

DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEL SOSTEGNO D'ANTENNA SECONDO LA NORMA CEI 100-140

Generalità

Scrivo queste brevi note per fare un po' di luce su di un argomento col quale tutti abbiamo a che fare ma si colloca al di fuori della competenza di un radiotecnico, cioè il calcolo degli sforzi il dimensionamento e la verifica del sostegno d'antenna.

Per fare ciò è necessario limitare la trattazione ai casi più semplici cioè quelli che rispondono ai seguenti requisiti:

- Il sostegno dell'antenna deve avere una sezione semplice e simmetrica (tubo circolare o quadrato), non vale per i tralicci a struttura reticolare e per i tralicci con scale e piattaforme.
- La sollecitazione deve essere solo la flessione semplice, quindi il peso delle antenne deve essere rigorosamente trascurabile (carico di punta assente) e deve essere trascurabile anche l'azione tagliante e torcente.
- Il momento flettente alla base del sostegno non deve superare i 1650Nm (limite normativo per la trattazione semplificata).
- L'azione del vento deve essere teso, senza raffiche che possano mandare in risonanza il sostegno.

Per i casi che non rientrano nelle suddette restrizioni occorre consultare un professionista esperto abilitato all'esercizio della professione (ingegnere o geometra), che applicherà la Norma UNI EN 40/6 [2].

Le note che seguono sono comunque tratte dalle Norme CEI 100-140 2007-1 [1], UNI EN 40/6 [2] e dal DM 16/01/1996 [3].

Calcolo degli sforzi

La prima cosa da fare è calcolare il momento flettente nel punto d'ancoraggio del palo. Il punto d'ancoraggio (vincolo), nel caso di pali autoportanti (cioè quelli in grado di sostenere le sollecitazioni del vento senza controventature), è solitamente costituito da zanche collegate alla struttura edile, o da plinti di fondazione. Mentre nel caso di pali dotati di controventature il punto d'ancoraggio è considerato essere la ralla più alta ove si agganciano i controventi (detti anche tiranti o stralli).

In entrambi i casi si deve considerare la sola parte del sostegno che risulta a sbalzo cioè quella che è soggetta alla sola azione del vento. Su questa parte sono solitamente distribuite le antenne che avranno distanza dal vincolo pari ad A_1 , A_2 , A_3 ed A_4 , mentre tutto il palo avrà lunghezza pari a L . Fig.1.

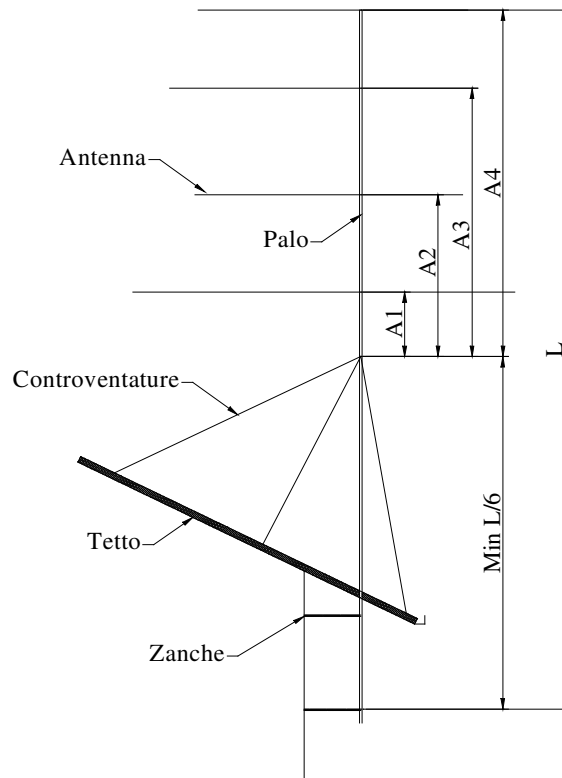


Figura 1

Per l'analisi semplificata, la norma [1] prevede:

- di limitare la parte libera (autoportante) a 6m, oltre tale altezza occorre controventare il palo con dei tiranti collegati ad una ralla;
- di tenere la parte incastrata almeno 1/5 della parte libera oppure 1/6 della lunghezza totale del palo, che diminuisce ad 1/10 della lunghezza totale nel caso di plinto.

Inoltre occorre verificare che l'eventuale caduta del palo non possa venire in contatto con le linee aeree degli elettrodotti (nel caso di media o alta tensione occorre che la distanza di sicurezza sia rispettata anche a palo caduto).

Ora occorre per ogni antenna cercare il valore di superficie esposta al vento che ogni costruttore dichiara nelle caratteristiche.

