

4

Tornado de Projeto

O tornado de projeto é admitido, para fins quantitativos, com as seguintes características [15]:

- Tornado do tipo F3-médio;
- Velocidade máxima de $233\text{km/h} = 64,72\text{m/s}$;
- Velocidade translacional (V) de $1/5 \times 233 = 46,6\text{km/h} = 12,9\text{m/s} \approx 13\text{m/s}$;
- Velocidade tangencial máxima (T_{\max}) acima da camada limite de $4/5 \times 233 = 186,4\text{km/h} = 51,8\text{m/s} \approx 52\text{m/s}$;
- Raio máximo (r_{\max}) onde ocorre a velocidade tangencial máxima de $45,7\text{m} \approx 46\text{m}$ e
- Densidade do ar ρ de $1,226\text{kg/m}^3$.

A espessura da camada limite (δ_0) é tomada como 460m ; esse valor é adotado com base na proposta de Wen [49], sobre o tornado de Dallas, EUA, em 1957 [33], que também era um tornado do tipo F3.

Além disso, está sendo considerada como situação crítica o centro do tornado alinhado com o centro da estrutura, $\beta = 0$, sendo β o ângulo entre a trajetória do tornado e o eixo x . E, para a estrutura prismática, uma das faces perpendicular à trajetória do tornado, $D = 0$, sendo D a distância do centro da estrutura a essa trajetória.

Para todas as velocidades calculadas estão sendo desprezadas as dimensões em planta da estrutura e estão sendo variadas apenas as alturas. A distância entre os centros do tornado e da estrutura no início da análise, S_0 , está sendo definida como três vezes o valor do r_{\max} , o que resulta em $S_0 = 138\text{m}$, sendo assim, o tempo total da análise, $t_{\max} = 2 \times S_0/V = 21,23\text{s}$. Para maior comodidade aproximam-se os valores de S_0 para 130m e t_{\max} para 20s .

4.1

Análise dos Parâmetros

Antes de dar início ao cálculo do campo tornádico, é feito um estudo sobre a influência dos parâmetros de entrada no resultado final das velocidades.

4.1.1

Velocidade Translacional

Nas figuras 4.1 e 4.2 vêem-se as distribuições das velocidades tangencial e radial ao longo do tempo para diferentes valores de velocidade translacional. Para cada instante de tempo está sendo calculada a média das velocidades até a altura de 100m, equação 4-1:

$$\text{Média das Velocidades} = \frac{1}{100} \int_0^{100} Vel(z, t_1) dz \quad (4-1)$$

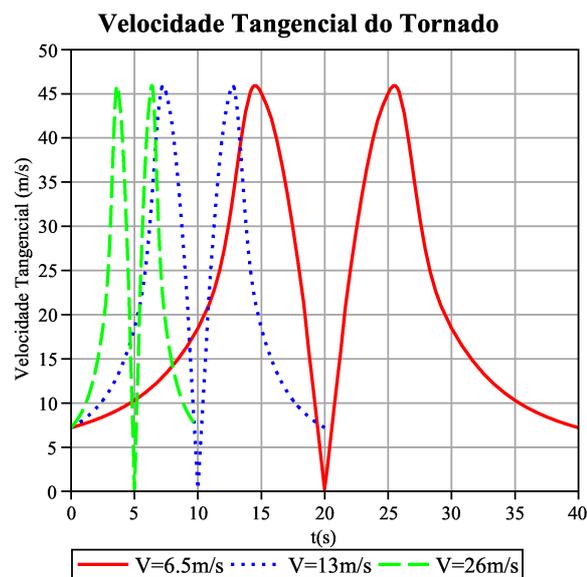


Figura 4.1: Velocidade tangencial média, para diferentes velocidades translacionais.

Percebe-se que a velocidade translacional modifica apenas o tempo que o tornado leva para atingir a estrutura com a máxima velocidade e o tempo necessário para o centro do tornado coincidir com o centro da estrutura, não alterando os valores das velocidades. Conclui-se então que qualquer variação nesse parâmetro interfere apenas no tempo total da análise.

