PROVINCIA DI AGRIGENTO

COMUNI DI CAMPOBELLO DI LICATA E LICATA

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE DA REALIZZARSI NEI COMUNI DI CAMPOBELLO DI LICATA E LICATA (AG) COMPOSTO DA 9 AEROGENERATORI DELLA POTENZA COMPLESSIVA DI 54 MW

Committente

Edison Rinnovabili S.p.A.

Foro Buonaparte, 31
20121 Milano

TRUBIA LEONARDO

Firmato digitalmente da TRUBIA LEONARDO
ND: c=IT, sn=TRUBIA, givenName=LEONARDO, serialNumber=TINIT-TRBLRD69S06H245D, cn=TRUBIA LEONARDO, dnQualifier=LOTL2022122242931844
Data: 2023.12.19 07:47:26 +01'00'

Elaborazione	Progettista
DCC s.r.l. ***Development Consulting Company*** DCC srl - Via Edmondo De Amicis, 15 - 90143 Palermo (PA) Cap. Soc. € 10.000,00 i.v. Registro Imprese CCIAA Palermo ed Enna C.F. e P.IVA 06948730822 email: dccsrl2050@gmail.com Mobile: +39 3666609133	*Ing. Leonardo Trubia* Via Leone XIII, 50 - 90020 Castellana Sicula Tel. 0921 562456 e-mail *leotrubia@libero.it*

TAVOLA	OGGETTO:	
PRORL0026	Relazione Gittata Massima Elementi Rotanti	
SCALA: -	NOME FILE: PRORL0026 – Relazione Gittata Massima Elementi Rotanti	DATA *01 DICEMBRE 2023*

Proponente: Coordinatori:

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
A	EMISSIONE	01/12/2023	Ing. Leonardo Trubia	DCC S.r.l.	Edison Rinnovabili S.p.A.

Sommario

1 PREMESSA 2
2 STORICO DEGLI INCIDENTI 3
3 CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE 4
4 AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO 6
5 ROTTURA PALA 7
5.1 FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA 7
5.2 MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO 9
5.3 ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE 10
5.4 FRAMMENTO DI PALA 23
5.5 GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA 18
6 CONCLUSIONI 19

1 PREMESSA

Il presente documento costituisce la Relazione Gittata massima degli elementi rotanti relativa al Progetto definitivo per la realizzazione di un impianto eolico composto da 9 aerogeneratori di grande taglia (fino a 6 MW), per una potenza totale installata fino a 54 MW, e le relative opere di connessione alla Rete Elettrica Nazionale interessano i comuni di Campobello di Licata e Licata (AG).

In particolare l'impianto prevede un collegamento in antenna a 220 kV con una nuova stazione 220 kV della RTN da inserire in entra - esce su entrambe le terne della linea RTN a 220 kV "Favara – Chiaramonte Gulfi"

Il modello tipo di aerogeneratore scelto avrà potenza nominale di 6,00 MW con altezza mozzo pari a 105 m, diametro rotore pari a 155 m e altezza massima al top della pala pari a 180 m.

Questa tipologia di aerogeneratore è allo stato attuale quella ritenuto più idonea per il sito di progetto dell'impianto.

La presente relazione costituisce quindi lo studio della distanza massima raggiungibile dalla rottura di una pala o di un frammento di essa (gittata massima).

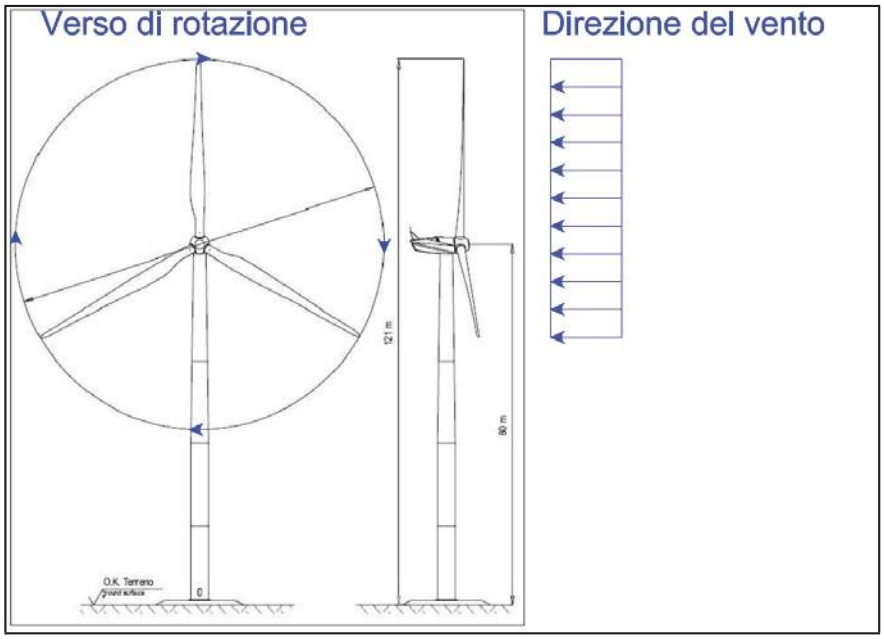
In qualsiasi caso, la gittata massima e la velocità all'impatto sono dei fattori determinanti per la stima del rischio. La gittata massima dipende dal prodotto "raggio della pala x velocità di rotazione". Il calcolo presenta alcune complessità in quanto le variabili in gioco sono numerose ed il risultato può essere soltanto di tipo probabilistico in quanto legato alle modalità ed al momento del distacco. Infatti, un corpo lanciato in aria in presenza di forte vento potrebbe dar luogo ad effetti di "portanza" che possono prolungare i tempi di volo. L'effetto viscoso dell'aria, d'altra parte, ha un effetto opposto frenando il corpo stesso. Considerando, quindi, la natura della pala avente un profilo aerodinamico, lo studio del moto risulta complesso, a causa di tutte le forze e dei momenti che nascono al momento del distacco e nell'interazione col vento.

2 STORICO DEGLI INCIDENTI

Il tasso d'incidentalità, nell'ultimo decennio, è ancora diminuito a seguito dell'evoluzione tecnologica e del miglioramento delle macchine eoliche, malgrado l'aumento medio delle loro dimensioni. Uno studio danese ha condotto su 18 mesi, tra il 1998 e i 1999, un'analisi riguardante le pale, le navicelle e le torri di 2.130 rotori, per una produzione complessiva di 540 MW. Su 3.195 anni cumulati di funzionamento, solo 7 incidenti hanno comportato la distruzione delle pale. Il tasso è dunque di un incidente ogni 457 anni-macchina. Si noti che la Danimarca presenta maggiori rischi di guasti e di sospensione della produzione a causa della presenza di brina e di ghiaccio.
Un altro studio danese a partire da dati registrati su 120 mesi tra il 1993 e il 2003 in un parco di 1.912 impianti mostra una probabilità di distruzione di 0,00083 impianti per anno. In ambito rurale, la correlazione di questa statistica ($6x10^{-5}$/anno) con la probabilità di occupazione di un m^2 di terreno da parte di una persona individua una probabilità globale di ferire qualcuno molto bassa.