Il costruttore lo deve dare riferito alla velocità del vento di 130 Km/h, corrispondente ad alla pressione del vento di 800 N/m². Nel caso che il costruttore dia l'area esposta al vento per velocità diverse occorre moltiplicare la superficie per un fattore di correzione f_c pari alla velocità del vento di riferimento v_r fratto la velocità di calcolo v_c , il tutto al quadrato:

$$f_c = \left(\frac{v_r}{v_c} \right)^2 \quad (1)$$

Spesso però i Radioamatori sono autocostruttori delle proprie antenne pertanto sarà necessario reperire l'area esposta al vento per analogia con antenne simili prodotte da costruttori professionisti oppure, per i più curiosi, esprimo il metodo di calcolo dell'esposizione al vento di un'antenna Yagi.

Per calcolare l'esposizione al vento di una Yagi occorre calcolare l'area della proiezione del lato lungo di ogni elemento, quello che si vede osservando l'antenna da dietro. La proiezione del lato lungo è l'ombra che genera l'elemento quando è appoggiato a terra, pertanto è costituita da combinazioni di rettangoli.

Ogni proiezione si deve esprimere in m² e moltiplicare per il suo coefficiente di resistenza aerodinamica c_D che vale:

$c_D = 0,67$ per le superfici cilindriche lisce (tubi in alluminio lucido o satinato);

$c_D = 0,75$ per le superfici cilindriche ruvide (tubi in acciaio zincati a caldo);

$c_D = 0,9$ per le superfici piane (la superficie piana non ha $c_D = 1$ perché non riesce a fermare completamente l'aria);

e sommare i valori di ogni elemento tra di loro. Il risultato sarà l'area equivalente degli elementi A_{el} .

Fatto ciò bisogna calcolare la proiezione del boom (antenna vista di fianco) e moltiplicarla per il corrispondente c_D . L'area equivalente del boom la chiameremo A_b , anch'essa in m².

Ora l'esposizione trasversale al vento maggiore sarà quella che il vento orizzontale vede dall'angolo d'incidenza azimutale ϕ dato da:

$$\phi = \arctan\left(\frac{A_b}{A_{el}}\right) \quad [^\circ] \quad (2)$$

Il valore sopra si ricava annullando la derivata prima rispetto all'angolo d'incidenza orizzontale del vento [5]. L'area trasversale esposta al vento orizzontale secondo l'angolo sopra è quella massima ed è pari a:

$$A_{eff} = \sqrt{A_{el}^2 + A_b^2} \quad [m^2] \quad (3)$$

Purtroppo il vento non sempre soffia sul piano orizzontale ma può presentare una certa inclinazione rispetto a tale piano (detta inclinazione zenitale) cioè può provenire anche un po' dal basso o dall'alto.

Tenendo conto di ciò e rifacendo i calcoli [5] si può dimostrare che la maggiorazione dell'area A_{eff} di esposizione trasversale al vento, dovuta alla componente zenitale del vento, non è mai maggiore del 30% e si presenta per angoli d'inclinazione zenitale che vanno da 15° a 30° sopra o sotto l'orizzonte. Per angoli maggiori il contributo fa aumentare (o diminuire) il peso dell'antenna ma non la sua area di esposizione trasversale.

Per cui la superficie massima di esposizione al vento di un'antenna Yagi si può dire pari a:

$$S = 1,3 \cdot A_{eff} \quad [m^2] \quad (4)$$

Nel caso l'antenna abbia più riflettori sostenuti da un traverso, o altri accessori, occorrerà moltiplicare la proiezione di "coda" dell'area del traverso per suo c_D e sommarla a quella degli elementi A_{el} . Poi occorrerà moltiplicare la proiezione laterale dell'area del traverso per suo c_D e sommarla a quella del boom A_b .

Le antenne verticali, invece, si presentano sempre allo stesso modo al variare della direzione del vento orizzontale (angolo azimutale). Pertanto possono essere considerate come elementi cilindrici sovrapposti. L'area esposta al vento è la somma della loro proiezione per il loro c_D . L'unica differenza che si ha è che sono vincolate al palo alla base, mentre il centro di spinta del vento coincide col baricentro velico dell'antenna, che approssimando per eccesso, corrisponde più o meno alla metà dell'antenna verticale. Quindi più in alto del punto di ancoraggio al palo. Di questo bisogna tenerne conto quando si calcolano gli sforzi trasmessi al puntale del palo.

E' come se l'antenna fosse fissata nel baricentro velico (quindi più in alto) anziché alla sua base. Ciò comporta che nel punto di ancoraggio è presente un momento flettente pari alla forza di spinta per l'altezza dalla base del baricentro velico.

