

3 Ações Tornádicas

3.1 O fenômeno

O tornado, figura 3.1, pode ser descrito como um redemoinho de vento ou uma coluna de ar com rotação ou também como um vórtice atmosférico giratório que desce de uma nuvem de tempestade e toca o solo, capaz de gerar ventos com magnitudes suficientes para destruir áreas e provocar inúmeras mortes [4].



Figura 3.1: Tornado F3 em Kansas/Oklahoma, em 3 de maio de 1999.

Ainda não é possível descrever exatamente como um tornado é formado, porém através de estudos e observações já é de conhecimento que a formação dos tornados ocorre na maioria das vezes a partir de uma atmosfera instável, o que significa a presença de uma parcela de ar que não resiste ao movimento original, uma favorabilidade dos movimentos verticais [23], por exemplo, uma massa de ar ascendente mais quente que o ambiente ao seu redor, logo menos densa e mais leve, que tende a continuar subindo até atingir uma altura cuja temperatura seja igual à sua. O movimento ascendente geralmente aumenta a instabilidade, que pode ser causada tanto pelo resfriamento do ar superior quanto pelo aquecimento do ar inferior, próximo da superfície. [16]

Estudos mostram que durante o período diurno a situação predominante é de instabilidade atmosférica, por esse motivo é comum a formação de tornados no final da tarde. Observa-se também o maior número de casos de instabilidade no período de janeiro a abril, verão, enquanto que no período de maio a agosto, inverno, observa-se o maior número de casos de estabilidade atmosférica [25].

Uma atmosfera instável além de ser caracterizada por correntes ascendentes, também é determinada por nuvens *cúmulus*, figura 3.2(a), precipitações de caráter de pancadas e turbulência. As nuvens podem ser classificadas pela aparência e altitude; quanto à aparência, as nuvens *cúmulus* têm o aspecto de domos salientes, e numa atmosfera instável crescem verticalmente, parecendo com uma couve-flor, transformando-se então em uma *cúmulus congestus*. Após a fase de *cumulus congestus*, ocorre o *cumulonimbus calvus*, quando existe um limite claro da nuvem (sem fibras ou franjas ou formações do tipo bigorna); daí para a fase madura (*cumulonimbus capillatus*, figura 3.2(b)) o desenvolvimento é bastante rápido [32].

3.2(a): *Cúmulus*.3.2(b): *Cumulonimbus*.

Figura 3.2: Tipos de nuvens:

Além da atmosfera instável, outro fator gerador de tornados é o desenvolvimento de tempestades do tipo supercélulas, figura 3.3. Esse tipo de tempestade é formado por correntes ascendentes girantes, podendo produzir *downbursts* e granizos de dimensões grandes. Ocorre em ambiente com forte cisalhamento do vento, que pode ser direcional ou de velocidade.

O cisalhamento direcional consiste na mudança da direção do vento com a altura. No hemisfério sul, os ventos giram ao longo da altura no sentido horário o que significa advecção de ar frio em baixos níveis ou o vento girando com a altura no sentido anti-horário, advecção de ar quente. O cisalhamento de velocidade é a mudança do módulo da velocidade do vento com a altura, o que tende a criar rolos horizontais que, quando são levantados (na vertical)



Figura 3.3: Supercélulas.

podem criar regiões de mesociclones que, por sua vez, favorecem a formação de tornados.

Os *downbursts*, figura 3.4, são ventos extremos, mais comuns que os tornados e muitas vezes confundidos com eles. A diferença é que nos tornados os escombros são espalhados em espiral, enquanto que nos *downbursts* eles são espalhados em linha reta. O *downburst* é iniciado pelo arrasto do ar pela precipitação, para baixo, e é intensificado pela evaporação da chuva [30].

Figura 3.4: *Downburst*.

A formação da supercélula dá-se pela inclinação por uma corrente de ar ascendente de uma coluna de ar em rotação gerada pelo cisalhamento em velocidade do vento, figura 3.5. Esse processo gera duas rotações diferentes, uma rotação ciclônica e outra rotação anti-ciclônica. A rotação ciclônica é ampliada pelo cisalhamento direcional do vento, enquanto que a rotação anti-ciclônica torna-se menor. Permanecendo a rotação ciclônica chamada de mesociclone, que caracteriza a supercélula.

