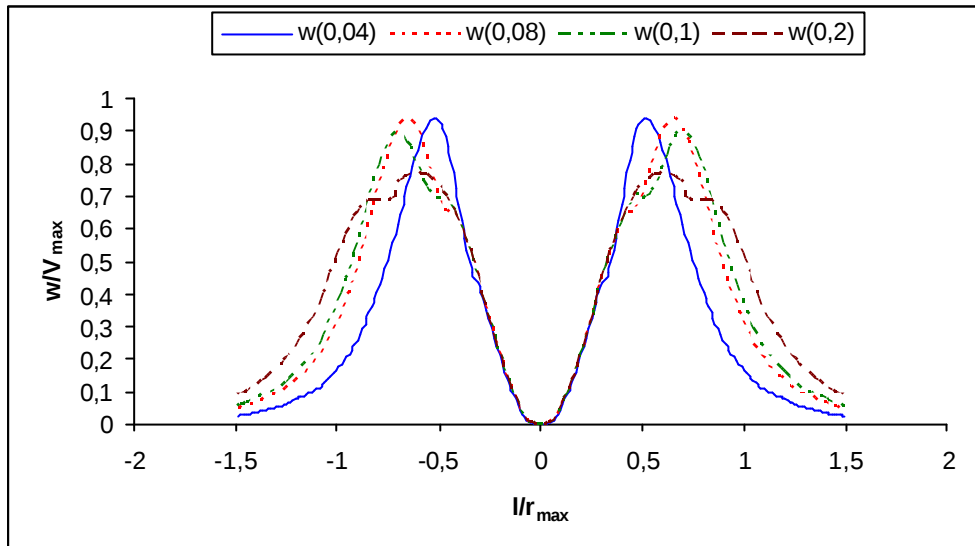


Figura 6.17 – Velocidade vertical ao longo do cabo para diferentes valores de z/δ_0

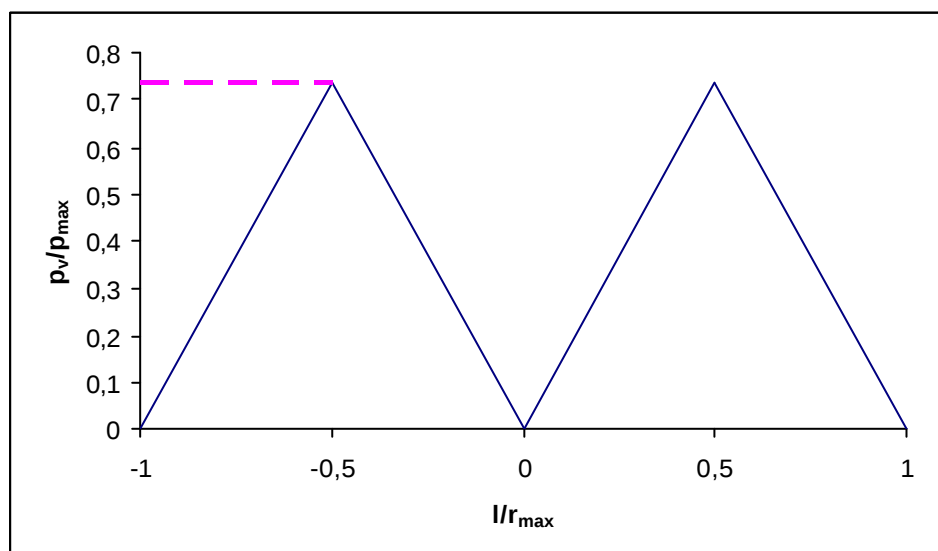


Figura 6.18 – Perfil aproximado da pressão vertical tornádica sobre cabos condutores e pára-raios

A velocidade vertical de projeto a tornados no cabo, $V_{PV_{\text{cabo}}}$, pode então ser calculada a partir da área sob o gráfico da Figura 6.18:

$$\rho V_{PVcabo}^2 = \rho \frac{0,74 V_{max}^2}{2} \quad (6.6)$$

De onde, tem-se:

$$V_{PVcabo} \sim 0,6 V_{max} \quad (6.7)$$

A velocidade calculada leva em conta apenas a região do cabo. Corrigindo-se para o vão de vento da linha, l_v , obtém-se a expressão final:

$$V_{PVcabo} = 0,6 \left(\frac{r_{max}}{l_v} \right)^{0,5} V_{max} \quad (6.8)$$

Valores de r_{max} para tornados são bastantes variáveis. Praticamente, não há, na literatura, correlações com outros parâmetros associados ao fenômeno. Sugere-se $r_{max} = 200$ m para uso na eq. (6.8), valor que se julga representativo de um limite superior para a dimensão tornádica.

6.3 Interação entre ações horizontais e verticais

Para a determinação das situações críticas de projeto a tornados, é importante verificar como as ações horizontais e verticais relacionam-se entre si, já que atuam simultaneamente no alvo estrutural. Como exemplo, para visualização dessa interação, mostram-se as forças horizontais e verticais obtidas para diferentes posições da torre SA-50 nas Figuras 6.19 a 6.21. Para as ações horizontais, toma-se a face transversal do modelo e adota-se, entre as componentes u e v , a mais crítica; assume-se ainda $\beta = 0$. O tornado é o F3 descrito em 4.1.

O comportamento geral das forças é semelhante, inclusive a magnitude, exceto para a situação onde $D/r_{max} = 1$. Essa situação (por inferência, em posições próximas à fronteira do núcleo) revela uma hipótese de projeto que necessita ser considerada: atuação apenas de vento horizontal, sem ação vertical, o que leva efeitos de compressão mais expressivos. O pico de 100 kN para a força vertical no

exemplo considerado (Figura 6.21) representa apenas cerca de 7% das forças verticais atuantes nas fundações por conta do momento de tombamento causado pelo vento horizontal. Como se observa também, outra situação de projeto é a de ventos horizontais e verticais máximos atuando simultaneamente.