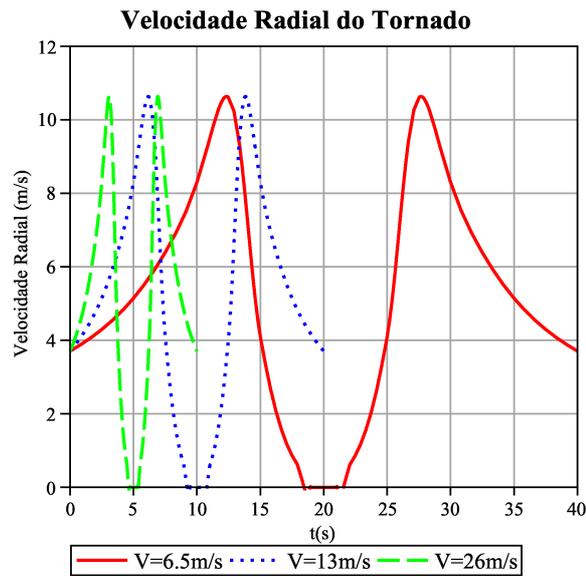


Figura 4.2: Velocidade radial média, para diferentes velocidades translacionais.

4.1.2 Velocidade Tangencial Máxima

Nas figuras 4.3 e 4.4 são mostradas as curvas das velocidades tangencial e radial médias até 100m, ao longo do tempo, para diferentes valores de T_{max} .

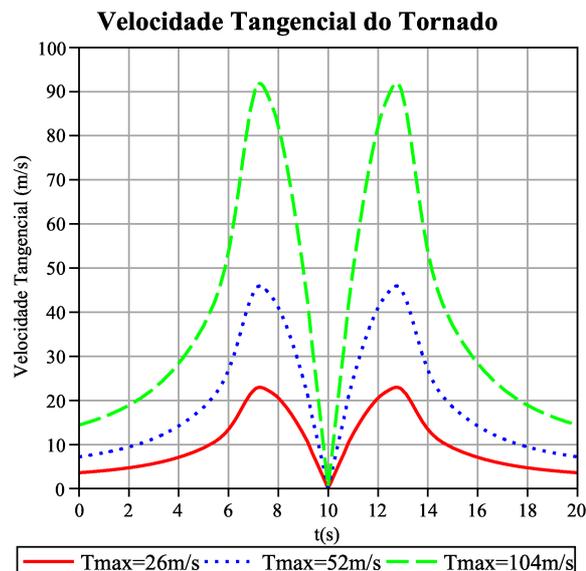


Figura 4.3: Velocidade tangencial média, para diferentes velocidades tangenciais máximas.

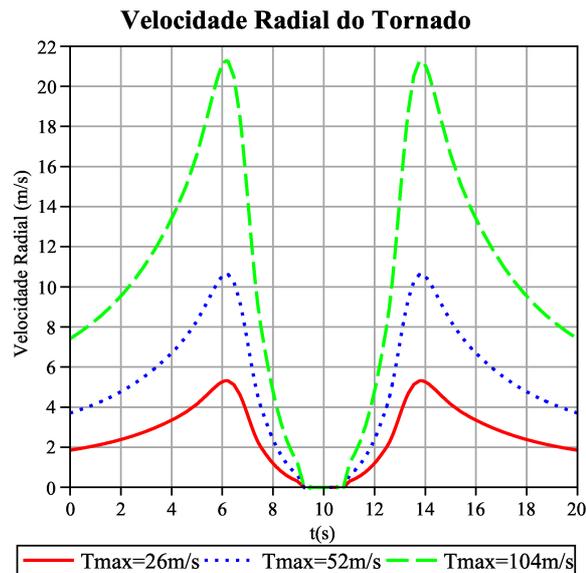


Figura 4.4: Velocidade radial média, para diferentes velocidades tangenciais máximas.