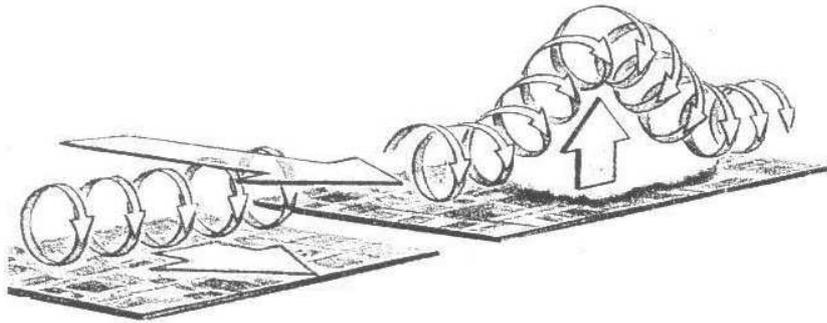


Figura 3.5: Inclinação da coluna de ar por uma corrente de ar ascendente.

Seja a partir de uma nuvem *cumulunimbus* ou por uma supercélula, o tornado só se torna realmente um tornado se a nuvem funil, figura 3.6, ou a circulação de coluna de ar tocar o chão. A princípio o funil possui a mesma coloração da nuvem (branca), sua visibilidade dá-se devido às gotas de vapor d'água condensadas. Depois que toca o solo, a cor do funil pode mudar dependendo do tipo de poeira e escombros que existe por onde ele passa. O tornado pode entrar em contato com a superfície não só pelo solo, mas também pela água, neste caso o tornado é chamado de tromba-d'água, figura 3.7.



Figura 3.6: Nuvem funil.



Figura 3.7: Tromba d'água.

A intensidade de um tornado pode ser medida pela escala Fujita, apresentada pelo doutor T. Theodore Fujita, em trabalho publicado em 1971 [3]. Fujita sintetizou a escala em categorias, com base na intensidade e área de cada tornado, estimando uma velocidade de vento associada com o dano causado pelo tornado, tabela 3.1.

Tabela 3.1: Escala Fujita.

Escala Fujita	Intensidade dos ventos	Velocidade dos ventos (km/h)	Danos causados
F0	Fraco	64 a 116	Danos em chaminés, galhos de árvores quebrados, árvores pouco enraizadas são movidas e danos em placas de trânsito.
F1	Moderado	117 a 180	Telhas são levantadas, casas móveis são retiradas das fundações ou viradas, carros em movimento são empurrados das estradas, garagens anexadas podem ser destruídas.
F2	Forte	181 a 253	Danos consideráveis, telhados são arrancados, casas móveis são demolidas, vagões de trens são derrubados, árvores grandes são desenraizadas, mísseis leves são gerados.
F3	Severo	254 a 332	Telhados e paredes de casas bem construídas são arrancadas, trens são virados, a maioria das árvores nas florestas são desenraizadas.
F4	Devastador	333 a 419	Casas bem construídas são desniveladas, estruturas com fundações fracas são lançadas a uma certa distância, carros são atirados e grandes mísseis são gerados.
F5	Inacreditável	420 a 512	Casas fortes de madeira são arrancadas das fundações e carregadas por distâncias consideráveis até se desintegrarem, mísseis do tamanho de carros voam através do ar por mais de 100 metros, árvores são jogadas ao chão, estruturas de concreto armado são altamente danificadas.
F6	Inconcebível	513 a 610	A pequena área de dano que poderia ser produzida, provavelmente não seria reconhecida ao longo da destruição produzida pelos ventos F4 e F5 que rodeariam os ventos F6. Mísseis, como carros e geladeiras iriam produzir sérios danos secundários que não poderiam ser diretamente identificados como dano do F6. Se esse nível for alguma vez alcançado, evidências somente poderiam ser encontradas através de padrões de giro no solo, sendo muito difícil de ser identificado através de estudo de engenharia.