3 CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Le pale di un aerogeneratore sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore. Vi è un sistema di controllo aerodinamico, chiamato imbardata, che permette il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, modificando l'orientamento rispetto alla direzione del vento, per offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, un verso orario di rotazione. Si riporta di seguito una figura esemplificativa che evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento.



Relazione tra direzione del vento e rotazione delle pale.

Questa considerazione servirà per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale e a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano.

Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva che individua la direzione del moto del corpo che si distacca. Mettendo in relazione tale traiettoria con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può rappresentare un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.

4 AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO

L'aerogeneratore tipo di riferimento avrà le seguenti caratteristiche:

ROTORE

Diametro 155 m

- Area spazzata 18.860 m^2
- Velocità di rotazione 4,9 – 12,0 rpm
- Numero pale 3
- Altezza rotore 105,0 m

TORRE

- Tipo: tubolare
- Struttura: sezioni collegate tramite flangiatura
- Altezza totale 180,0 m

FUNZIONAMENTO

- Cut-out 22,5 m/s (velocità del rotore gradualmente ridotta)
- Potenza 6 MW

5 ROTTURA PALA

Le modalità di rottura della pala possono essere assai diverse. Essendo un organo in rotazione è soggetto alla forza centripeta che va equilibrata con l'azione della struttura della torre stessa. Per minimizzare tale forza, la pala è costruita in materiale leggero; normalmente si utilizzano materiali compositi che sfruttano le caratteristiche meccaniche così da far fronte ai carichi aerodinamici imposti.

Le modalità di rottura sono classificabili in due gruppi:

1) Rottura della pala alla Zadice.

2) Rottura di frammento.

5.1 FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA

Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore della pala o della sezione di pala distaccata, si avrebbe nel caso di distaccamento in corrispondenza della posizione palare pari a 45 gradi e di moto a "giavellotto" del frammento. Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di un moto a giavellotto è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni resistive del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala/frammento-di-pala, si oppongono al moto e riducono il tempo e la distanza di volo.

La traiettoria iniziale della pala/sezione-di-pala distaccata è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia. Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione-di-pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

Il tempo di volo generalmente è determinato:

- dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla

pala/sezione di pala immediatamente dopo il distacco, in corrispondenza del suo punto baricentrico;

- dalla posizione rispetto al suolo;
- dall'accelerazione verticale;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa.

Il tempo di volo che si deduce da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

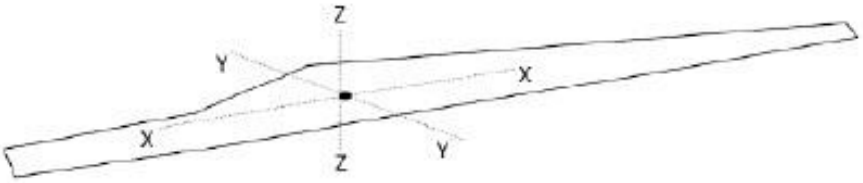
Distanza percorsa

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- dalle forze di attrito che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo;
- dal tempo di volo.

5.2 MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO

Il moto reale della parte distaccata risulta molto complesso, poiché dipendente, come detto, dalle caratteristiche aerodinamiche di questa e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto "a giavellotto" sono da ritenere, come accennato, poco realistici data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell'azione del vento. Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala e la pala intera) che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il modello "Complex Rotational Motion", che permette di studiare il moto nel suo complesso, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx, yy, zz.



La rotazione della pala intorno all'asse zz è causato dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano. La rotazione intorno agli altri assi è dovuta alle azioni indotte dal vento incidente out of plane sulla pala/sezione di pala. In particolare, si genera:

- un momento intorno all'asse yy: centro di massa e centro aerodinamico della pala/sezione di pala non coincidono;
- un momento intorno all'asse xx: centro di massa della sezione di pala lungo la corda e il centro aerodinamico non coincidono.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali agenti sulla pala/frammento di pala: al momento del distacco, oltre all'impulso, agiscono anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise. Pertanto, il moto della parte distaccata sarà un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità. La resistenza offerta dalla pala al moto sia *in plane* che *out plane* è generata dalla rotazione intorno agli assi xx e yy.

La massima gittata della pala/frammento di pala è strettamente dipendente:

- dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- dalla dimensione del frammento;
- dal peso del frammento (più leggero è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- dal profilo aerodinamico della pala/frammento di pala.

Possiamo pertanto concludere che:

- se effettuiamo un calcolo che tenga conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale otteniamo valori di gittata più alti di quelli reali (valore teorico > valore reale)
- più che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre, i valori della gittata dipendono dalla velocità di rotazione.

5.3 ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE

La rottura della pala alla radice è un evento che storicamente è risultato frequente (rispetto al numero di rotture totali) in quanto la sezione di attacco risulta assai "critica" dal punto di vista strutturale.

Le cause sono sostanzialmente due:

1. La discontinuità della struttura che passa da un carico distribuito sulle fibre alla flangia di attacco crea inevitabili concentrazioni tensionali che con l'andare del tempo può creare problemi di affaticamento con conseguente rottura. C'è da dire che i costruttori hanno ben chiaro il problema e che negli ultimi anni si sono introdotti diversi accorgimenti che hanno migliorato di molto le prestazioni;
2. La rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo. Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni serrati opportunamente durante l'installazione della turbina.