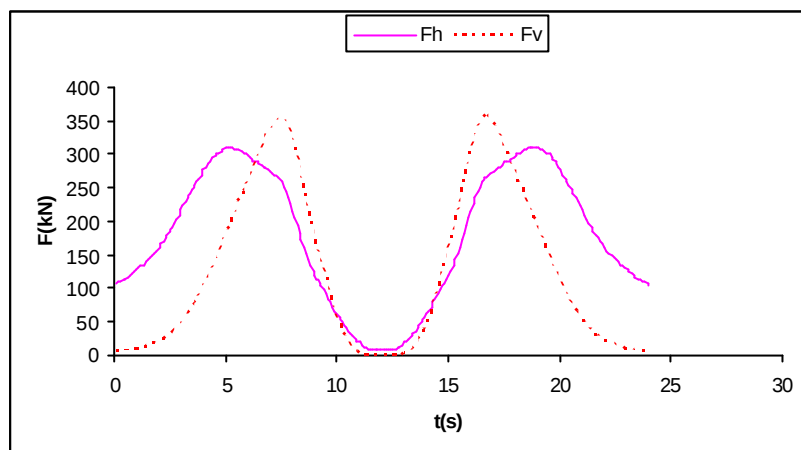


Figura 6.19 – Forças globais horizontais e verticais, $D/r_{\max} = 0$

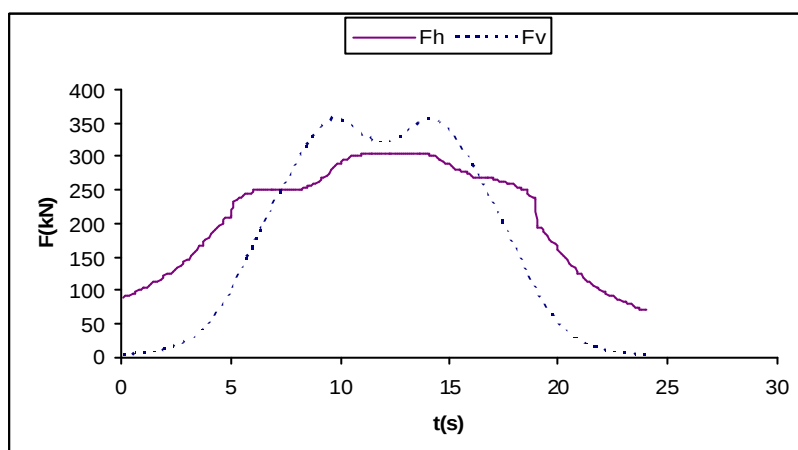


Figura 6.20 - Forças globais horizontais e verticais, $D/r_{\max} = 0,5$

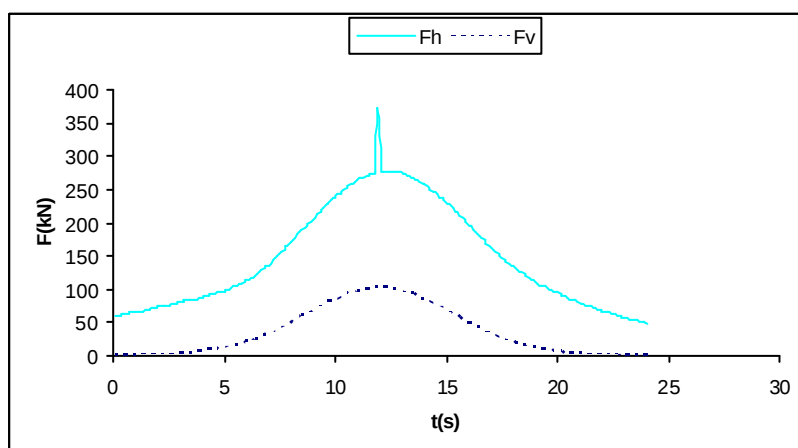


Figura 6.21 – Forças globais horizontais e verticais, $D/r_{\max} = 1$

6.4 Estudos complementares

6.4.1 Eixo material *versus* corpo extenso

Critica-se, neste item, a simplificação de eixo material das torres de transmissão, adotada nas análises realizadas. Sabe-se que, para estruturas fechadas, tal simplificação não conduz a discrepâncias significativas para a estimativa de efeitos globais (Pecin, 2006). Na Figura 6.22, são mostradas as razões entre as forças globais verticais obtidas com as metodologias de eixo material e corpo extenso.

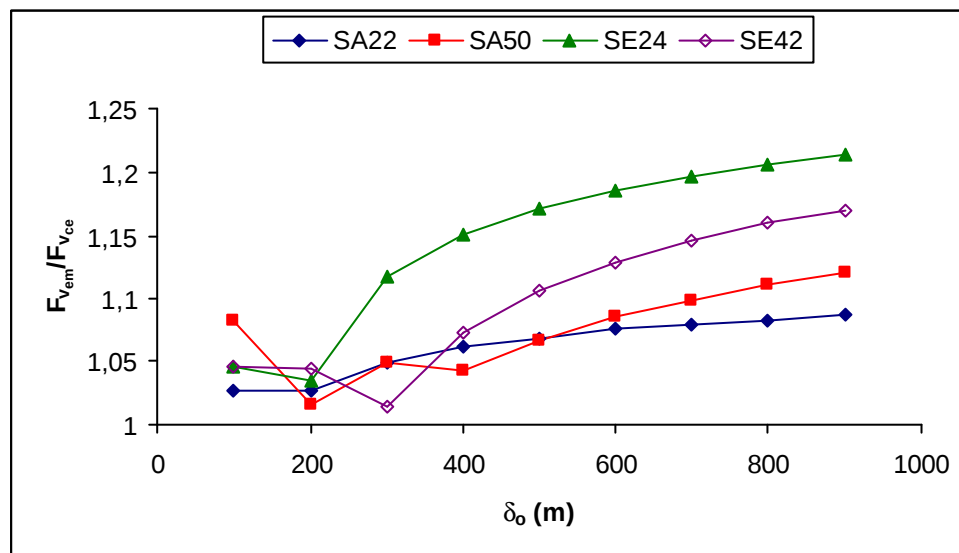


Figura 6.22 – Relação entre forças globais verticais de eixo material e corpo extenso

Tal razão é sempre superior a 1, pois, para o modelo de campo de vento adotado, a força global vertical máxima sobre a estrutura é obtida quando se toma a mesma como eixo material e se faz $D/r_{max} = 0$. Portanto, tal análise é sempre a favor da segurança em relação ao *lift* (força vertical ascendente). Como se nota, a razão entre as forças calculadas pelos dois métodos chega a cerca de 1,2.

Na Figura 6.23, mostram-se as relações entre as forças cortantes globais obtidas com metodologias de eixo material e corpo extenso para seis direções críticas. As relações entre os momentos globais são visualizadas na Figura 6.24.

Considera-se que o tornado atue na face transversal dos modelos, o que resulta em momentos de torção mais elevados, e se faz ainda $\delta_0 = 100$ m.