Apesar da escala Fujita ter sido usada por 33 anos, as limitações da escala são bem conhecidas pelos seus usuários. As limitações principais são a falta de indicadores de dano, a não consideração da qualidade das construções e a não correlação entre dano e a velocidade do vento. Essas limitações conduzem a avaliações incompatíveis e em alguns casos a superestimar as velocidades do tornado. Sendo assim, houve a necessidade de rever o conceito da escala Fujita, aperfeiçoá-la e eliminar algumas de suas limitações, surgindo então a escala Fujita melhorada, tabela 3.2 [3]. Acoplados à nova escala foram propostos indicadores de dano (damage indicators - DIs) junto com graus de danos (degrees of damage - DODs). Os intervalos das velocidades em cada categoria são relacionados com os intervalos da escala Fujita, equação 3-1.

$$V_{EF} = 0,6246V_F + 36,393 \tag{3-1}$$

Onde:

V_{EF} é a velocidade do vento na escala Fujita melhorada (mph);

V_F é a velocidade do vento na escala Fujita (mph).

Essa correlação entre as velocidades das duas escalas permite uma ligação entre elas e assim possibilita expressar os intervalos da escala Fujita com os intervalos da escala Fujita melhorada. A única diferença entre as duas escalas é o intervalo de velocidade dos ventos. Sendo assim, é possível preservar as características dos tornados já ocorridos e facilmente converter para o critério da escala Fujita melhorada.

Tabela 3.2: Parte da Escala Fujita Melhorada.

F0 - 105 a 137 km/h	F1 - 138 a 178 km/h
	
<p>DI2 - Residências para 1/2 pessoas DOD2 - Perda do material da cobertura do telhado (<20%)</p>	<p>DI27 - Árvores: Madeira pesada DOD3 - Árvores desenraizadas</p>

F2 - 179 a 218 km/h



DI2 - Residências para 1/2 pessoas
DOD6 - Grande parte da estrutura do telhado é removida

F3 - 219 a 266 km/h



DI5 - Apartamentos e condomínios
DOD4 - Colapso do teto da estrutura, permanecendo a maioria das paredes

F4 - 267 a 322 km/h



DI23 - Armazéns
DOD7 - Destruição total de uma grande parte do edifício ou dele inteiro

F5 - mais de 322 km/h



DI2 - Residências para 1/2 pessoas
DOD10 - Destruição total do prédio inteiro

3.2

Modelo Cinemático

O campo de vento do tornado é muito parecido com o vórtice combinado de Rankine, entretanto, devido principalmente à presença da superfície terrestre e das constantes mudanças meteorológicas do ambiente o seu comportamento é muito mais complexo [37].

Neste trabalho está sendo adotado o modelo de campo de ventos proposto por Wen [49], baseado na solução teórica de Kuo, que representa um fluxo tridimensional do vento, onde os perfis das velocidades do vento são funções da distância radial e da altura do ponto que se quer avaliar.

Uma representação esquemática da solução de Kuo encontra-se na figura 3.8, onde a origem das coordenadas está no centro do vórtice e as linhas tracejadas representam a fronteira da camada limite. É possível notar que a espessura da camada limite é muito pequena no centro do núcleo, e aumenta rapidamente com o aumento da distância ao centro, e alcança um valor relativamente grande e constante na região exterior. Os perfis das componentes de velocidade (vertical, tangencial e radial) enquadram-se em dois tipos diferentes nessas duas regiões. Na região interna, o fluxo de velocidade tem uma

distribuição oscilatória, ocorrendo reversões na direção radial da velocidade. Na região externa, os valores aproximam-se, sem qualquer flutuação, assintoticamente a determinados valores.

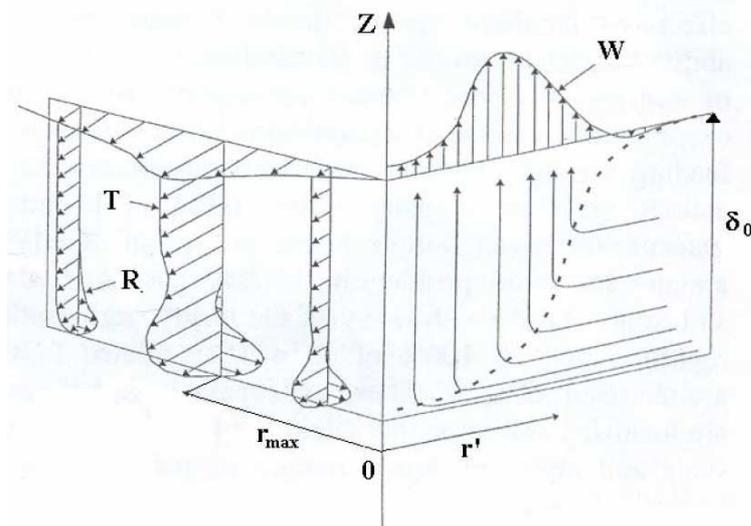


Figura 3.8: Representação esquemática do campo de vento tornádico proposto por Kuo.