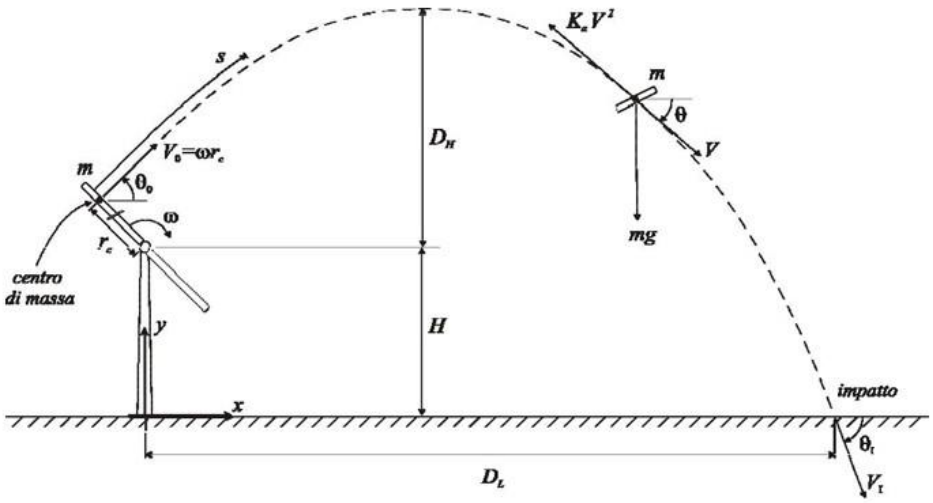
Il precarico conferito ai bulloni durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla

resistenza dei bulloni stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina. L'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono determinare la rottura per fatica dei bulloni ed al distacco della pala.

Per la stima della gittata massima dell'intera pala si impongono alcune ipotesi semplificative:

- distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- baricentro posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala;

- assenza di attriti viscosi durante il volo: questa ipotesi risulta conservativa considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20%;
- distacco in corrispondenza di un angolo di 315° rispetto alla verticale, che dal punto di vista teorico garantisce la massima gittata (moto in senso orario);
- distacco alla rotazione di funzionamento massima;
- vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
- assenza di effetti di "portanza" del profilo alare.



Traiettoria della pala

Equazioni del moto

applicate:

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità sono

$$x'' = 0$$

$$y'' = -g$$

dove g = 9,8 m/s è l'accelerazione di gravità. La legge del moto, soluzione di queste equazioni è:

$$x(t) = x_0 + v_x t$$

$$y(t) = y_0 + v_y t - 1/2 g t^2$$

dove $(x_0 ; y_0)$, è la posizione iniziale del punto materiale e $(v_x ; v_y)$è la sua velocità. La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo T tale che Y(T)=0 Dalla legge del moto si ottiene

$$T = v_y/g + 1/gv(v_y^2 + 2y_0 g)$$

scartando la soluzione corrispondente a tempi negativi.

Consideriamo il moto bidimensionale dell'elemento rotante, come il moto di un punto materiale concentrato nel baricentro, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento. Chiamiamo con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a 2Tradianti, per n giri avremo 2Tn radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare w del corpo in movimento. Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

w= 2rrn/60 rad/sec

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa rg = 26,0 m essendo il diametro del rotore D = 155,0 m e la lunghezza metà navicella/pala pari a 77,5 m circa.

Per determinare la velocità del baricentro della pala basta moltiplicare la distanza del

baricentro dal centro di rotazione per la velocità angolare. Il numero di giri valutato per questa analisi è pari a 12,00 giri/minuto (numero di giri massimo valutato per l'aerogeneratore di progetto). Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_0 = wr_g = 2rrn/60\ r_g = 33{,}91\ m/sec$$

posizione e la velocità iniziale sono determinati, oltre che dalla velocità tangenziale appena calcolata, anche dall'angolo 8 della pala al momento del distacco.

Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

- $x_o = r_g \cos(\backslash J)$;

- $y_g = H + r_g \sin(\backslash J)$;

- $v_x = V_0 \sin(\backslash J)$;

- $v_y = V_0 \cos(\backslash J)$.

La gittata G_{max} è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo della pala; l'altezza H è l'altezza del mozzo della torre (105 m).

Dalla legge del moto otteniamo, sostituendo l'espressione ricavata per T, otteniamo la gittata G_{max} in termini di V_0 e di B:

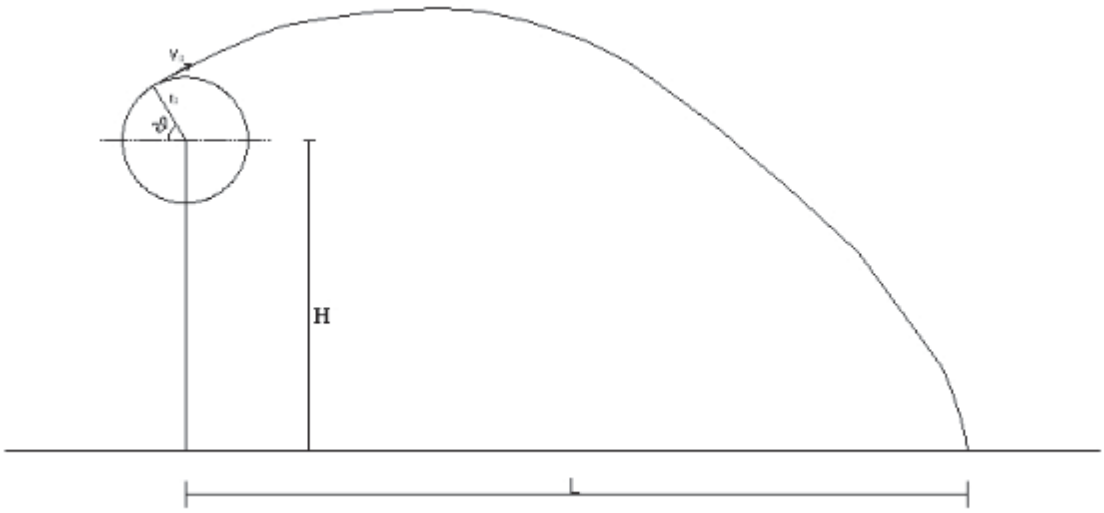
$$G_{max} = V_{x0}/g*(-V_{yo} \pm (V_{y0}^2 - 4(1/2*g*H_G)^{0.5})$$

Nella formula di L sopra riportata, si assumono i seguenti dati:

- $V_{0,calcolo}$ = 30,18 m/s
- rg = 26,0 m
- g = 9.81m/s
- H_{rot}= 105 m

Il valore della gittata dipenderà dall'angolo \J.

Al valore G_{max} ottenuto andrà infine sommata un'aliquota pari ai 2/3 della pala, ipotizzando in tale posizione il baricentro della stessa.



Si noti che fissato un generico angolo \J, la gittata aumenta quadraticamente con V_0 salvo i casi particolari \J=±90°, \J=0°, \J=180°., nei quali la gittata aumenta linearmente con V oppure è pari a r_g. Come si evidenzia dal grafico e numericamente dalla tabella sotto riportata il valore massimo della gittata è pari a 186,46 m circa con un angolo di distacco pari a 67° sull'orizzontale. A tale valore dovrà aggiungersi la distanza del vertice della pala dal baricentro, 51,67 m per un valore complessivo della gittata G_{tot} = 238,13 m.