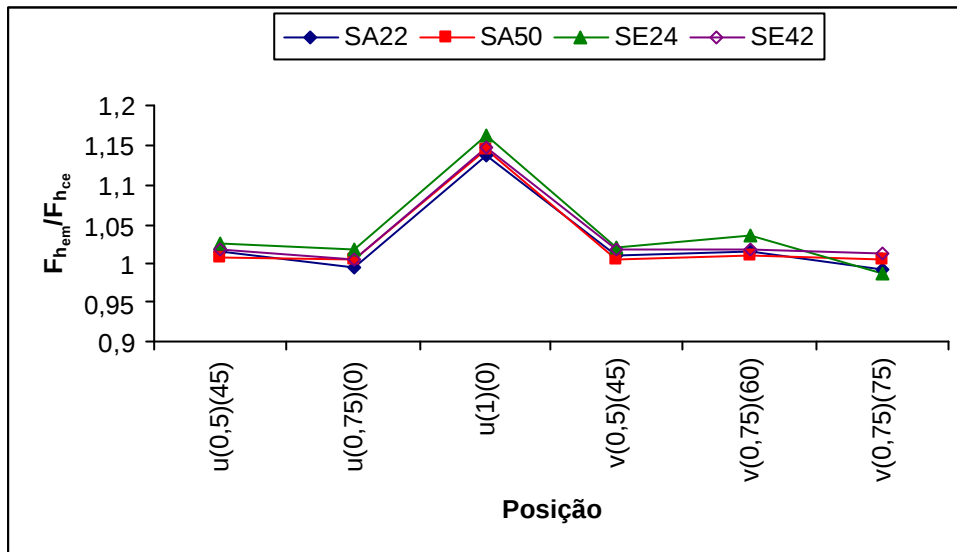


Figura 6.23 – Relação entre forças cortantes globais de eixo material e corpo extenso

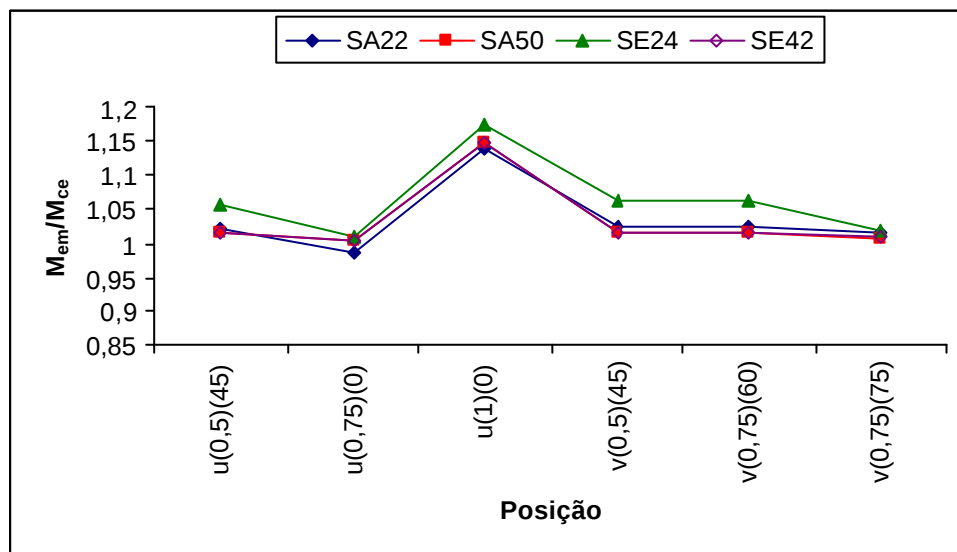


Figura 6.24 - Relação entre momentos globais de eixo material e corpo extenso

As relações são próximas à unidade. Constitui exceção a direção $u(1)(0)$, cuja razão é em torno de 1,15. Esse fato é natural e relaciona-se com situações onde $D/r_{\max} = 1$. Nessa condição, parte do modelo é atingida e parte não atingida pelo núcleo tornádico em um instante de ações horizontais intensas, causando a discrepância.

Opta-se, nesta metodologia, por desprezar essas diferenças e adotar a abordagem de eixo material, mais simples e a favor da segurança na maioria dos casos. Deste modo, termina-se ainda por balancear, para posições próximas à fronteira do núcleo, o efeito de se considerar a ação global na face crítica da torre em detrimento do efeito global resultante máximo (vide Figuras 6.1 e 6.2).

No entanto, para prosseguir-se com essa simplificação, torna-se necessária uma investigação sobre a magnitude do momento de torção negligenciado na abordagem de eixo material. Tal momento constitui, de fato, o único fator importante não levado em conta nessa abordagem, devendo ser acrescentado às outras solicitações tornádicas na torre. Para visualização dessa ação, apresentam-se na Figura 6.25, como exemplo, os momentos de torção atuantes na torre SA50 durante a passagem do tornado F3 descrito na seção 4.1, para diferentes posições.

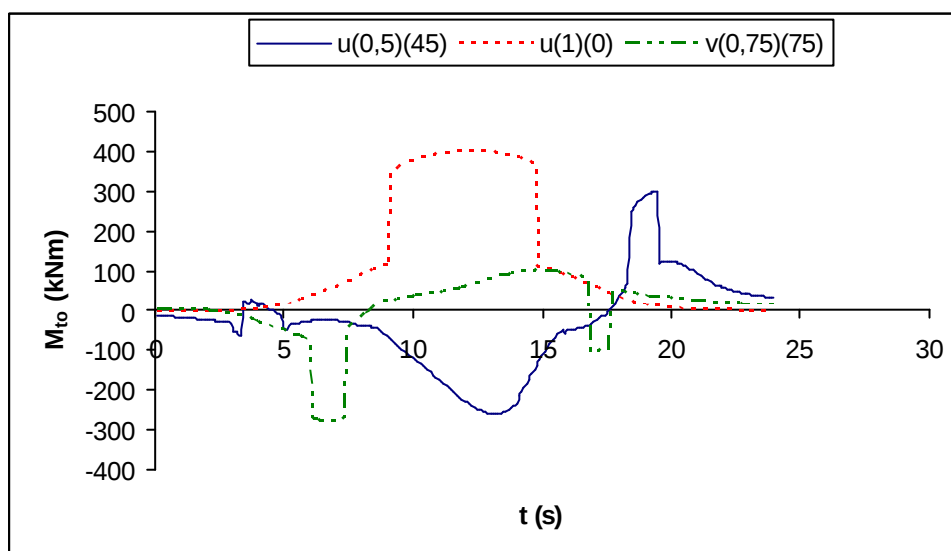


Figura 6.25 – Momentos globais de torção no modelo SA50

Um aspecto interessante da física do problema fica evidenciado. Os picos dos momentos torçores ocorrem quando parte da torre encontra-se no núcleo e parte fora desse. Inclusive, na fronteira do mesmo ($D/r_{\max} = 1$), a situação é mais crítica, como se nota. O momento de torção máximo, para esta torre, é da ordem de 400 kNm, o que corresponde a um incremento das forças horizontais nas fundações de cerca de 24 kN.