A proposta de Wen adota um formato simplificado e um número de parâmetros reduzido para facilitar o uso em aplicações de engenharia. Como os perfis de vento abaixo e acima da camada limite são diferentes, é preciso descrever os campos de vento nessas duas regiões. Sendo assim, a espessura da camada limite é uma função da distância radial r' , dada pela equação 3-2.

$$\delta(r') = \delta_0 \left(1 - e^{-0,5r'^2}\right) \quad (3-2)$$

Onde:

$$r = r'/r_{\max};$$

r_{\max} é a distância radial a partir do centro onde a velocidade tangencial acima da camada limite é máxima;

δ_0 é a espessura quando $r \gg 1$.

As propriedades básicas de $\delta(r')$, isto é, $\delta \rightarrow 0$ quando $r \rightarrow 0$, δ aumenta rapidamente em $r = 1$ e continua constante para $r \gg 1$ como descrito na solução de Kuo. Acima da camada limite a velocidade tangencial é função de r ($r = r'/r_{\max}$), dada por:

$$T(\eta, r) = f(r) = 1,4 \frac{T_{\max} \left(1,0 - e^{-1,256r^2}\right)}{r} \quad \text{para } \eta > 1 \quad (3-3)$$

Onde:

T_{\max} é a máxima velocidade tangencial acima da camada limite;

$$\eta = z/\delta;$$

z é a altura acima do nível do solo.

A equação 3-3 mostra semelhanças com o vórtice combinado de Rankine, pois quando $r \rightarrow 0$, $T(r) \propto r$, e quando $r \gg 1$, $T(r) \propto 1/r$.

De acordo com Kuo, a componente vertical tem um movimento descendente muito fraco na região externa ao núcleo e um forte movimento ascendente no núcleo, atingindo o máximo na região entre $r = 0,6$ e $r = 1,0$. Tal movimento é também notado por Hoecker em observações de campo feitas para um tornado ocorrido em Dallas, EUA, em 1957 [33]. A componente vertical da solução de Kuo é ajustada por:

$$W(\eta, r) = g(r) = 93,0 r^3 e^{-5r} T_{\max} \quad \text{para } \eta > 1 \quad (3-4)$$

A componente radial é zero acima da camada limite. O perfil de velocidades dentro da camada limite é dada pelas equações a seguir:

$$\begin{aligned} T(\eta, r) &= f(r) (1 - e^{-\pi\eta} \cos(2b\pi\eta)) \\ R(\eta, r) &= 0,672 f(r) e^{-\pi\eta} \sin((b+1)\pi\eta) \quad \text{para } \eta \leq 1 \\ W(\eta, r) &= g(r) (1 - e^{-\pi\eta} \cos(2b\pi\eta)) \end{aligned} \quad (3-5)$$

Onde:

$R(\eta, r)$ é a componente radial.

As funções senoidas e cosenoidais vistas nas expressões acima indicam o caráter oscilatório dos perfis dessas componentes de velocidade na região interna da camada limite. O termo b também é função de r , $b(r) = 1,2 e^{-0,8r^4}$, o que explica porque as flutuações deixam de existir na região externa.

As equações 3-3 a 3-5 descrevem o fluxo do vento com apenas três parâmetros, r_{\max} , T_{\max} e δ_0 , que podem ser escolhidos apropriadamente, conforme características básicas do tornado, como suas dimensões, intensidade, etc. Wen faz uma comparação dos perfis da componente tangencial para três diferentes alturas [150ft, 300ft, e 1000ft (46m, 92m, e 305m)] e determina as semelhanças com os perfis do tornado de Dallas de 1957 obtidos por Hoecker.