Angolo α	n	L	H_{torre}	v_0	v_{x0}	v_{y0}	H_g	D	r_g	g	Gittata teorica	X_g	L_g	Gittata Effettiva
0	12,00	77,50	105,00	32,46	0,00	32,46	105,00	155	25,83	9,81	-25,83	25,83	51,67	25,83
1	12,00	77,50	105,00	32,46	0,57	32,46	105,45	155	25,83	9,81	-20,73	25,83	51,67	30,94
2	12,00	77,50	105,00	32,46	1,13	32,44	105,90	155	25,83	9,81	-15,61	25,82	51,67	36,06
3	12,00	77,50	105,00	32,46	1,70	32,42	106,35	155	25,83	9,81	-10,48	25,80	51,67	41,18
4	12,00	77,50	105,00	32,46	2,26	32,38	106,80	155	25,83	9,81	-5,35	25,77	51,67	46,32
5	12,00	77,50	105,00	32,46	2,83	32,34	107,25	155	25,83	9,81	-0,22	25,74	51,67	51,45
6	12,00	77,50	105,00	32,46	3,39	32,29	107,70	155	25,83	9,81	4,91	25,69	51,67	56,57
7	12,00	77,50	105,00	32,46	3,96	32,22	108,15	155	25,83	9,81	10,02	25,64	51,67	61,69
8	12,00	77,50	105,00	32,46	4,52	32,15	108,60	155	25,83	9,81	15,13	25,58	51,67	66,80
9	12,00	77,50	105,00	32,46	5,08	32,06	109,04	155	25,83	9,81	20,22	25,52	51,67	71,88
10	12,00	77,50	105,00	32,46	5,64	31,97	109,49	155	25,83	9,81	25,28	25,44	51,67	76,95
11	12,00	77,50	105,00	32,46	6,19	31,87	109,93	155	25,83	9,81	30,33	25,36	51,67	81,99
12	12,00	77,50	105,00	32,46	6,75	31,75	110,37	155	25,83	9,81	35,34	25,27	51,67	87,01
13	12,00	77,50	105,00	32,46	7,30	31,63	110,81	155	25,83	9,81	40,32	25,17	51,67	91,98
14	12,00	77,50	105,00	32,46	7,85	31,50	111,25	155	25,83	9,81	45,26	25,07	51,67	96,93
15	12,00	77,50	105,00	32,46	8,40	31,36	111,69	155	25,83	9,81	50,16	24,95	51,67	101,83
16	12,00	77,50	105,00	32,46	8,95	31,21	112,12	155	25,83	9,81	55,02	24,83	51,67	106,68
17	12,00	77,50	105,00	32,46	9,49	31,04	112,55	155	25,83	9,81	59,82	24,70	51,67	111,49
Angolo α	n	L	H_{torre}	v_0	v_{x0}	v_{y0}	H_g	D	r_g	g	Gittata teorica	X_g	L_g	Gittata Effettiva
18	12,00	77,50	105,00	32,46	10,03	30,87	112,98	155	25,83	9,81	64,58	24,57	51,67	116,24
19	12,00	77,50	105,00	32,46	10,57	30,69	113,41	155	25,83	9,81	69,28	24,43	51,67	120,94
20	12,00	77,50	105,00	32,46	11,10	30,51	113,84	155	25,83	9,81	73,91	24,28	51,67	125,58
21	12,00	77,50	105,00	32,46	11,63	30,31	114,26	155	25,83	9,81	78,49	24,12	51,67	130,16
22	12,00	77,50	105,00	32,46	12,16	30,10	114,68	155	25,83	9,81	83,00	23,95	51,67	134,67
23	12,00	77,50	105,00	32,46	12,68	29,88	115,09	155	25,83	9,81	87,44	23,78	51,67	139,11
24	12,00	77,50	105,00	32,46	13,20	29,66	115,51	155	25,83	9,81	91,81	23,60	51,67	143,47
25	12,00	77,50	105,00	32,46	13,72	29,42	115,92	155	25,83	9,81	96,10	23,41	51,67	147,77
26	12,00	77,50	105,00	32,46	14,23	29,18	116,32	155	25,83	9,81	100,31	23,22	51,67	151,98
27	12,00	77,50	105,00	32,46	14,74	28,92	116,73	155	25,83	9,81	104,45	23,02	51,67	156,11
28	12,00	77,50	105,00	32,46	15,24	28,66	117,13	155	25,83	9,81	108,49	22,81	51,67	160,16
29	12,00	77,50	105,00	32,46	15,74	28,39	117,52	155	25,83	9,81	112,45	22,59	51,67	164,12
30	12,00	77,50	105,00	32,46	16,23	28,11	117,92	155	25,83	9,81	116,33	22,37	51,67	167,99
31	12,00	77,50	105,00	32,46	16,72	27,83	118,31	155	25,83	9,81	120,11	22,14	51,67	171,77
32	12,00	77,50	105,00	32,46	17,20	27,53	118,69	155	25,83	9,81	123,79	21,91	51,67	175,46