Analisando os gráficos das figuras 4.3 e 4.4, nota-se que a velocidade tangencial máxima regula a intensidade das velocidades ao longo do tempo, mantendo a mesma configuração de distribuição. Sendo assim, atribuir um valor maior na velocidade tangencial máxima significa não só valores maiores da velocidade tangencial, para todos os instantes, como também uma distribuição de velocidade radial maior.

4.1.3

Espessura da Camada Limite

Na figura 4.5, a curva exibe a fronteira da camada limite normalizado pelo parâmetro δ_0 , ao longo do afastamento r' dividido pelo valor adotado para o r_{max} . Observa-se que para um valor de $r = 3,5$, $\delta \approx \delta_0$. Ainda no mesmo gráfico, adotando um valor de $r' = r_{max}$, isto é, $r = 1$, o valor da relação δ/δ_0 é igual a 0,39. Esse valor fornece a posição da altura em relação a δ_0 , onde ocorre a descontinuidade do valor da velocidade, que passa a partir, desse ponto, a ter seu valor constante, o que pode ser comprovado no gráfico da figura 4.6, em que se tem a distribuição da velocidade radial ao longo da altura dividida pelo valor de δ_0 . Na figura 4.7 tem-se a mesma curva para a velocidade tangencial, percebe-se que o valor constante coincide com a máxima velocidade tangencial, como já era esperado pela definição de T_{max} .

Os gráficos das figuras 4.8 e 4.9 exibem as mesmas distribuições das figuras 4.6 e 4.7, porém para diferentes valores de δ_0 .

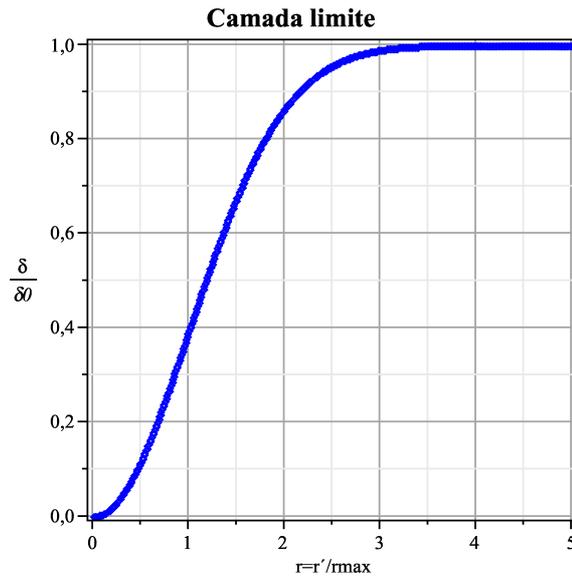


Figura 4.5: Espessura relativa da camada limite ao longo de r.

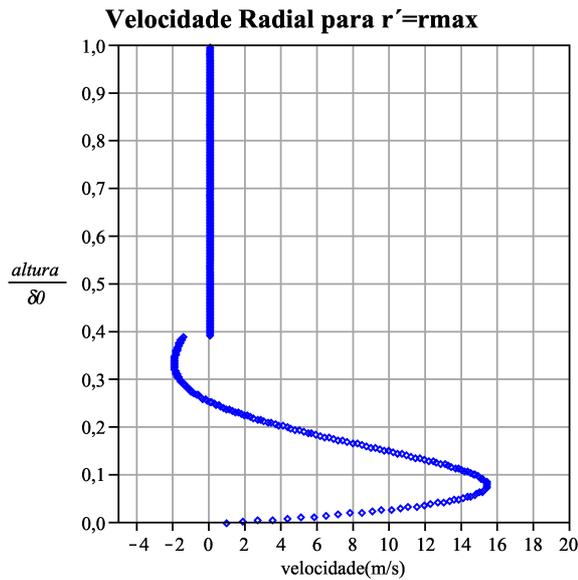


Figura 4.6: Velocidade radial ($r' = r_{max}$) ao longo da altura dividida por δ_0 .