Para a trajetória do tornado esquematizada na figura 3.9, os perfis de velocidade incidente, u , v , e w , segundo as direções principais da estrutura, x , y , e z , são dados como:

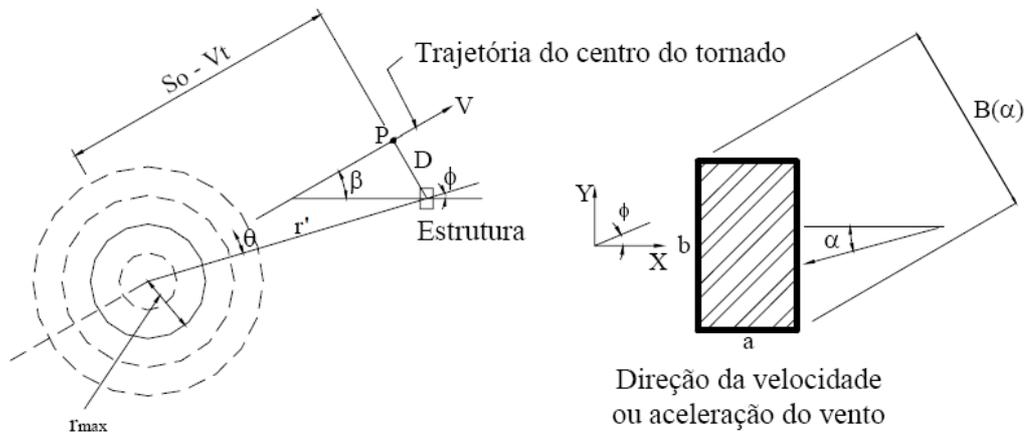


Figura 3.9: Geometria do problema - adaptada de Wen.

$$\begin{aligned}
 u(z, t) &= -T(\eta, r) \sin(\phi) - R(\eta, r) \cos(\phi) + U(z) \cos(\beta) \\
 v(z, t) &= T(\eta, r) \cos(\phi) - R(\eta, r) \sin(\phi) + U(z) \sin(\beta) \\
 w(z, t) &= W(\eta, r)
 \end{aligned}
 \tag{3-6}$$

Onde:

T , R e W são dados pelas equações 3-3, 3-4, e 3-5;

$U(z)$ é o vento prevalecente na região.

Os demais parâmetros podem ser obtidos pelas expressões abaixo:

$$r = \frac{\sqrt{D^2 + (S_0 - Vt)^2}}{r_{\max}}
 \tag{3-7}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{D}{S_0 - Vt}\right)
 \tag{3-8}$$

$$\phi = \beta - \theta
 \tag{3-9}$$

Onde:

ϕ , T e R para uma altura fixa, z , são apenas funções do tempo;

D é a distância do centro da estrutura à trajetória do tornado;

S_0 é a distância entre o centro do tornado e o centro da estrutura projetada ao longo da trajetória do tornado e tomado no início da análise;

V é a velocidade de translação.

A aceleração consiste de um termo local, correspondente à derivada parcial em relação ao tempo das expressões de velocidade, e de uma parcela convectiva, igual ao produto do vetor velocidade pelo seu gradiente. O procedimento para determinar a aceleração é um tanto longo, os detalhes são dados no anexo B.

3.3 Ações Mecânicas

Encontra-se na literatura (Keulegan e Carpenter [36]; Davenport [21]; Etkin [27]) a utilização da equação de Morrison, que relaciona força/velocidade para um corpo delgado e de forma não-suave (A equação de Morrison original é deduzida para um cilindro, considerando a incidência de um escoamento bidimensional. Posteriormente, a formulação foi estendida para um escoamento tridimensional). A intensidade da força por unidade de comprimento atuante em um certo ponto é dada por:

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho C_d A_{exp} U_{ven} |U_{ven}| + \rho C_m Vol \frac{d}{dt} U_{ven} \quad (3-10)$$

Onde:

$F(t)$ é a força por unidade de comprimento;

C_d e C_m são os coeficientes de arrasto e de inércia;

ρ é a massa específica do fluido;

U_{ven} é a velocidade de incidência do vento;

A_{exp} e Vol são a área e o volume do corpo expostos perpendicularmente à velocidade e aceleração do vento, respectivamente.

Os valores dos coeficientes são determinados experimentalmente, alguns autores como Davenport [21], Vickery e Kao [48] tratam do assunto. Têm-se obtido valores de C_d próximos à unidade e insensíveis ao número de Reynolds para edifícios prismáticos (Scruton e Rogers [44]).

Na equação 3-10 a primeira parcela refere-se aos efeitos viscosos e é denominada de termo de arrasto, que guarda uma relação quadrática no que diz respeito à velocidade do fluido, o segundo termo é do tipo potencial e designado como sendo o termo de inércia.