Note o calcolate le superfici d'esposizione al vento le chiameremo S_1 , S_2 , S_3 ed S_4 , e sono tipicamente espresse in m^2 (metri quadrati).

La pressione del vento p in N/m^2 (Newton al metro quadrato), che spinge sulla superficie esposta dell'antenna, genera la forza F espressa in N (Newton), che agisce sul palo nel punto un cui si fissa l'antenna (forza concentrata nel punto in cui l'antenna è vincolata al palo).

Non è semplice sapere la pressione che esercita il vento sul palo di sostegno perchè solitamente non si conosce la velocità media del vento che spira nella propria zona.

In questo caso la Norma CEI 100-140 [1] ci viene incontro e ci dice che per pali installati fino a 20m dal suolo si può considerare la pressione del vento essere:

$p = 800 N/m^2$ (che corrisponde ad un vento di circa 130 km/h o 36 m/sec).

Mentre per pali installati oltre i 20m dal suolo si può considerare la pressione del vento essere:

$p = 1100 N/m^2$ (che corrisponde ad un vento di circa 150 km/h o 42 m/sec).

I più rigorosi possono ricavare la pressione del vento nella propria zona ricorrendo al Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 16/01/1996 [3], che definisce i criteri di sicurezza delle costruzioni e quindi anche la sollecitazione del vento. Questo Decreto non è di semplice ed intuitiva applicazione perchè tiene conto di moltissime variabili: altezza sul livello del mare, vicinanza alla costa, orografia del territorio, ecc..., per questo motivo lo consiglio solo agli esperti.

Nota la pressione del vento non ci resta che calcolare la forza che l'antenna esercita sul palo quando è esposta al vento. Per fare questo utilizziamo la formula seguente che deriva dal teorema di Bernoulli:

$$F = c \cdot p \cdot S \quad [N] \quad (5)$$

Dove p è la pressione del vento ricavata sopra ed espressa in N/m^2 , S è la superficie d'esposizione al vento dichiarata dal costruttore (moltiplicata per il fattore f_c che dipende dalla pressione del vento considerata) e c è il coefficiente di carico che vale:

$c = 1,2$ in condizioni di vento teso;

$c = 1,6$ in condizioni di raffiche di vento;

$c = 2,0$ quando la formazione di ghiaccio aumenta di parecchio la superficie esposta.

Per cui ogni antenna installata genererà una forza concentrata sul palo chiamata F_1 , F_2 , F_3 e F_4 che genera alla base del palo (o nel punto ove si trovano i controventi, se ci sono) una forza di flessione, chiamata momento flettente M_a in Nm (Newton metri), pari alla forza concentrata F per la distanza A dalla base (detta braccio).

La somma di tutti i momenti flettenti M_a dà origine al momento flettente totale delle antenne chiamato M_{ba} , vedi formula (6).

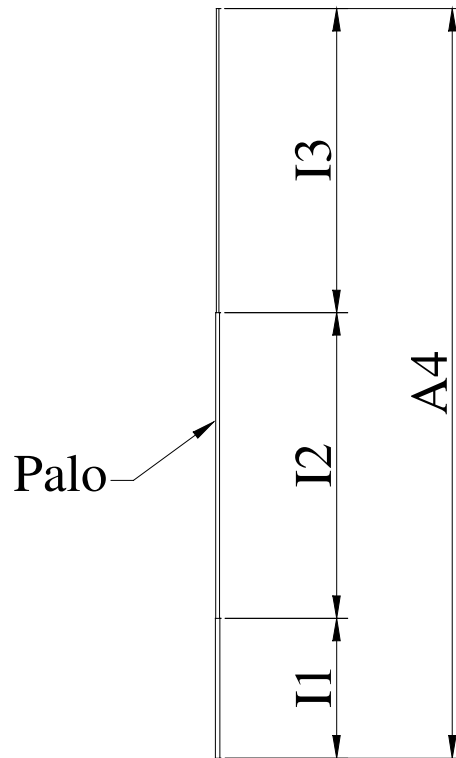
$$M_{ba} = M_{a1} + M_{a2} + M_{a3} + M_{a4} = F_1 \cdot A_1 + F_2 \cdot A_2 + F_3 \cdot A_3 + F_4 \cdot A_4 \quad [Nm] \quad (6)$$

Oltre alle antenne è esposto al vento anche lo stesso palo che, sotto la spinta del vento genera un momento flettente M_p distribuito su tutta la sua lunghezza libera. La forza distribuita che il palo sopporta quando è esposto al vento è dato dalla formula (7) seguente:

$$q = c \cdot p \cdot D \quad [N/m] \quad (7)$$

Dove p è la pressione del vento ricavata sopra ed espressa in N/m^2 , D è il diametro del palo di sostegno nel suo troncone espresso in metri (se si vuole esagerare quella del troncone più grande) e c è il coefficiente di carico visto in precedenza (si ipotizza che coefficiente di resistenza aerodinamica c_D valga 1 per sicurezza).