Na Figura 6.26, apresentam-se as relações entre a força horizontal resultante do momento de torção e a força cortante global para as seis direções críticas anteriormente consideradas.

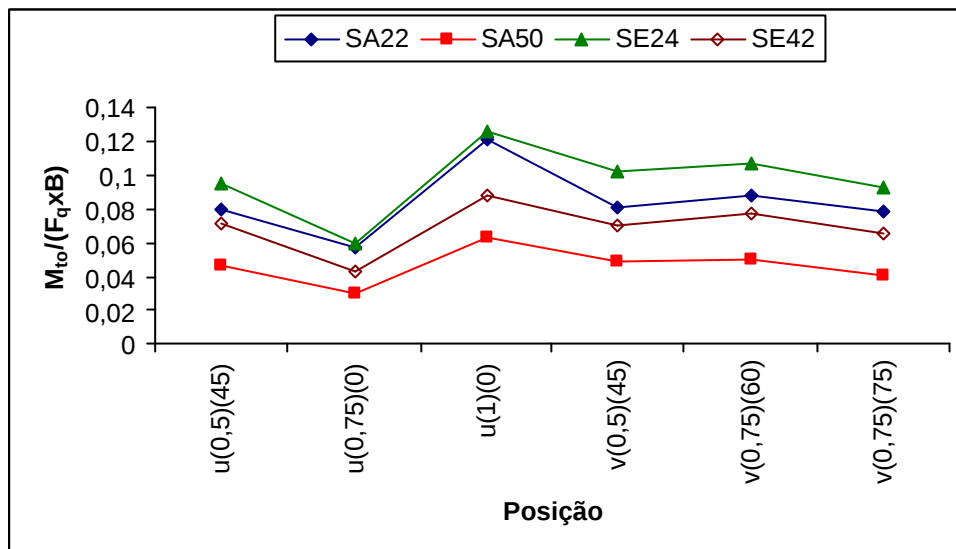


Figura 6.26 – Relação entre força horizontal de torção e força cortante global

Os maiores efeitos ocorrem para $D/r_{\max} = 1$, por motivo já exposto. Os picos atingem aproximadamente 0,12. Deste modo, recomenda-se a adoção de um momento de torção nas torres de transmissão projetadas a tornados, M_{pto} dado pela expressão:

$$M_{pto} = 0,12BF_q \quad (6.9)$$

F_q é a força cortante global na face considerada em projeto e B é a largura dessa face – para as torres autoportantes, toma-se a largura da base; para as estaiadas, sugere-se a dimensão da parte superior do módulo de suporte da mísula.

6.4.2 Força de arrasto versus força de inércia

Nos resultados até aqui obtidos e nas análises feitas a partir desses, toma-se a força de inércia como desprezível para torres de transmissão. Neste item, visa-se formalizar tal simplificação. A partir da eq. (3.8), escreve-se a relação F_I/F_A (força de inércia em relação à força de arrasto):

$$\frac{F_I}{F_A} = \frac{\rho C_m V_c \frac{dU_{ven}}{dt}}{\frac{1}{2} \rho C_d A_{exp} U_{ven} |U_{ven}|} \quad (6.10)$$

Fazendo $C_d = C_m$, considerando apenas os módulos das forças e chamando $e_m = V_c/A_{exp}$ (espessura média), tem-se:

$$\frac{F_I}{F_A} = 2e_m \frac{\frac{dU_{ven}}{dt}}{U_{ven}^2} \quad (6.11)$$

Como se nota, a relação entre as forças de inércia e arrasto é proporcional à espessura média do modelo. Na Figura 6.27, visualiza-se a relevância da parcela de inércia em função da espessura média do modelo estrutural.

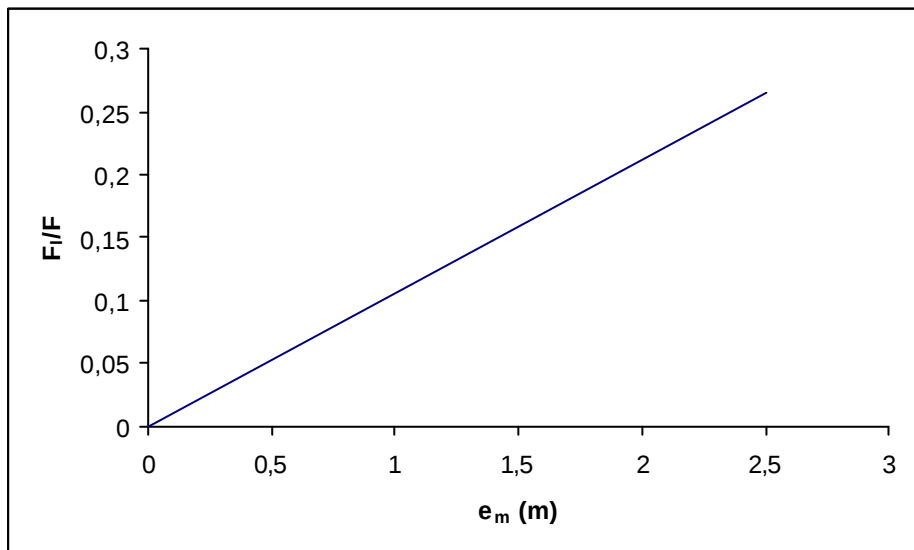


Figura 6.27 - Relevância da força de inércia em função da espessura média da estrutura

O resultado é obtido considerando-se os módulos das forças resultantes de arrasto e inércia em uma torre simétrica quando $D/r_{max} = \beta = 0$. Toma-se a envoltória de um conjunto de análises para diferentes valores de V_{max} .

No caso das barras das torres de transmissão analisadas, a espessura média varia entre aproximadamente 6 e 24 mm, o que justifica a consideração apenas da força de arrasto tornádica.

6.4.3 Análise estática *versus* análise dinâmica

Os resultados apresentados nas seções 5.3 e 5.4 indicam, em termos gerais, que a resposta de torres de transmissão às ações tornádicas é predominantemente estática. Por essa razão, a metodologia proposta ao longo deste capítulo desenvolve-se a partir dessa premissa. Neste item, critica-se tal simplificação através de uma análise da influência da flexibilidade dos modelos estruturais em função de parâmetros associados ao problema.