Verifica-se que o parâmetro δ_0 não modifica os valores das velocidades, nem a forma da sua distribuição com a altura, mas sim em que posição vertical cada velocidade ocorre.

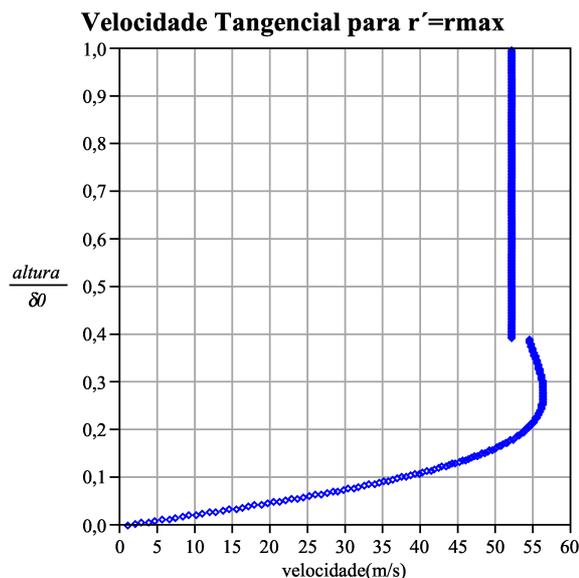


Figura 4.7: Velocidade tangencial ($r' = r_{max}$) ao longo da altura dividida por δ_0 .

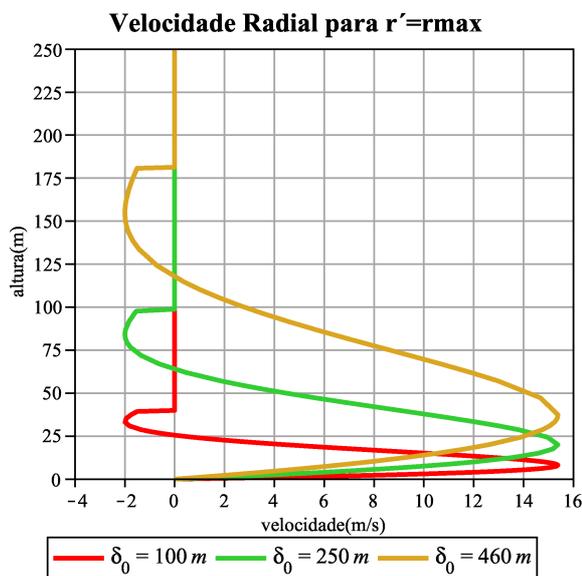


Figura 4.8: Velocidade radial ($r' = r_{max}$) ao longo da altura para diferentes valores de δ_0 .

A figura 4.10, mostra as velocidades tangenciais médias de um tornado até uma altura de 100 metros, para diferentes valores de δ_0 , ao longo do tempo. Nas três situações, as velocidades médias estão calculadas para alturas abaixo da camada limite. Nota-se que as velocidades são maiores quanto menor é o

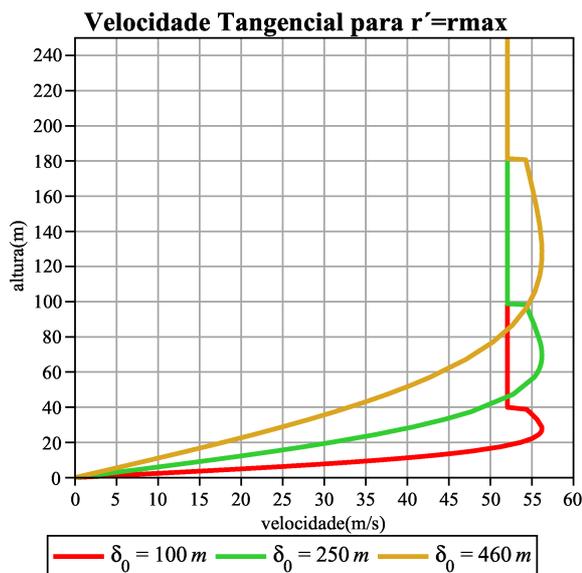


Figura 4.9: Velocidade tangencial ($r' = r_{max}$) ao longo da altura para diferentes valores de δ_0 .

valor de δ_0 . Porém, adotar valores muito pequenos de δ_0 equivale a desprezar a presença da camada limite e sobrecarregar uma estrutura que estivesse sendo atingida pelo tornado. Por isso, prefere-se manter o valor de $\delta_0 = 460\text{ m}$, pois este valor fornece uma situação real já verificada anteriormente [33].