Per le sezioni del sostegno quadrate aggiungiamo a $c = c + 0,25$ per tenere conto



dell'angolo azimutale peggiore.

Figura 2

La forza di spinta del vento sul palo viene calcolata sui singoli tronconi di palo, ove per troncone s'intende lo spezzone di palo con diametro costante ed esposto al vento. Sono universalmente usati i pali telescopici che sono costituiti da tronconi infilati uno dentro l'altro. La lunghezza del troncone da considerare è solo quella che fuoriesce dal troncone più grande in cui è infilato (fig. 2) ed è indicata con I_1 , I_2 , I_3 , che con la formula (7) originano le seguenti forze distribuite:

$$q_1 = c \cdot p \cdot D_1 \quad [N/m] \quad (8)$$

$$q_2 = c \cdot p \cdot D_2 \quad [N/m]$$

$$q_3 = c \cdot p \cdot D_3 \quad [N/m]$$

Ricordo che D_1 , D_2 e D_3 sono i diametri dei singoli tronconi, **espressi in metri**, a partire da quello più in basso (il più grosso).

Per cui ogni troncone genererà un momento flettente M_p in Nm, pari alla forza distribuita del vento q esercitata su ogni troncone I ed applicata al suo baricentro $I/2$. La formula (9), valida per tre tronconi, è scritta così:

$$M_p = q_1 \cdot \frac{I_1^2}{2} + q_2 \cdot I_2 \left(I_1 + \frac{I_2}{2} \right) + q_3 \cdot I_3 \left(I_1 + I_2 + \frac{I_3}{2} \right) \quad [Nm] \quad (9)$$

Il momento flettente totale M_t alla base del palo è dato dalla somma di quello generato dalle antenne e quello generato dal palo, come si evince dalla formula (10) sotto:

$$M_t = M_{ba} + M_p \quad [\text{Nm}] \quad (10)$$

Se il momento totale alla base del palo è superiore a 1650 Nm viene meno la possibilità di effettuare il calcolo semplificato e quindi si deve andare da un professionista abilitato che esegue il calcolo secondo la Norma UNI EN 40 [2] (piuttosto complessa) e poi deve verificare che il momento totale (flettente e torcente) sia correttamente trasmesso ed assorbito dalla struttura edile.

Dimensionamento e verifica del sostegno d'antenna

Una volta calcolato il momento flettente alla base del sostegno occorre individuare il palo in grado di reggere lo sforzo.

Questa operazione richiede la conoscenza del carico di snervamento del materiale utilizzato ed altri parametri come la sua sezione.

Il carico di snervamento, che è tipico del materiale utilizzato, è il carico massimo a cui può essere sottoposto un materiale elastico (come l'acciaio) affinché, tolto il carico, ritorni nella sua forma originale, senza subire quindi alcuna deformazione. Il carico di snervamento si misura in N/mm^2 ed è dichiarato dai costruttori di pali perchè dipende dal tipo di acciaio che hanno utilizzato.

Nel caso di tubi telescopici tondi di acciaio non legato rispondenti alla Norma DIN1615 indicati come acciai S235JRH, tipicamente usati dai costruttori di pali zincati per il sostegno delle antenne (come Dina Fava Accessori per antenne www.dinafava.it), il carico di snervamento minimo dichiarato dal produttore è di 235 N/mm^2 , per l' Fe320 usato per i tubi telescopici sottili (spessore 1,5mm) 252 N/mm^2 , l'acciaio utilizzato per i tubi zincati dell'acqua serie media e laminati a freddo si riduce a 165 N/mm^2 , l'acciaio INOX AISI 304 di alto spessore (3 mm) usato nel campo alimentare o farmaceutico ha un carico di snervamento di 228 N/mm^2 e l'alluminio Al-6060 T5 (anticorodal) snerva a 165 N/mm^2 . Solitamente però si suole usare un carico di snervamento ridotto del 10 ÷ 20% rispetto a quello minimo, per ragioni di sicurezza (più riduco più sono sicuro).

Se fosse disponibile il carico di rottura, anziché quello di snervamento, sappiate che è possibile ricavare il carico di snervamento dividendo il carico di rottura per 3 o 4, CEI 100-140 art. 5.3.