A idéia é a proposição de um espectro de resposta a tornados. Tal espectro independe da intensidade do tornado, pois as parcelas de velocidade do mesmo são proporcionais a $T_{\max}$ (eqs. 3.2 a 3.4). Inclui-se a velocidade de translação, tomada como $T_{\max}/6$ (Dutta et al, 2002). No entanto, diversos parâmetros envolvidos na análise conduzem a espectros de resposta diferentes. Como exemplos, citam-se δ_0 , $D/r_{\max}$, tipo e altura de torre, efeito estrutural observado, etc. Nesse contexto, tendo em vista o objetivo de proposição de um espectro de resposta para projeto a tornados, tomam-se as seguintes atitudes: opta-se pela adoção dos modelos SA50 e SE42 como padrões para os estudos realizados; toma-se $\delta_0 = 100$ m, compatível com solicitações críticas; e define-se a força cortante global como efeito a ser analisado. Nas Figuras 6.28 e 6.29, encontram-se os resultados obtidos para os modelos em diferentes posições. Apesar de o espectro se referir à força cortante global, conforme mencionado, os valores de $F_{A_{\max}}$ mostrados relacionam-se à velocidade horizontal máxima de vento tornádico, $V_{\max}$, de modo a se adequar ao contexto da metodologia estudada.

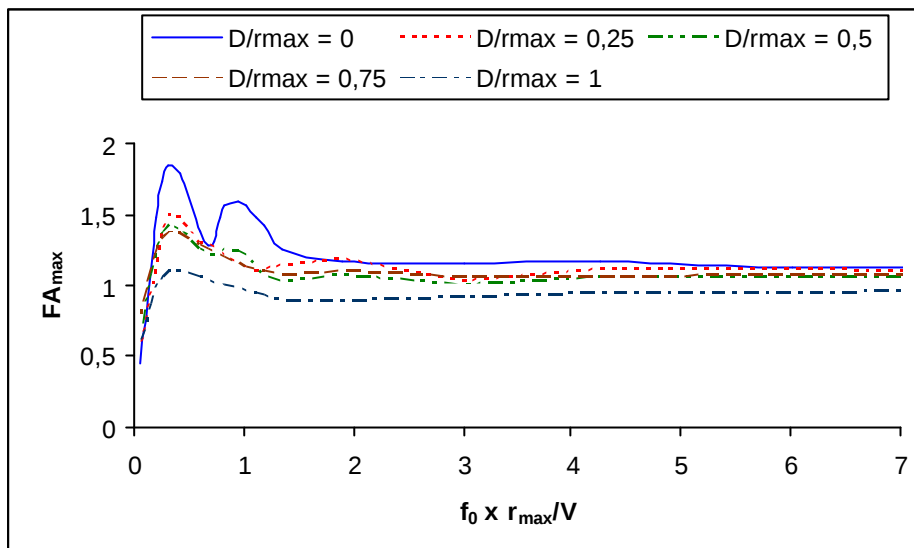


Figura 6.28 – Espectros de resposta a tornados para o modelo SA50

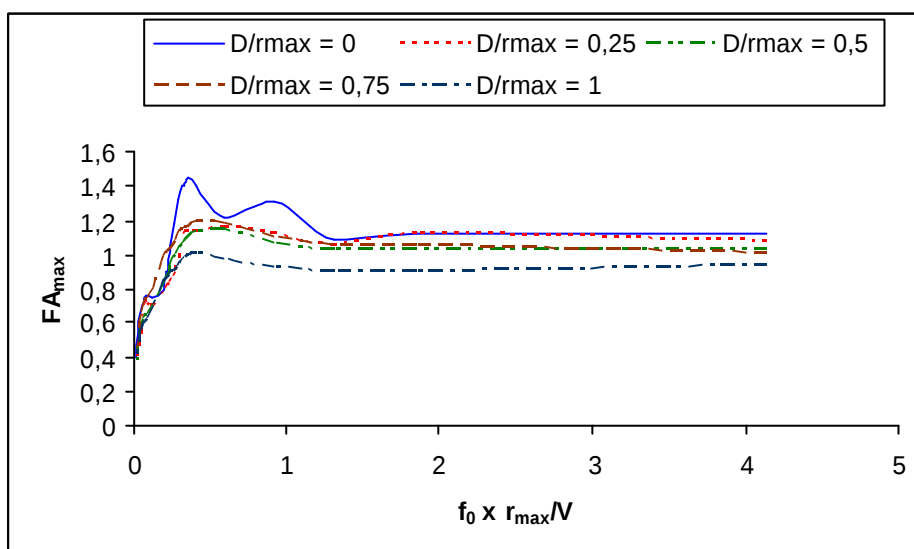


Figura 6.29 - Espectros de resposta a tornados para o modelo SE42

Ressalta-se que a duração da ação é proporcional ao parâmetro $r_{\max}/V$ para qualquer valor de $D/r_{\max}$. Sugere-se, no contexto da metodologia proposta, a utilização do espectro de resposta obtido para o modelo SA50 na posição $D/r_{\max} = 0$, situação que se revela crítica aos efeitos de flexibilidade estrutural. Tal espectro é mostrado isoladamente na Figura 6.30.

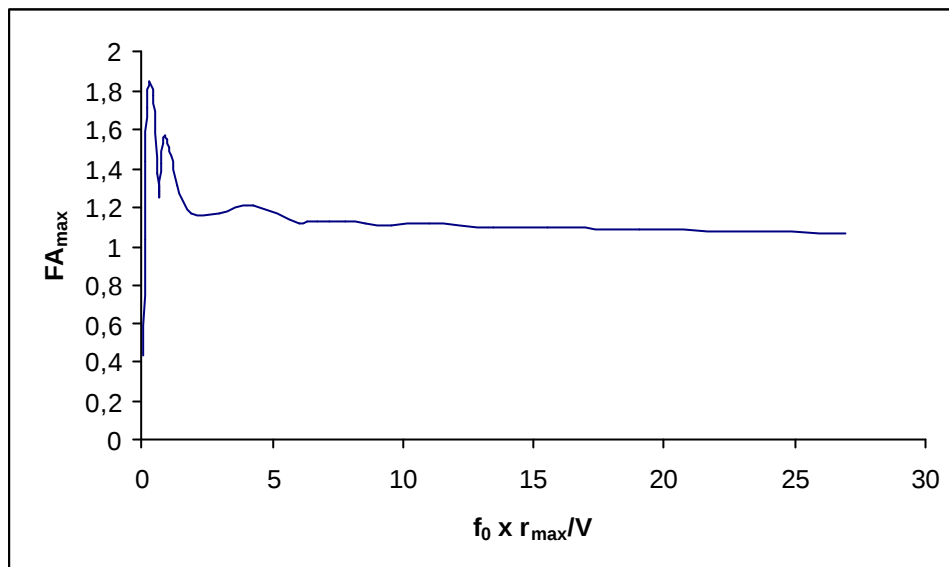


Figura 6.30 – Espectro de resposta para projeto a tornados

Notam-se dois picos separados por um vale, a exemplo do espectro apresentado seção 5.2. Ademais, o mesmo parece-se com o observado para um pulso senoidal. O primeiro pico apresenta $FA_{\max}$ pouco superior a 1,8 e o segundo é da ordem de 1,6. Na região de depressão, observada entre eles, $FA_{\max} \sim 1,3$.