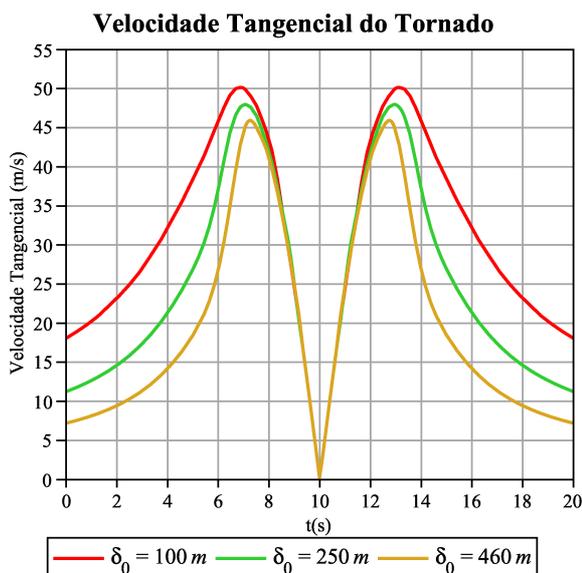


Figura 4.10: Velocidade tangencial média ao longo do tempo para diferentes valores de δ_0 .

Outro ponto relevante é que, para um mesmo intervalo de tempo, a relação entre as velocidades máxima e inicial é maior quão menor o valor de δ_0 , como pode ser visto na tabela 4.1. Sendo assim, se o tempo total de análise estiver vinculado a essa relação, quão menor o valor de δ_0 maior o tempo total de análise.

Tabela 4.1: Valores máximos e iniciais das velocidades tangenciais e sua relação para diferentes valores de δ_0 .

δ_0 (m)	VT_{max} (m/s)	VT_{ini} (m/s)	VT_{max}/VT_{ini}
100	50,1	18,0	2,7
250	47,9	11,2	4,2
460	45,9	7,2	6,3

VT_{max} é a máxima velocidade tangencial média até 100 metros ao longo do intervalos analisado na figura 4.10;

VT_{ini} é a velocidade tangencial média até 100 metros no início do processo, $t=0s$ na figura 4.10.

4.1.4 Raio Máximo

Mantendo-se ainda a idéia que $\delta \approx \delta_0$ para $r = 3,5$, o valor de r_{max} influencia a distância, em relação ao centro do tornado, para aquela camada limite chega ao seu valor máximo, como pode ser visto na figura 4.11, em que se tem a mesma curva da figura 4.5, porém para diferentes valores de r_{max} .

A figura 4.12, mostra as velocidades tangenciais médias de um tornado até uma altura de 100 metros, para diferentes valores de r_{max} , ao longo do tempo. O parâmetro r_{max} atua da mesma forma que a velocidade translacional, figura 4.7, o que significa que qualquer variação no raio máximo interfere apenas no tempo total da análise.

Sendo assim, para um mesmo valor de δ_0 , quanto maior o r_{max} , maior deve ser o intervalo de tempo da análise para se manter a mesma relação da máxima velocidade média (VT_{max}) ao longo do tempo e a velocidade inicial média (VT_{ini}).