33	12,00	77,50	105,00	32,46	17,68	27,23	119,07	155	25,83	9,81	127,39	21,67	51,67	179,05
34	12,00	77,50	105,00	32,46	18,15	26,91	119,45	155	25,83	9,81	130,88	21,42	51,67	182,55
35	12,00	77,50	105,00	32,46	18,62	26,59	119,82	155	25,83	9,81	134,27	21,16	51,67	185,94
36	12,00	77,50	105,00	32,46	19,08	26,26	120,18	155	25,83	9,81	137,57	20,90	51,67	189,23
37	12,00	77,50	105,00	32,46	19,54	25,93	120,55	155	25,83	9,81	140,76	20,63	51,67	192,42
38	12,00	77,50	105,00	32,46	19,99	25,58	120,90	155	25,83	9,81	143,84	20,36	51,67	195,51
39	12,00	77,50	105,00	32,46	20,43	25,23	121,26	155	25,83	9,81	146,82	20,08	51,67	198,49
40	12,00	77,50	105,00	32,46	20,87	24,87	121,61	155	25,83	9,81	149,70	19,79	51,67	201,36
41	12,00	77,50	105,00	32,46	21,30	24,50	121,95	155	25,83	9,81	152,46	19,50	51,67	204,13
42	12,00	77,50	105,00	32,46	21,72	24,12	122,29	155	25,83	9,81	155,12	19,20	51,67	206,79
43	12,00	77,50	105,00	32,46	22,14	23,74	122,62	155	25,83	9,81	157,67	18,89	51,67	209,34
44	12,00	77,50	105,00	32,46	22,55	23,35	122,95	155	25,83	9,81	160,11	18,58	51,67	211,78
45	12,00	77,50	105,00	32,46	22,95	22,95	123,27	155	25,83	9,81	162,44	18,27	51,67	214,11
46	12,00	77,50	105,00	32,46	23,35	22,55	123,58	155	25,83	9,81	164,66	17,95	51,67	216,32
Angolo α	n	L	H_{torre}	v_0	v_{x0}	v_{y0}	H_g	D	r_g	g	Gittata teorica	X_g	L_g	Gittata Effettiva
47	12,00	77,50	105,00	32,46	23,74	22,14	123,89	155	25,83	9,81	166,77	17,62	51,67	218,43
48	12,00	77,50	105,00	32,46	24,12	21,72	124,20	155	25,83	9,81	168,76	17,29	51,67	220,43
49	12,00	77,50	105,00	32,46	24,50	21,30	124,50	155	25,83	9,81	170,65	16,95	51,67	222,31
50	12,00	77,50	105,00	32,46	24,87	20,87	124,79	155	25,83	9,81	172,42	16,61	51,67	224,09
51	12,00	77,50	105,00	32,46	25,23	20,43	125,08	155	25,83	9,81	174,09	16,26	51,67	225,75
52	12,00	77,50	105,00	32,46	25,58	19,99	125,36	155	25,83	9,81	175,64	15,90	51,67	227,31
53	12,00	77,50	105,00	32,46	25,93	19,54	125,63	155	25,83	9,81	177,09	15,55	51,67	228,76
54	12,00	77,50	105,00	32,46	26,26	19,08	125,90	155	25,83	9,81	178,43	15,18	51,67	230,09
55	12,00	77,50	105,00	32,46	26,59	18,62	126,16	155	25,83	9,81	179,66	14,82	51,67	231,32
56	12,00	77,50	105,00	32,46	26,91	18,15	126,42	155	25,83	9,81	180,78	14,45	51,67	232,45
57	12,00	77,50	105,00	32,46	27,23	17,68	126,67	155	25,83	9,81	181,80	14,07	51,67	233,46
58	12,00	77,50	105,00	32,46	27,53	17,20	126,91	155	25,83	9,81	182,71	13,69	51,67	234,38
59	12,00	77,50	105,00	32,46	27,83	16,72	127,14	155	25,83	9,81	183,52	13,31	51,67	235,19
60	12,00	77,50	105,00	32,46	28,11	16,23	127,37	155	25,83	9,81	184,23	12,92	51,67	235,89
61	12,00	77,50	105,00	32,46	28,39	15,74	127,59	155	25,83	9,81	184,83	12,52	51,67	236,50
62	12,00	77,50	105,00	32,46	28,66	15,24	127,81	155	25,83	9,81	185,34	12,13	51,67	237,01
63	12,00	77,50	105,00	32,46	28,92	14,74	128,02	155	25,83	9,81	185,75	11,73	51,67	237,42
64	12,00	77,50	105,00	32,46	29,18	14,23	128,22	155	25,83	9,81	186,07	11,32	51,67	237,74
65	12,00	77,50	105,00	32,46	29,42	13,72	128,41	155	25,83	9,81	186,29	10,92	51,67	237,96
66	12,00	77,50	105,00	32,46	29,66	13,20	128,60	155	25,83	9,81	186,42	10,51	51,67	238,09
67	**12,00**	**77,50**	**105,00**	**32,46**	**29,88**	**12,68**	**128,78**	**155**	**25,83**	**9,81**	**186,46**	**10,09**	**51,67**	**238,13**
68	12,00	77,50	105,00	32,46	30,10	12,16	128,95	155	25,83	9,81	186,41	9,68	51,67	238,08
69	12,00	77,50	105,00	32,46	30,31	11,63	129,12	155	25,83	9,81	186,28	9,26	51,67	237,94

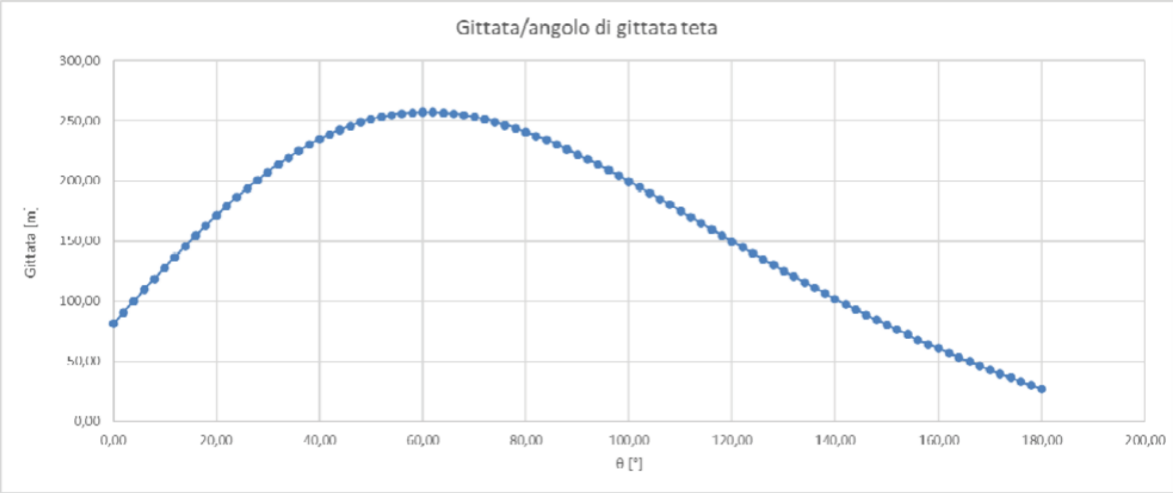
70	12,00	77,50	105,00	32,46	30,51	11,10	129,28	155	25,83	9,81	186,06	8,84	51,67	237,73
71	12,00	77,50	105,00	32,46	30,69	10,57	129,43	155	25,83	9,81	185,76	8,41	51,67	237,43
72	12,00	77,50	105,00	32,46	30,87	10,03	129,57	155	25,83	9,81	185,38	7,98	51,67	237,05
73	12,00	77,50	105,00	32,46	31,04	9,49	129,70	155	25,83	9,81	184,93	7,55	51,67	236,59
74	12,00	77,50	105,00	32,46	31,21	8,95	129,83	155	25,83	9,81	184,39	7,12	51,67	236,06
75	12,00	77,50	105,00	32,46	31,36	8,40	129,95	155	25,83	9,81	183,79	6,69	51,67	235,46
Angolo α	n	L	H_{torre}	v_0	v_{x0}	v_{y0}	H_g	D	r_g	g	Gittata teorica	X_g	L_g	Gittata Effettiva
76	12,00	77,50	105,00	32,46	31,50	7,85	130,07	155	25,83	9,81	183,12	6,25	51,67	234,78
77	12,00	77,50	105,00	32,46	31,63	7,30	130,17	155	25,83	9,81	182,38	5,81	51,67	234,04
78	12,00	77,50	105,00	32,46	31,75	6,75	130,27	155	25,83	9,81	181,57	5,37	51,67	233,24
79	12,00	77,50	105,00	32,46	31,87	6,19	130,36	155	25,83	9,81	180,70	4,93	51,67	232,37
80	12,00	77,50	105,00	32,46	31,97	5,64	130,44	155	25,83	9,81	179,77	4,49	51,67	231,44
81	12,00	77,50	105,00	32,46	32,06	5,08	130,52	155	25,83	9,81	178,78	4,04	51,67	230,45
82	12,00	77,50	105,00	32,46	32,15	4,52	130,58	155	25,83	9,81	177,74	3,60	51,67	229,41
83	12,00	77,50	105,00	32,46	32,22	3,96	130,64	155	25,83	9,81	176,64	3,15	51,67	228,31
84	12,00	77,50	105,00	32,46	32,29	3,39	130,69	155	25,83	9,81	175,49	2,70	51,67	227,16
85	12,00	77,50	105,00	32,46	32,34	2,83	130,74	155	25,83	9,81	174,30	2,25	51,67	225,96
86	12,00	77,50	105,00	32,46	32,38	2,26	130,77	155	25,83	9,81	173,05	1,80	51,67	224,72
87	12,00	77,50	105,00	32,46	32,42	1,70	130,80	155	25,83	9,81	171,76	1,35	51,67	223,43
88	12,00	77,50	105,00	32,46	32,44	1,13	130,82	155	25,83	9,81	170,44	0,90	51,67	222,10
89	12,00	77,50	105,00	32,46	32,46	0,57	130,83	155	25,83	9,81	169,07	0,45	51,67	220,73
90	12,00	77,50	105,00	32,46	32,46	0,00	130,83	155	25,83	9,81	167,66	0,00	51,67	219,33