Como já dito, a dimensão do núcleo tornádico, $r_{\max}$, é incerta. Não há, na literatura, correlações estritas desse com outros parâmetros, como a velocidade horizontal máxima, $V_{\max}$. A velocidade de translação, V , também não pode ser considerada dependente estritamente de outros parâmetros, a despeito de algumas correlações serem propostas na literatura. Baseando-se em alguns tornados reportados, sugerem-se, a título de referência, alguns limites para o parâmetro $r_{\max}/V$ em função da classificação na Escala Fujita, apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetro $r_{\max}/V$

Escala	$r_{\max}/V$ (s)
F0	40-120
F1	20-60
F2	8-24
F3	4-12
F4	2-8
F5	1-5

6.5 Síntese e exemplo

Em suma, as ações de projeto a tornados nas torres de transmissão são escritas, na sua forma mais geral, conforme as expressões seguintes:

$$\begin{aligned}
 V_{PH} &= 0,9V_{\max}FA_{\max} \\
 V_{PHcabo} &= V_p \\
 V_{PV} &= 0,9V_{\max} \\
 V_{PVCabo} &= 0,6\left(\frac{r_{\max}}{l_v}\right)^{0,5}V_{\max} \\
 M_{pto} &= 0,12BF_q
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

Os termos são definidos nas seções anteriores. Considerando o exposto, especialmente na seção 6.3, onde se analisa a interação entre as componentes horizontal e vertical do vento tornádico, e levando-se em conta ainda as situações críticas de solicitação de torres de transmissão do ponto de vista estrutural, propõem-se onze hipóteses para o projeto a tornados:

Hipótese 1: vento tornádico transversal e vertical atuantes na torre, tomada isoladamente;

Hipótese 2: vento tornádico longitudinal e vertical atuantes na torre, tomada isoladamente;

Hipótese 3: vento tornádico a 45° e vertical atuantes na torre, tomada isoladamente;

Hipótese 4: vento tornádico transversal atuante na torre e nos outros elementos da linha de transmissão;

Hipótese 5: vento tornádico longitudinal atuante na torre e nos outros elementos da linha de transmissão;

Hipótese 6: vento tornádico a 45° atuante na torre e nos outros elementos da linha de transmissão;

Hipótese 7: vento tornádico transversal e vertical atuantes na torre e nos outros elementos da linha de transmissão;

Hipótese 8: vento tornádico longitudinal e vertical atuantes na torre e nos outros elementos da linha de transmissão;

Hipótese 9: vento tornádico a 45° e vertical atuantes na torre e nos outros elementos da linha de transmissão.

As duas outras se referem exclusivamente às torres estaiadas, visando a ocorrências críticas de forças de tração nos mastros:

Hipótese 10: vento tornádico vertical atuante na torre, tomada isoladamente;

Hipótese 11: vento tornádico vertical atuante na torre e nos outros elementos da linha de transmissão.

Ressalta-se que as ações críticas nos condutores podem ocorrer simultaneamente às ações críticas nas torres, já que independem de $D/r_{\max}$ (considerando um ponto único de fixação dos cabos nas estruturas). As hipóteses previstas contemplam essa condição. Os ventos tornádicos transversais e longitudinais são acompanhados de momentos de torção na base dos modelos, conforme demonstrado em 6.4.1.

Como exemplo, tome-se a torre SA50 (Figura 4.1), que deve ser projetada para resistir a um tornado F3 médio. Sua base é de, aproximadamente, 16 x 12 m. A área das barras exposta ao vento transversal (face longitudinal) é de 40,63 m² e ao vento longitudinal (face transversal) é de 45,44 m². Utilizando a Escala Fujita Aprimorada (Tabela 2.3), tem-se que $V_{\max} = 75$ m/s. O modelo possui frequência fundamental, f_0 , igual a 2,48 Hz. Com base na Tabela 6.1, adota-se $r_{\max}/V = 8$ s (valor médio). Tem-se então $f_0 \times r_{\max}/V \sim 20$. Isso leva a um $FA_{\max} \sim 1,1$ (Figura 6.30). Assim, escreve-se para este exemplo:

$$\begin{aligned} V_{PH} &= 0,9 \times 75 \times 1,1 \sim 74,3 \text{ m/s} \\ V_{PV} &= 0,9 \times 75 = 67,5 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (6.13)$$

A carga de vento é calculada utilizando-se a expressão preconizada pela norma IEC 60826/00:

$$A_t = q_0 G_T (1 + 0,2 \sin^2 2\alpha) (S_{T1} C_{XT1} \cos^2 \alpha + S_{T2} C_{XT2} \sin^2 \alpha), \text{ onde:} \quad (6.14)$$

q_0 – pressão dinâmica de referência ($=0,5\rho V_p^2$);

G_T – fator de vento combinado;

S_{T1} – área líquida da face longitudinal;

S_{T2} – área líquida da face transversal;

C_{XT1} – coeficiente de arrasto da face longitudinal;

C_{XT2} – coeficiente de arrasto da face transversal;

α - ângulo de incidência do vento com a face longitudinal (0 para vento transversal e 90° para vento longitudinal).

Faz-se $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (massa específica do ar) e obtém-se a força cortante global para as direções transversal, longitudinal e a 45° (F_{qt} , F_{ql} , F_{q45}). Como aproximação, neste exemplo, adota-se um coeficiente de arrasto uniforme para a torre de 2,7.

$$\begin{aligned} F_{qt} &= 0,5 \times 1,2 \times (74,3)^2 \times 2,7 \times 40,63 \sim 363362 \text{ N} \sim 363 \text{ kN} \\ F_{ql} &= 0,5 \times 1,2 \times (74,3)^2 \times 2,7 \times 45,44 \sim 406379 \text{ N} \sim 406 \text{ kN} \\ F_{q45} &= 0,5 \times 1,2 \times (74,3)^2 \times 2,7 \times 1,2 \times (40,63 \times 0,5 + 45,44 \times 0,5) \\ &\sim 461844 \text{ N} \sim 462 \text{ kN} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Os momentos de torção são então calculados:

$$\begin{aligned} M_{Ttrans} &= 0,12 \times 12 \times 363 = 523 \text{ kNm} \\ M_{Tlong} &= 0,12 \times 16 \times 406 = 780 \text{ kNm} \\ M_{T45} &= 0,12 \times (12^2 + 16^2)^{1/2} \times 462 = 1109 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (6.16)$$

As hipóteses 1,2 e 3 podem então ser representadas (omitem-se as cargas permanentes):