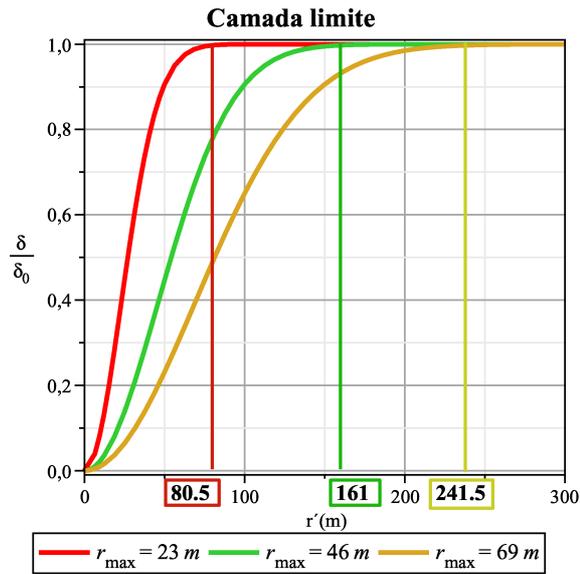


Figura 4.11: Distribuição da espessura relativa da camada limite, ao longo de r' , para diferentes valores de r_{\max} .

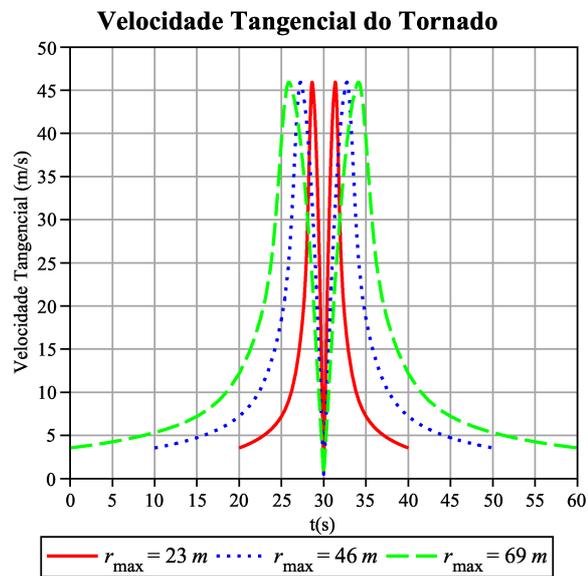


Figura 4.12: Velocidade tangencial média ao longo do tempo para diferentes valores de r_{\max} .

4.2 Velocidade do Tornado

Após o estudo dos parâmetros para o cálculo das velocidades do tornado, segue a interpretação dos valores das velocidades em relação ao ponto de análise. Considerando um ponto qualquer situado na linha da trajetória do tornado, distante de S_0 do centro do tornado, com as coordenadas localizadas de acordo com a figura 4.13, nota-se que a velocidade tangencial corresponde à velocidade na direção y no ponto em questão e a velocidade radial à velocidade na direção x . A mudança de sinal ocorre no instante em que o tornado passa pelo ponto.

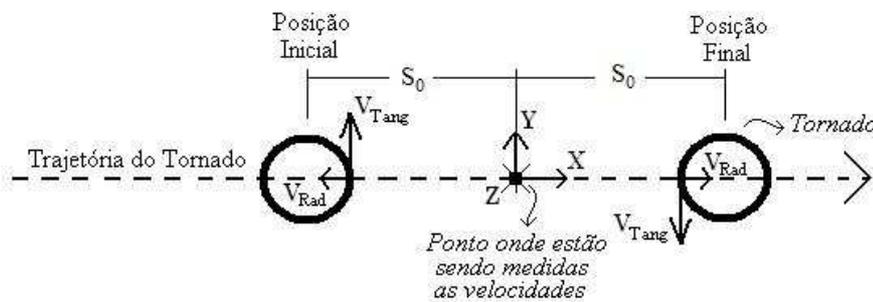


Figura 4.13: Esquema indicando a posição inicial e final do tornado em relação ao ponto de interesse.

A figura 4.14 mostra a distribuição da velocidade radial pelo tempo para diferentes posições da altura.