Per un angolo compreso tra 270° e 360° il valore della Gittata sarà negativo perché verso sinistra														
Angolo α	n	L	H_{torre}	v_0	v_{x0}	v_{y0}	H_g	D	r_g	g	Gittata teorica	X_g	L_g	Gittata Effettiva
270	12,00	77,50	105,00	32,46	-32,46	0,00	79,17	155	25,83	9,81	-130,42	0,00	51,67	-182,09
271	12,00	77,50	105,00	32,46	-32,46	0,57	79,17	155	25,83	9,81	-132,74	0,45	51,67	-184,41
272	12,00	77,50	105,00	32,46	-32,44	1,13	79,18	155	25,83	9,81	-135,06	0,90	51,67	-186,72
273	12,00	77,50	105,00	32,46	-32,42	1,70	79,20	155	25,83	9,81	-137,36	1,35	51,67	-189,02
274	12,00	77,50	105,00	32,46	-32,38	2,26	79,23	155	25,83	9,81	-139,65	1,80	51,67	-191,31
275	12,00	77,50	105,00	32,46	-32,34	2,83	79,26	155	25,83	9,81	-141,92	2,25	51,67	-193,58
276	12,00	77,50	105,00	32,46	-32,29	3,39	79,31	155	25,83	9,81	-144,17	2,70	51,67	-195,83
277	12,00	77,50	105,00	32,46	-32,22	3,96	79,36	155	25,83	9,81	-146,40	3,15	51,67	-198,06
278	12,00	77,50	105,00	32,46	-32,15	4,52	79,42	155	25,83	9,81	-148,60	3,60	51,67	-200,27
Angolo	n	L	H_{torre}	v_0	v_{x0}	v_{y0}	H_g	D	r_g	g	Gittata	X_g	L_g	Gittata