Una volta individuato con certezza il carico di snervamento $R_{0,2}$ lo si riduce del fattore di sicurezza e si trova il carico di snervamento da utilizzare R_m con la formula (11) (ridurre del 10 % equivale a moltiplicare per $0,9 = 1 - 0,1$):

$$R_m = R_{0,2} \cdot 0,9 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (11)$$

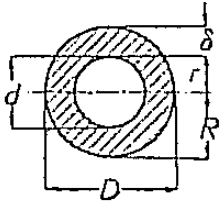
Con questo dato è possibile ottenere il modulo di resistenza W (in mm^3) che deve avere il profilato, semplicemente dividendo il momento flettente totale M_t per il carico di snervamento R_m e ragguagliando le unità di misura, formula (12).

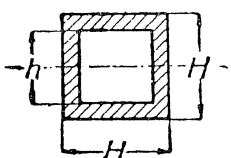
$$W = \frac{M_t}{R_m} \cdot 10^3 \quad [\text{mm}^3] \quad (12)$$

A questo punto bisogna confrontare il modulo di resistenza W del nostro palo e verificare che sia uguale o superiore a quello necessario, trovato con la formula (12).

Per fare questa verifica si calcola il W col teorema di De Saint Venant per la flessione semplice, che prende in considerazione la forma della sezione del nostro palo, nel punto di maggiore sforzo. Cioè nel punto ove il palo è vincolato alla zanca o dove sono fissati i controventi alla ralla. Nel calcolo semplificato sotto ai controventi non si considera alcuna sollecitazione, pertanto anche il carico di punta è considerato trascurabile.

Poichè la sezione dei pali in uso è circolare, o quadrata, si possono usare le formule sotto, prese dal manuale del Geometra [4]:

	$J = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$ $= \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4)$ $= \frac{1}{4} F (R^2 + r^2)$ <p>(F = area della sez.)</p> $J \simeq 0,05 (D^4 - d^4)$	$W = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D} =$ $= \frac{\pi}{4} \frac{R^4 - r^4}{R}$ <p>Per $\delta: d_m$ molto piccolo: $W \simeq 0,8 d_m^2 \delta$, ove $d_m = \frac{1}{2} (D + d)$</p>
---	---	--

	$J = \frac{H^4 - h^4}{12}$
---	----------------------------

Occorre fare attenzione all'unità di misura che, nel nostro caso, è il millimetro. Questa unità di misura genera numeri piuttosto grandi, solitamente si usa il centimetro... ma è meglio abbandonarlo.

Infine faccio notare che spesso nel punto di maggiore sforzo, per aumentare la resistenza del palo, si usa infilare un tubo dentro l'altro, così facendo si possono sommare i due W . Questa approssimazione presuppone che i due tubi lavorino assieme, cioè non vi sia alcuno scivolamento. Per evitare lo scivolamento occorre serrare le viti dei pali telescopici con la coppia di serraggio indicata dal costruttore (serrare troppo deforma il palo e serrare troppo poco causa microscorrimenti) ed occorre infilare il tubo per almeno la distanza prevista dalle viti (almeno tre diametri con un minimo di 100mm).

Dato che spesso si utilizzano pali telescopici a sezione decrescente occorre verificare che ogni troncone sia in grado di resistere al momento flettente che gli compete. Per fare questo occorre rifare tutti i calcoli considerando come parte libera del palo quella che fuoriesce dal troncone inferiore, a sezione più grande, come se fosse quello il punto di vincolo, e con le antenne che rimangono sopra.

Le operazioni vanno rifatte per ogni troncone di palo presente fino al puntale.

Tiranti e zanche

La Norma CEI 100-140 affronta in modo dettagliato anche il dimensionamento dei tiranti e delle zanche. In questo articolo accennerò solo al dimensionamento dei tiranti in quanto l'argomento zanche è abbastanza prolisso, da solo vale un articolo. Infatti le zanche sono soggette a tutti i tipi di sollecitazione: trazione (o compressione a seconda del verso), taglio, flessione e torsione. Inoltre non hanno sezione simmetrica, infatti la Norma consiglia zanche con almeno due estensioni (piedi), tre per quella di sotto. Inoltre si prestano ad essere collegate a strutture edili diverse: laterizio, cemento armato, ringhiere, ecc...; ed in tanti modi diversi: cementate, tassellate, con collari, ecc... La Norma le esamina in dettaglio tutte (dodici pagine).

I tiranti invece sono sollecitati solo a trazione semplice e quindi possiamo accennare al loro dimensionamento.

I tiranti devono essere almeno tre, posti a 120° tra loro (90° se quattro), devono formare un angolo con la verticale del palo non inferiore a 30° ed ognuno deve essere in grado di sopportare il carico da solo.

I tiranti a riposo non devono essere tenuti in tensione per non ridurre il margine di rottura e non aumentare il carico di punta del palo sottostante la ralla.