3.4 Efeitos Barométricos

Considerando que as forças centrífugas no vortex do tornado excedam consideravelmente a força de Coriolis [45], o parâmetro de mesmo nome pode ser negligenciado e a equação do gradiente de pressão ao longo da distância r' é dado por:

$$\frac{dp_a}{dr'} = \rho \frac{T^2}{r'} \quad (3-11)$$

Para obter a queda de pressão p_a , a equação 3-11 é integrada de infinito até r' .

$$p_a = \int_{\infty}^{r'} \rho \frac{T^2}{r'} dr' \quad (3-12)$$

No caso de estruturas não ventiladas, a pressão interna permanece igual à pressão atmosférica antes da passagem do tornado. Conseqüentemente, durante a passagem, a diferença entre a pressão interna e a pressão atmosférica externa é igual a p_a .

Para estruturas completamente abertas, as pressões internas e externas são igualadas quase que instantaneamente. Em estruturas com aberturas (estruturas ventiladas), a mudança de pressão interna durante a passagem do tornado altera-se para um valor $p_i(t)$. Denotando por $p_a(t)$ a mudança de pressão externa, a diferença de pressão que age na estrutura é $p_a(t) - p_i(t)$. Para maiores detalhes ver Simiu [45] e Pecin [43].

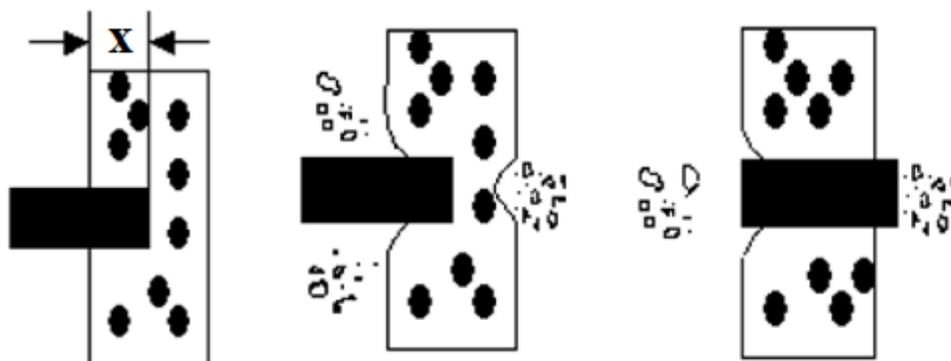
3.5 Mísseis

Para estimar a velocidade alcançada por objetos que se movem pela ação de forças aerodinâmicas induzidas por tornados, é necessária uma série de considerações [45], como:

- características aerodinâmicas do objeto;
- aspectos detalhados do campo de vento;
- posição inicial do objeto em relação ao solo e ao centro do tornado e sua velocidade inicial.

Objetos geralmente considerados como mísseis em potencial em projetos de usinas nucleares são corpos não-aerodinâmicos como tábuas de madeira, barras e tubos de aço, automóveis, entre outros.

A proposta deste trabalho não é um estudo sobre a geração dos mísseis, nem as trajetórias e velocidades dos mesmos, mas sim um estudo sobre os efeitos de certos mísseis em algumas estruturas. No capítulo 6, é dado maior enfoque sobre esse tema.



3.10(a): Penetração

3.10(b): Estilhaçamento

3.10(c): Perfuração

Figura 3.10: Efeitos locais do impacto dos mísseis.

Seguem algumas terminologias [38] usadas quando se descrevem os efeitos locais do impacto dos mísseis.

- Penetração (figura 3.10(a)): deslocamento dentro do alvo pelo projétil (a extensão do deslocamento do míssil dentro do alvo é chamado de profundidade de penetração).
- Estilhaçamento (figura 3.10(b)): Ejeção de material do alvo pela face posterior do alvo.
- Perfuração (figura 3.10(c)): Passagem completa do míssil através do alvo com ou sem velocidade residual.

Para medição, as seguintes determinações são usadas freqüentemente:

- Profundidade de penetração (x): A profundidade na qual o projétil penetra dentro do alvo de concreto maciço sem haver perfuração.
- Limite de estilhaçamento (h_s): Espessura mínima do alvo necessário para prevenir o estilhaçamento.
- Limite de perfuração (e): Espessura mínima do alvo necessária para prevenir a perfuração.