α											teorica			Effettiva
279	12,00	77,50	105,00	32,46	-32,06	5,08	79,48	155	25,83	9,81	-150,77	4,04	51,67	-202,44
280	12,00	77,50	105,00	32,46	-31,97	5,64	79,56	155	25,83	9,81	-152,92	4,49	51,67	-204,58
281	12,00	77,50	105,00	32,46	-31,87	6,19	79,64	155	25,83	9,81	-155,02	4,93	51,67	-206,69
282	12,00	77,50	105,00	32,46	-31,75	6,75	79,73	155	25,83	9,81	-157,09	5,37	51,67	-208,76
283	12,00	77,50	105,00	32,46	-31,63	7,30	79,83	155	25,83	9,81	-159,12	5,81	51,67	-210,79
284	12,00	77,50	105,00	32,46	-31,50	7,85	79,93	155	25,83	9,81	-161,10	6,25	51,67	-212,77
285	12,00	77,50	105,00	32,46	-31,36	8,40	80,05	155	25,83	9,81	-163,03	6,69	51,67	-214,70
286	12,00	77,50	105,00	32,46	-31,21	8,95	80,17	155	25,83	9,81	-164,91	7,12	51,67	-216,58
287	12,00	77,50	105,00	32,46	-31,04	9,49	80,30	155	25,83	9,81	-166,74	7,55	51,67	-218,40
288	12,00	77,50	105,00	32,46	-30,87	10,03	80,43	155	25,83	9,81	-168,50	7,98	51,67	-220,17
289	12,00	77,50	105,00	32,46	-30,69	10,57	80,57	155	25,83	9,81	-170,21	8,41	51,67	-221,87
290	12,00	77,50	105,00	32,46	-30,51	11,10	80,72	155	25,83	9,81	-171,84	8,84	51,67	-223,51
291	12,00	77,50	105,00	32,46	-30,31	11,63	80,88	155	25,83	9,81	-173,41	9,26	51,67	-225,08
292	12,00	77,50	105,00	32,46	-30,10	12,16	81,05	155	25,83	9,81	-174,90	9,68	51,67	-226,57
293	12,00	77,50	105,00	32,46	-29,88	12,68	81,22	155	25,83	9,81	-176,32	10,09	51,67	-227,99
294	12,00	77,50	105,00	32,46	-29,66	13,20	81,40	155	25,83	9,81	-177,66	10,51	51,67	-229,33
295	12,00	77,50	105,00	32,46	-29,42	13,72	81,59	155	25,83	9,81	-178,92	10,92	51,67	-230,58
296	12,00	77,50	105,00	32,46	-29,18	14,23	81,78	155	25,83	9,81	-180,09	11,32	51,67	-231,75
297	12,00	77,50	105,00	32,46	-28,92	14,74	81,98	155	25,83	9,81	-181,17	11,73	51,67	-232,83
298	12,00	77,50	105,00	32,46	-28,66	15,24	82,19	155	25,83	9,81	-182,16	12,13	51,67	-233,82
299	12,00	77,50	105,00	32,46	-28,39	15,74	82,41	155	25,83	9,81	-183,05	12,52	51,67	-234,72
300	12,00	77,50	105,00	32,46	-28,11	16,23	82,63	155	25,83	9,81	-183,85	12,92	51,67	-235,51
301	12,00	77,50	105,00	32,46	-27,83	16,72	82,86	155	25,83	9,81	-184,54	13,31	51,67	-236,21
302	12,00	77,50	105,00	32,46	-27,53	17,20	83,09	155	25,83	9,81	-185,13	13,69	51,67	-236,80
303	12,00	77,50	105,00	32,46	-27,23	17,68	83,33	155	25,83	9,81	-185,62	14,07	51,67	-237,29
304	12,00	77,50	105,00	32,46	-26,91	18,15	83,58	155	25,83	9,81	-186,00	14,45	51,67	-237,66
305	12,00	77,50	105,00	32,46	-26,59	18,62	83,84	155	25,83	9,81	-186,26	14,82	51,67	-237,93
306	12,00	77,50	105,00	32,46	-26,26	19,08	84,10	155	25,83	9,81	-186,42	15,18	51,67	-238,09
307	12,00	77,50	105,00	32,46	-25,93	19,54	84,37	155	25,83	9,81	-186,46	15,55	51,67	-238,13
Angolo α	n	L	H_{torre}	v_0	v_{x0}	v_{y0}	H_g	D	r_g	g	Gittata teorica	X_g	L_g	Gittata Effettiva
308	12,00	77,50	105,00	32,46	-25,58	19,99	84,64	155	25,83	9,81	-186,38	15,90	51,67	-238,05
309	12,00	77,50	105,00	32,46	-25,23	20,43	84,92	155	25,83	9,81	-186,19	16,26	51,67	-237,85
310	12,00	77,50	105,00	32,46	-24,87	20,87	85,21	155	25,83	9,81	-185,87	16,61	51,67	-237,54
311	12,00	77,50	105,00	32,46	-24,50	21,30	85,50	155	25,83	9,81	-185,43	16,95	51,67	-237,10
312	12,00	77,50	105,00	32,46	-24,12	21,72	85,80	155	25,83	9,81	-184,87	17,29	51,67	-236,54
313	12,00	77,50	105,00	32,46	-23,74	22,14	86,11	155	25,83	9,81	-184,19	17,62	51,67	-235,86
314	12,00	77,50	105,00	32,46	-23,35	22,55	86,42	155	25,83	9,81	-183,38	17,95	51,67	-235,05

315	12,00	77,50	105,00	32,46	-22,95	22,95	86,73	155	25,83	9,81	-182,45	18,27	51,67	-234,11
316	12,00	77,50	105,00	32,46	-22,55	23,35	87,05	155	25,83	9,81	-181,38	18,58	51,67	-233,05
317	12,00	77,50	105,00	32,46	-22,14	23,74	87,38	155	25,83	9,81	-180,19	18,89	51,67	-231,86
318	12,00	77,50	105,00	32,46	-21,72	24,12	87,71	155	25,83	9,81	-178,88	19,20	51,67	-230,54
319	12,00	77,50	105,00	32,46	-21,30	24,50	88,05	155	25,83	9,81	-177,43	19,50	51,67	-229,10
320	12,00	77,50	105,00	32,46	-20,87	24,87	88,39	155	25,83	9,81	-175,86	19,79	51,67	-227,53
321	12,00	77,50	105,00	32,46	-20,43	25,23	88,74	155	25,83	9,81	-174,16	20,08	51,67	-225,83
322	12,00	77,50	105,00	32,46	-19,99	25,58	89,10	155	25,83	9,81	-172,33	20,36	51,67	-224,00
323	12,00	77,50	105,00	32,46	-19,54	25,93	89,45	155	25,83	9,81	-170,38	20,63	51,67	-222,05
324	12,00	77,50	105,00	32,46	-19,08	26,26	89,82	155	25,83	9,81	-168,30	20,90	51,67	-219,97
325	12,00	77,50	105,00	32,46	-18,62	26,59	90,18	155	25,83	9,81	-166,09	21,16	51,67	-217,76
326	12,00	77,50	105,00	32,46	-18,15	26,91	90,55	155	25,83	9,81	-163,76	21,42	51,67	-215,43
327	12,00	77,50	105,00	32,46	-17,68	27,23	90,93	155	25,83	9,81	-161,31	21,67	51,67	-212,97
328	12,00	77,50	105,00	32,46	-17,20	27,53	91,31	155	25,83	9,81	-158,73	21,91	51,67	-210,39
329	12,00	77,50	105,00	32,46	-16,72	27,83	91,69	155	25,83	9,81	-156,03	22,14	51,67	-207,70
330	12,00	77,50	105,00	32,46	-16,23	28,11	92,08	155	25,83	9,81	-153,21	22,37	51,67	-204,88
331	12,00	77,50	105,00	32,46	-15,74	28,39	92,48	155	25,83	9,81	-150,27	22,59	51,67	-201,94
332	12,00	77,50	105,00	32,46	-15,24	28,66	92,87	155	25,83	9,81	-147,22	22,81	51,67	-198,89
333	12,00	77,50	105,00	32,46	-14,74	28,92	93,27	155	25,83	9,81	-144,05	23,02	51,67	-195,72
334	12,00	77,50	105,00	32,46	-14,23	29,18	93,68	155	25,83	9,81	-140,77	23,22	51,67	-192,44
335	12,00	77,50	105,00	32,46	-13,72	29,42	94,08	155	25,83	9,81	-137,38	23,41	51,67	-189,05
336	12,00	77,50	105,00	32,46	-13,20	29,66	94,49	155	25,83	9,81	-133,89	23,60	51,67	-185,55
Angolo α	n	L	H_{torre}	v_0	v_{x0}	v_{y0}	H_g	D	r_g	g	Gittata teorica	X_g	L_g	Gittata Effettiva
337	12,00	77,50	105,00	32,46	-12,68	29,88	94,91	155	25,83	9,81	-130,29	23,78	51,67	-181,95
338	12,00	77,50	105,00	32,46	-12,16	30,10	95,32	155	25,83	9,81	-126,58	23,95	51,67	-178,25
339	12,00	77,50	105,00	32,46	-11,63	30,31	95,74	155	25,83	9,81	-122,78	24,12	51,67	-174,44
340	12,00	77,50	105,00	32,46	-11,10	30,51	96,16	155	25,83	9,81	-118,88	24,28	51,67	-170,54
341	12,00	77,50	105,00	32,46	-10,57	30,69	96,59	155	25,83	9,81	-114,88	24,43	51,67	-166,55
342	12,00	77,50	105,00	32,46	-10,03	30,87	97,02	155	25,83	9,81	-110,80	24,57	51,67	-162,46
343	12,00	77,50	105,00	32,46	-9,49	31,04	97,45	155	25,83	9,81	-106,62	24,70	51,67	-158,29
344	12,00	77,50	105,00	32,46	-8,95	31,21	97,88	155	25,83	9,81	-102,37	24,83	51,67	-154,03
345	12,00	77,50	105,00	32,46	-8,40	31,36	98,31	155	25,83	9,81	-98,03	24,95	51,67	-149,70
346	12,00	77,50	105,00	32,46	-7,85	31,50	98,75	155	25,83	9,81	-93,61	25,07	51,67	-145,28
347	12,00	77,50	105,00	32,46	-7,30	31,63	99,19	155	25,83	9,81	-89,13	25,17	51,67	-140,79
348	12,00	77,50	105,00	32,46	-6,75	31,75	99,63	155	25,83	9,81	-84,57	25,27	51,67	-136,23
349	12,00	77,50	105,00	32,46	-6,19	31,87	100,07	155	25,83	9,81	-79,94	25,36	51,67	-131,61
350	12,00	77,50	105,00	32,46	-5,64	31,97	100,51	155	25,83	9,81	-75,26	25,44	51,67	-126,92
351	12,00	77,50	105,00	32,46	-5,08	32,06	100,96	155	25,83	9,81	-70,51	25,52	51,67	-122,18