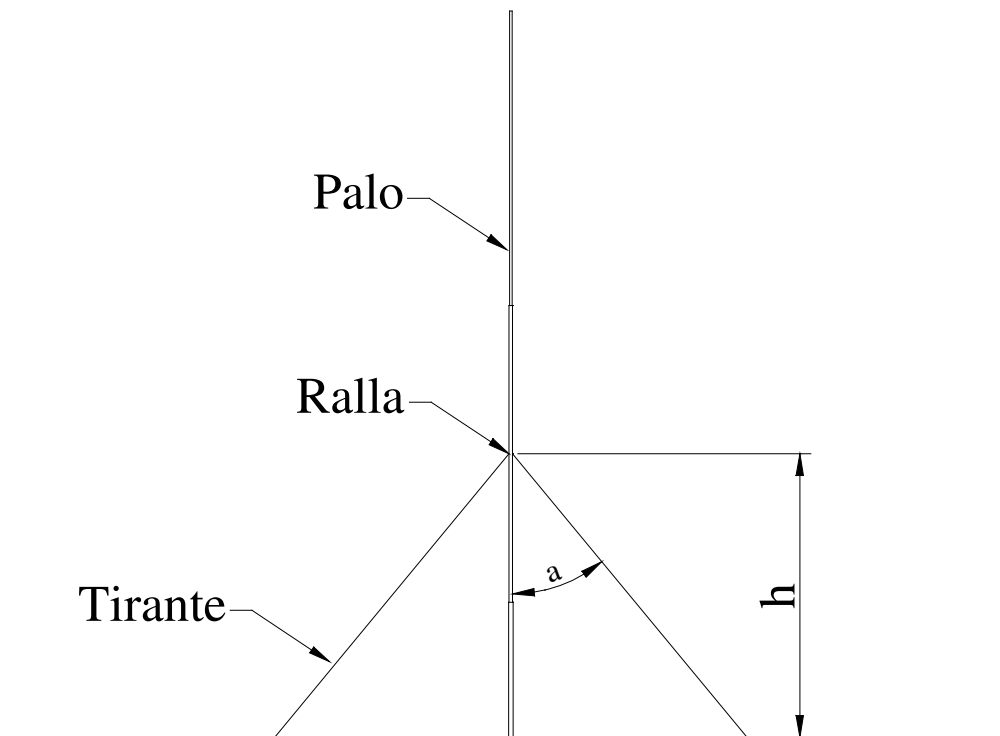


Figura 3

Se la ralla è posta ad h metri dal punto in cui il tirante è collegato alla struttura edile e chiamato a l'angolo (in gradi) che il tirante forma con la verticale del palo (Fig. 3), si può scrivere che la tensione T (in Newton) a cui è soggetto il tirante è data dalla formula (13):

$$T = \frac{M_T}{h \cdot \sin(a)} \quad [\text{N}] \quad (13)$$

Il momento M_T è il momento a cui è sottoposto il palo nel punto in cui si collega la ralla. Se non vi sono altre ralle sopra M_T coincide con M_t , che al massimo è 1650 Nm.

E' chiaro che il tirante dovrà essere in grado di sopportare almeno 2,5 volte tale trazione (fattore di sicurezza consigliato). I costruttori di tiranti danno il valore del tiro massimo sopportabile dal tirante. Se non fosse disponibile, per tiranti in acciaio, è possibile considerare 1800 N/mm^2 moltiplicato per la sezione effettiva del tirante (area di un trefolo per il numero di trefoli).

Non lasciamoci ingannare dal diametro esterno del cavo perché c'è molta aria all'interno. Non utilizziamo cavi con cordura intrecciata perché favorisce la corrosione e non contribuisce alla trazione. Preferite cavi in acciaio INOX AISI 316 perché non richiedono molta manutenzione ed un cavetto da 4mm raggiunge facilmente carichi di rottura intorno ai 11000 N.

Infine vi consiglio di fare molta attenzione a dove e come collegate il tirante alla struttura edile, considerate le tensioni in gioco e confrontatele con i valori che i costruttori (seri) di tasselli vi forniscono nel loro sito o nella scheda tecnica che il ferramenta vi può procurare.

Esempio

Consideriamo d'avere tre antenne da montare:

Antenna Yagi 3 elementi per le HF con esposizione al vento $S_1 = 0,4 \text{ m}^2$;

Antenna Yagi 5 elementi per i 6m con esposizione al vento $S_2 = 0,32 \text{ m}^2$;

Antenna Yagi 12 elementi per i 2m con esposizione al vento $S_3 = 0,2 \text{ m}^2$.