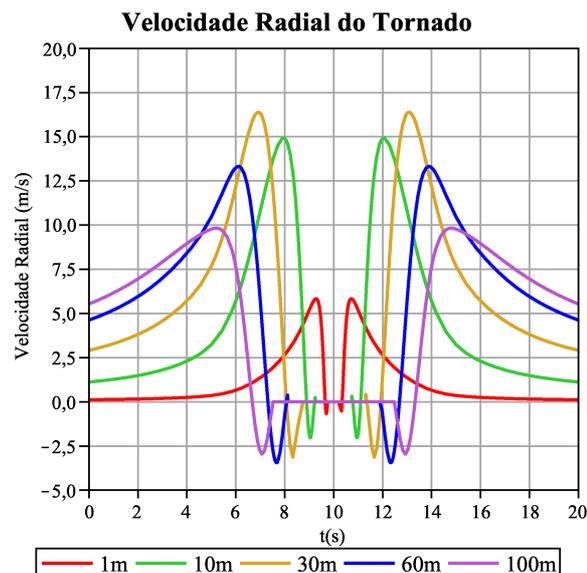


Figura 4.14: Velocidade radial para diferentes alturas.

Na figura 4.15 é possível perceber o que é mostrado na figura 4.13, que a velocidade radial transforma-se na velocidade na direção x no ponto de interesse, com a inversão de sinais antes do tornado cruzar a estrutura. Essa situação só ocorre porque a estrutura está alinhada à trajetória do tornado e porque está sendo considerado que uma das faces da estrutura está perpendicular à trajetória, senão haveria uma combinação das componentes radiais e tangenciais.

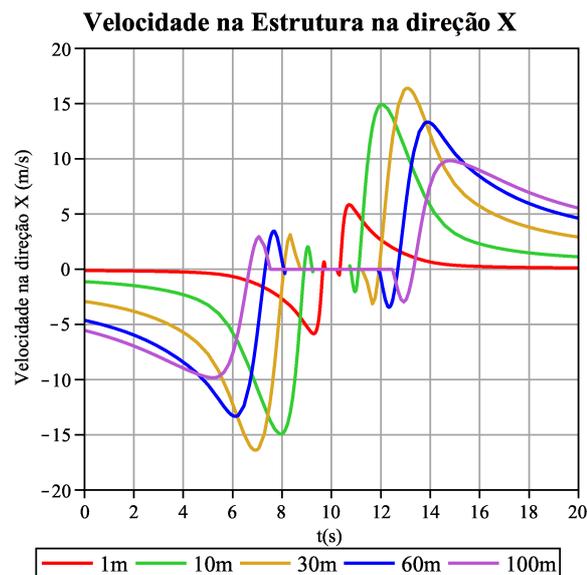


Figura 4.15: Velocidade na direção x para diferentes alturas.

O mesmo procedimento está sendo feito nas figuras 4.16 e 4.17, em que se tem a velocidade tangencial para diferentes alturas e a transformação dessas velocidades para a componente y no ponto, respectivamente.

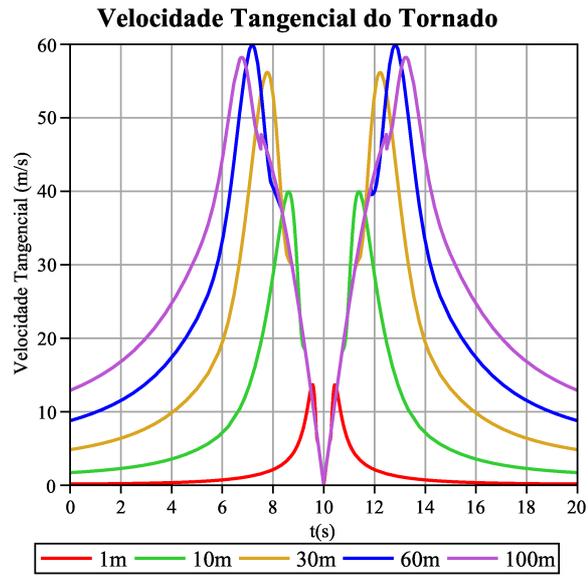


Figura 4.16: Velocidade tangencial para diferentes alturas.