352	12,00	77,50	105,00	32,46	-4,52	32,15	101,40	155	25,83	9,81	-65,71	25,58	51,67	-117,38
353	12,00	77,50	105,00	32,46	-3,96	32,22	101,85	155	25,83	9,81	-60,86	25,64	51,67	-112,52
354	12,00	77,50	105,00	32,46	-3,39	32,29	102,30	155	25,83	9,81	-55,96	25,69	51,67	-107,63
355	12,00	77,50	105,00	32,46	-2,83	32,34	102,75	155	25,83	9,81	-51,02	25,74	51,67	-102,69
356	12,00	77,50	105,00	32,46	-2,26	32,38	103,20	155	25,83	9,81	-46,04	25,77	51,67	-97,71
357	12,00	77,50	105,00	32,46	-1,70	32,42	103,65	155	25,83	9,81	-41,03	25,80	51,67	-92,70
358	12,00	77,50	105,00	32,46	-1,13	32,44	104,10	155	25,83	9,81	-35,99	25,82	51,67	-87,66
359	12,00	77,50	105,00	32,46	-0,57	32,46	104,55	155	25,83	9,81	-30,92	25,83	51,67	-82,59
360	12,00	77,50	105,00	32,46	0,00	32,46	105,00	155	25,83	9,81	-25,83	25,83	51,67	-77,50



Dati di input calcolo AEROGENERATORE di riferimento:

D	15	m
Htot	10	m
R	77,5	m
n	12	rpm
rg	26	m
Vo	33,9	m/sec
$Vo_{calcolo}$	30,5	m/sec

Gittata max.,

totale=238,13m.

5.4 FRAMMENTO DI PALA

L'evento della rottura di un frammento consistente di pala risulta meno frequente[1]. Per le caratteristiche del materiale strutturale, tende ad essere una rottura progressiva. Pertanto, nella maggior parte dei casi si ha una prima flessione della struttura con conseguente inevitabile urto con la torre (posta sottovento nella quasi totalità delle WTG). La conseguente rottura dà luogo a traiettorie varie che non sono deterministicamente calcolabili.

1 Analysis of Risk-Involved Incidents of Wind Turbine – version 1.1 Jannuar 2005 – ECN: per la rottura Rottura Pala riporta una probabilità di 8,4 10-4 [1/y] mentre per il frammento 2,6 10-4 [1/y].

Esempio di rottura di pala senza distacco.

Nella maggior parte dei casi di lancio di piccoli frammenti di pala la causa registrata è la concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica. Tale fenomeno è stato considerato dai costruttori che hanno iniziato a dotare gli aerogeneratori di un sistema di convogliamento della corrente di fulminazione costituito da recettori metallici posti lungo la pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale. In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità della pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. È possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala. Per avere un ordine di grandezza sulla distanza raggiunta dai frammenti di una pala eolica, si fa riferimento allo studio "Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy

Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan". Secondo tale studio, la probabilità che un frammento staccatosi di pala staccatosi dalla turbina vada oltre i 50 m dalla torre è dell'ordine di $2x10^{-5}$.

5.5 GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA

Volendo stabilire quale sia la gittata massima del frammento di pala, facendo riferimento al rischio accettato[2] in sede progettuale (pari a 10^{-6}) si raggiunge tale valore a meno di 190 m. A 190 m la probabilità diminuisce ancora di un fattore 10 e, per eventi rari come quelli della rottura di una pala la probabilità diventa praticamente nulla.

[2] European Wind Turbine Standards II

6 CONCLUSIONI

Partendo dai dati degli aerogeneratori in merito alla velocità di rotazione fornita dal costruttore (rpm) sono stati eseguiti dei calcoli di gittata con la teoria della fisica del punto materiale. Il calcolo illustrato nei paragrafi precedenti porta ad un valore massimo di gittata pari a 238 m.

La gittata massima calcolata garantisce la distanza di sicurezza delle turbine sia dalle strade provinciali/statali sia da edifici abitabili (così censiti da analisi catastale) presenti nell'area del parco sia dai limitrofi centri abitati.
Qualora, comunque la direzione del vento prevista, coincida perfettamente con l'asse aerogeneratore – viabilità secondaria, si provvederà alla limitazione del valore di rpm mediante telecontrollo, al fine di rendere sicuro l'esercizio della turbina stessa nei riguardi della gittata della pala eolica.

Si sottolinea inoltre come, il calcolo semplificato svolto in questa sede, risulti particolarmente cautelativo rispetto al calcolo rigoroso effettuabile mediante l'analisi di Moto Rotazionale Complesso.