Da installare su di un palo a due sezioni circolari, di lunghezza complessiva $L = 5,40 \text{ m}$, avente la parte libera dai controventi:

Lunga $I_1 = 0,50 \text{ m}$, con diametro esterno $D_1 = 60 \text{ mm}$ e spessore $s_1 = 3 \text{ mm}$;

In cui viene infilato, per un tratto di 0,60 m, un altro tubo avente:

Lunga $I_2 = 2,40 \text{ m}$, con diametro esterno $D_2 = 50 \text{ mm}$ e spessore $s_2 = 3 \text{ mm}$;

Le antenne vengono posizionate alle seguenti distanze dalla ralla:

Antenna Yagi 3 elementi per le HF $A_1 = 0,30 \text{ m}$;

Antenna Yagi 5 elementi per i 6m $A_2 = 1,55 \text{ m}$;

Antenna Yagi 12 elementi per i 2m $A_3 = 2,80 \text{ m}$.

Consideriamo ora che la pressione del vento nella nostra zona sia di $p = 800 \text{ N/m}^2$, perchè il palo viene installato a meno di 20 m dal suolo, e consideriamo inoltre che il costruttore del palo abbia utilizzato un tubo di acciaio S235JRH zincato a caldo, con carico di snervamento $R_{0,2} = 235 \text{ N/mm}^2$, come da catalogo Dina Fava www.dinafava.it.

Calcolo degli sforzi.

Per prima cosa verifichiamo che la parte fissa del palo sia maggiore o uguale a L/6 della lunghezza totale:

$$L/6 = 5,40/6 = 0,90 \text{ m}$$

La parte fissa deve essere lunga almeno 0,90 m. Nel nostro caso abbiamo un palo lungo 5,40 m che ha una parte libera di 2,90 m.

Per cui la parte fissa è di:

Parte fissa = $5,40 - 2,90 = 2,50 \text{ m}$ che è molto superiore a 0,90 m necessari.

Calcoliamo la forza che esercita ciascuna antenna sul palo. Dalla (5) scriviamo:

$$F_1 = 1,2 \cdot 800 \cdot 0,4 = 384 \text{ N}$$

$$F_2 = 1,2 \cdot 800 \cdot 0,32 = 307 \text{ N}$$

$$F_3 = 1,2 \cdot 800 \cdot 0,2 = 192 \text{ N}$$

Calcoliamo ora il momento flettente M_{ba} alla base della parte libera del palo dovuto alle sole antenne. Dalla (6) si ha:

$$M_{ba} = 384 \cdot 0,30 + 307 \cdot 1,55 + 192 \cdot 2,80 = 1129 \text{ Nm}$$

Passiamo ora al calcolo del momento causato dal solo palo. Dalla (8) calcoliamo la forza distribuita che il palo sopporta:

$$q_1 = 1,2 \cdot 800 \cdot 0,06 = 58 \text{ N/m}$$

$$q_2 = 1,2 \cdot 800 \cdot 0,05 = 48 \text{ N/m}$$

Ora dalla (9) ricaviamo il momento flettente M_p causato dal palo:

$$M_p = 58 \cdot (0,50)^2 \cdot 1/2 + 48 \cdot 2,40 \cdot (0,5 + 1,20) = 203 \text{ Nm}$$

Come si può notare la componente causata dal palo è molto piccola rispetto a quella dovuta dalle antenne.

Il momento flettente complessivo alla base del palo è la somma dei due, formula (10):

$$M_t = M_{ba} + M_p = 1129 + 203 = 1332 \text{ Nm}$$

Il valore ottenuto è inferiore a quello massimo di 1650 Nm, quindi la procedura semplificata è applicabile. In caso contrario occorre rivolgersi ad un professionista abilitato che per lo meno verifichi che il vincolo al muro o al tetto sia abbastanza solido.

Verifichiamo ora che il palo scelto sia in grado di sopportare il momento flettente totale M_t . Il carico di snervamento dell'acciaio utilizzato è $R_{0,2} = 235 \text{ N/mm}^2$, che moltiplicato per il fattore di sicurezza 0,9 dà (11):

$$R_m = 235 \cdot 0,9 = 212 \text{ N/mm}^2$$

Il modulo di resistenza W che il palo deve avere alla base è quindi (12):

$$W = 1332 / 212 \cdot 1000 = 6298 \text{ mm}^3$$

Alla base viene utilizzato uno spezzone di palo con diametro esterno $D_1 = 60\text{mm}$, con spessore $\delta_1 = 3\text{mm}$, il diametro interno d_1 è di:

$$d_1 = D_1 - (2 \cdot \delta_1) = 60 - (2 \cdot 3) = 54 \text{ mm}$$

Dalle formule di De Saint Venant per le sezioni circolari si ottiene:

$$W_1 = \frac{\pi}{32} \frac{60^4 - 54^4}{60} = 7289 \text{ mm}^3$$

Come si vede il palo è in grado di reggere lo sforzo infatti il modulo di resistenza dello spezzone da 60mm risulta superiore a quello necessario di 6298 mm³ ($W_t > W$), pertanto lo spezzone più in basso è in grado di reggere lo sforzo.