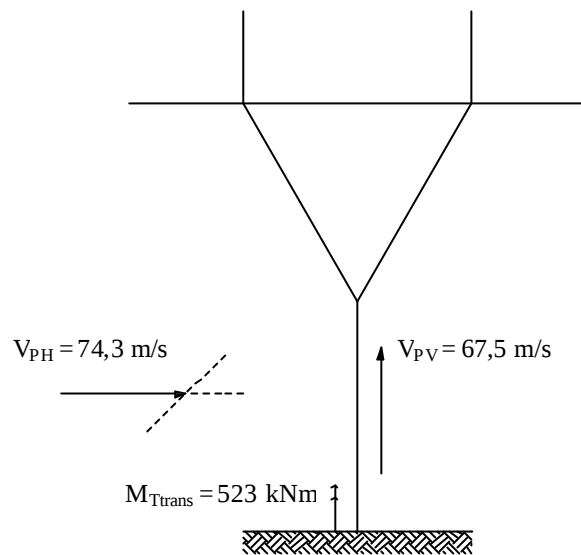


Figura 6.31 – Hipótese de projeto 1

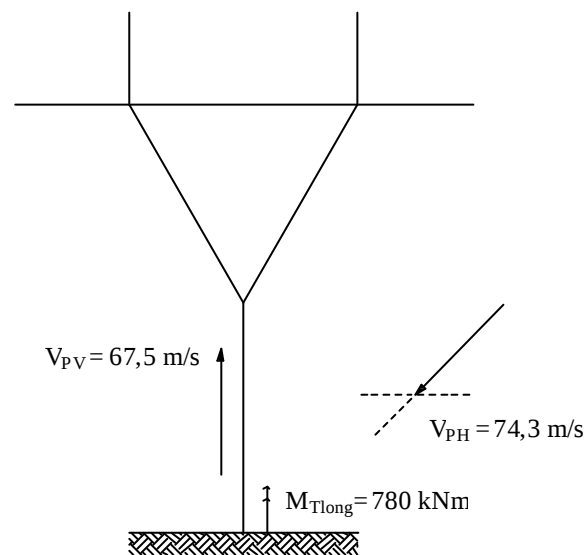


Figura 6.32 – Hipótese de projeto 2

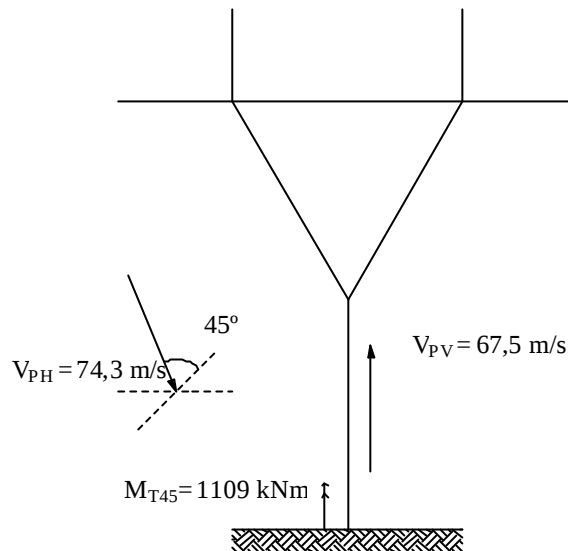


Figura 6.33 – Hipótese de projeto 3

Para os casos de carregamento referentes à torre com os outros elementos da linha, necessária é a determinação da nova frequência fundamental, f_0 , resultante do acréscimo de massa ao sistema estrutural. No exemplo em questão, tal frequência cai a 0,83 Hz. O novo valor de $f_0 \times r_{\max}/V$ é, portanto, 6,63. Do espectro da Figura 6.30, obtém-se $FA_{\max} \sim 1,15$. Ainda, tem-se que o vento horizontal nos cabos é o vento usual de projeto. Assume-se $V_p = 30$ m/s. Portanto:

$$\begin{aligned} V_{PH} &= 0,9 \times 75 \times 1,15 = 77,6 \text{ m/s} \\ V_{PHcabo} &= 30 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (6.17)$$

Com essa nova velocidade horizontal de projeto, calculam-se os momentos torçores, do mesmo modo que mostrado nas eqs. (6.15) e (6.16), obtendo-se:

$$\begin{aligned} M_{Ttrans} &= 571 \text{ kNm} \\ M_{Tlong} &= 853 \text{ kNm} \\ M_{T45} &= 1208 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (6.18)$$

Chega-se então às hipóteses 4, 5 e 6:

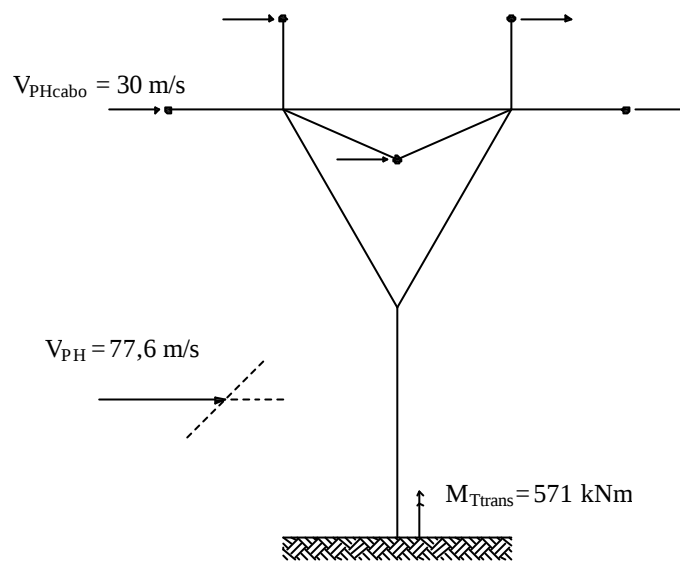


Figura 6.34 – Hipótese de projeto 4

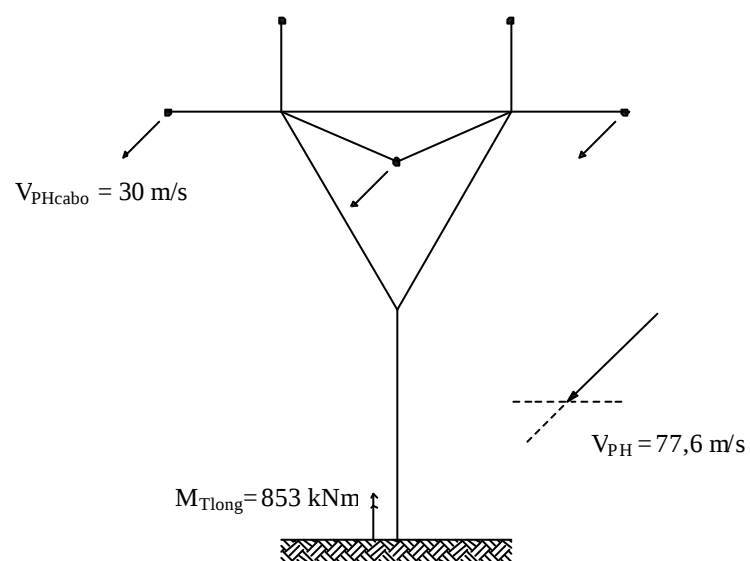


Figura 6.35 – Hipótese de projeto 5

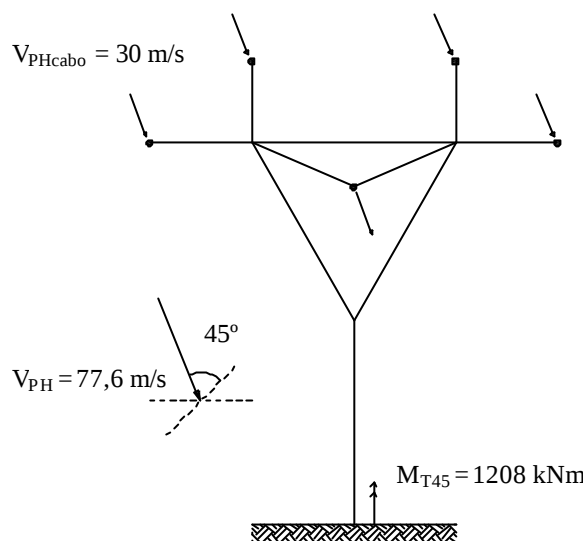


Figura 6.36 – Hipótese de projeto 6

Calculam-se as ações verticais, considerando também os outros elementos da linha. Tomando-se o vão de vento, l_v , igual a 800 m:

$$\begin{aligned} V_{PV} &= 0,9 \times 75 = 67,5 \text{ m/s} \\ V_{PVcabo} &= 0,6 \times (200/800)^{0,5} \times 75 = 22,5 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (6.19)$$

Representam-se, por fim, as hipóteses 7, 8 e 9:

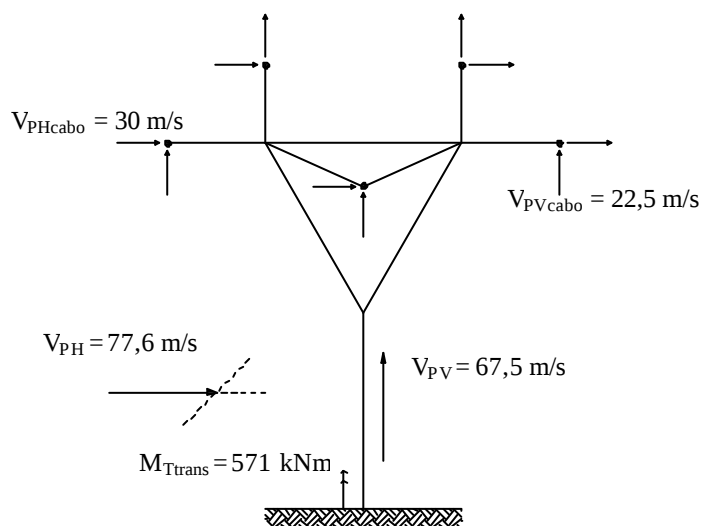


Figura 6.37 – Hipótese de projeto 7

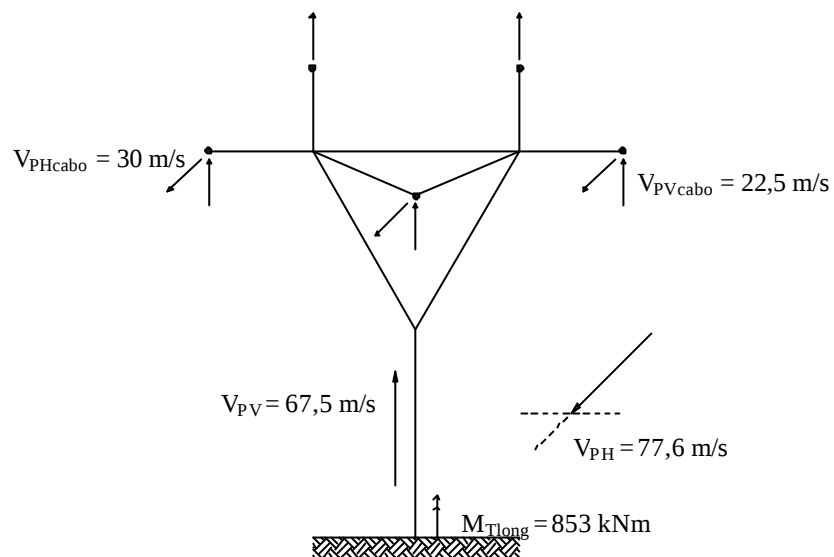


Figura 6.38 – Hipótese de projeto 8

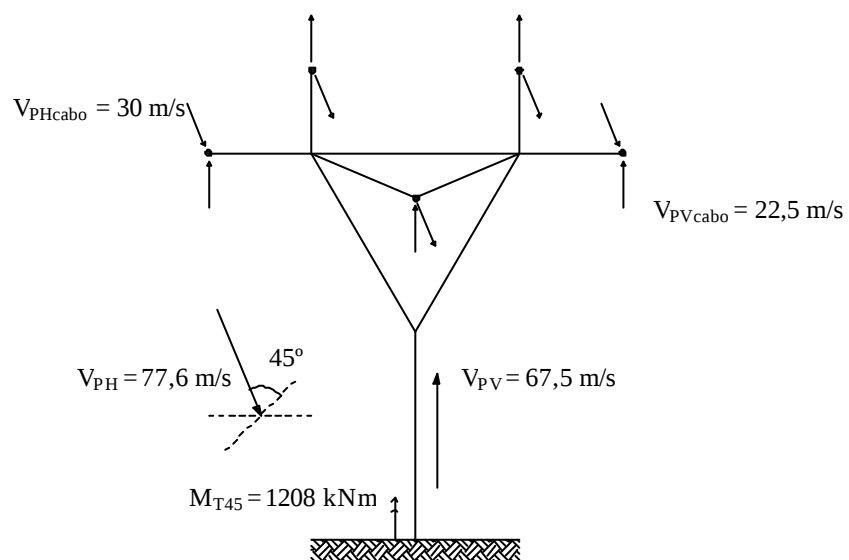


Figura 6.39 – Hipótese de projeto 9