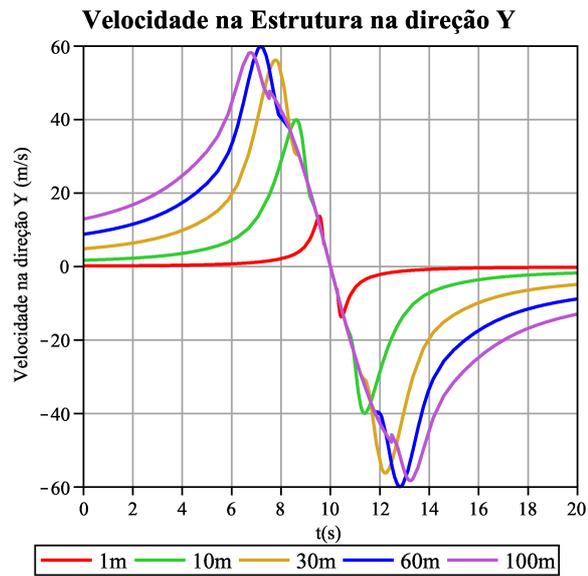


Figura 4.17: Velocidade na direção y para diferentes alturas.

No gráfico da figura 4.18 tem-se a velocidade vertical para diferentes alturas, que equivale à velocidade na direção z no ponto.

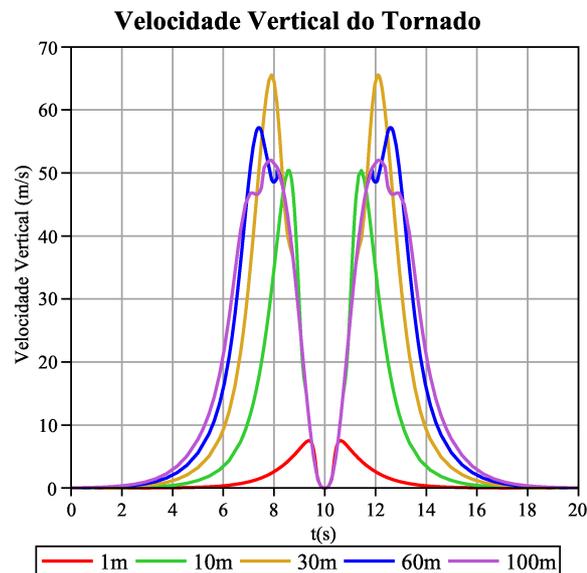


Figura 4.18: Velocidade vertical para diferentes alturas.

4.3 Conclusões Imediatas

Definido o tornado de projeto e feita a análise dos parâmetros principais que compõem o campo de vento do tornado proposto por Kuo/Wen, pode-se chegar a um conjunto de observações importantes sobre o comportamento do modelo:

- A velocidade translacional (V) interfere no tempo que o centro do tornado leva para atingir uma certa posição e, com isso, o tempo de aplicação dos carregamentos, não alterando os valores máximos do campo de velocidades;
- Da mesma forma que a velocidade translacional, o raio máximo (r_{max}) modifica o intervalo de tempo (t_1) da ação de um tornado num ponto. Então, para uma estrutura com frequência natural (f_0), alterar o valor de t_1 significa mudar o fator de amplificação dinâmica;
- Alterações na velocidade tangencial máxima (T_{max}) implicam modificações grandes na distribuição do campo de ventos ao longo do tempo;
- A espessura da camada limite (δ_0) torna-se uma medida importante por ser determinada através de comparações feitas entre os resultados das

velocidades do campo de ventos de Wen/Kuo e valores reais medidos do tornado de Dallas [33]. Alterações nesse parâmetro interferem na velocidade média ao longo do tempo, quanto menor o valor da espessura da camada limite, maiores os valores das velocidades, porém as alterações não são tão significativas quanto as geradas pelas mudanças de T_{max} .