Verifichiamo ora che lo spezzone sopra sia in grado di reggere lo sforzo delle antenne che porta.

Le antenne supportate sono:

Antenna Yagi 5 elementi per i 6m con esposizione al vento $S_2 = 0,32 \text{ m}^2$;

Antenna Yagi 12 elementi per i 2m con esposizione al vento $S_3 = 0,2 \text{ m}^2$.

Lo spezzone è lungo:

$$l_2 = 2,40 \text{ m, con diametro esterno } D_2 = 50 \text{ mm e spessore } s_2 = 3 \text{ mm;}$$

Le antenne sono posizionate alle seguenti distanze dal punto d'inserimento:

Antenna Yagi 5 elementi per i 6m $A_2 = 1,05$ m;
Antenna Yagi 12 elementi per i 2m $A_3 = 2,30$ m.

La forza che esercita ciascuna antenna sul palo, dalla (5) scriviamo:

$$F_2 = 1,2 \cdot 800 \cdot 0,32 = 307 \text{ N}$$

$$F_3 = 1,2 \cdot 800 \cdot 0,2 = 192 \text{ N}$$

Il momento flettente M_{ba} nel punto d'inserimento è, dalla (6):

$$M_{ba} = 307 \cdot 1,05 + 192 \cdot 2,30 = 764 \text{ Nm}$$

Dalla (8) calcoliamo la forza distribuita sul solo troncone:

$$q_2 = 1,2 \cdot 800 \cdot 0,05 = 48 \text{ N/m}$$

Ora dalla (9) ricaviamo il momento flettente M_p causato dal palo:

$$M_p = 48 \cdot (2,40)^2 \cdot 1/2 = 138 \text{ Nm}$$

Il momento flettente complessivo nel punto d'inserimento è dato dalla formula (10):

$$M_t = M_{ba} + M_p = 764 + 138 = 902 \text{ Nm}$$

Il modulo di resistenza W che il secondo troncone deve avere nel punto d'inserimento è (12):

$$W = 902 / 212 \cdot 1000 = 4255 \text{ mm}^3$$

Il secondo spezzone di palo ha diametro esterno $D_2 = 50$ mm, con spessore $\delta_2 = 3$ mm, il diametro interno d_2 è di:

$$d_2 = D_2 - (2 \cdot \delta_2) = 50 - (2 \cdot 3) = 44 \text{ mm}$$

Dalle formule di De Saint Venant per le sezioni circolari si ottiene:

$$W_2 = \frac{\pi}{32} \frac{50^4 - 44^4}{50} = 4910 \text{ mm}^3$$

Anche lo spezzone è in grado di reggere lo sforzo che gli compete, infatti il modulo di resistenza dello spezzone da 50mm risulta superiore a quello necessario di 4255 mm^3 ($W_t > W$), pertanto il palo, in tutti i suoi spezzoni, risulta essere in grado di reggere la spinta trasversale del vento sulle antenne.

Conclusioni

Non è sempre scontato che la soluzione adottata sia in grado di sostenere le antenne. E' buona regola verificare sempre che i sostegni siano idonei e che le antenne siano ben dislocate sul palo.

A tale proposito ho preparato in un foglio di calcolo in formato EXCEL (disponibile sul mio sito www.iw2fnd e sul sito dell'ARI di Parma www.ariparma.it) con tutto il calcolo che abbiamo visto nell'esempio. L'utilizzo del foglio è intuitivo per chi ha già letto l'articolo. Infine ritengo che l'acquisto della Norma CEI 100-140 [1] di 48 pagine, il cui costo è di 36 euro, sia una spesa ben fatta. Chi vuole la può ordinare presso il sito www.ceiweb.it .

'73 de IW2FND Attolini Lucio.

Bibliografia

- 1) Norma CEI 100-140 2007-1 “Guida per la scelta e l’installazione dei sostegni d’antenna per la ricezione televisiva” ed. prima f. 8607.
- 2) Norma UNI EN 40/6 1985-10 “Pali per illuminazione pubblica. – Ipotesi di carico.”.
- 3) D.M. 16/01/1996 Gazz. Uff. Suppl. Ordin. n° 29 del 05/02/1996 “Norme tecniche relative ai «Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi»”.
- 4) Manuale del Costruttore Civile e del Geometra, Edizioni Cremonese, IV edizione 1980.
- 5) David B. Leeson, W6QHS, Physical Design of Yagi Antennas, ARRL 1992.