

Manduria Oria Wind Energy S.r.l

Gennaio 2022

Parco Eolico “Manduria” sito nel Comune di Manduria

**Analisi sugli effetti della
rottura degli organi rotanti**



REGIONE
PUGLIA



Provincia di
Taranto



Committente:

Manduria-Oria Wind Energy S.r.l.
via Sardegna, 40
00187 Roma (RM)
P.IVA/C.F. 15856951007

Documento:

PROGETTO DEFINITIVO

Titolo del Progetto:

PARCO EOLICO "MANDURIA"

Elaborato:

Analisi sugli effetti della rottura degli organi rotanti

ID PROGETTO	DISCIPLINA	CAPITOLO	TIPO	REVISIONE	SCALA	FORMATO
IT-VesMaO-Gem	-	-	-	-	-	A4

NOME FILE:

IT-VesMaO-Gem-ENV-GEN-TR-20-Rev.0

Progettazione:



Geol. Gaetano Bordone

Interprogetti
ingegneria costruzioni ambiente

Arch. Savino Martucci

Arch. Alfredo Masillo

Geol. Giuseppe Masillo

Ing. Saverio Pagliuso

Arch. Savino Martucci

Ing. Massimiliano Spezzano

Rev:	Prima Emissione	Descrizione Revisione	Redatto	Controllato	Approvato
00	Gennaio 2022	PRIMA EMISSIONE	Interprogetti	GEMSA	MANDURIA-ORIA

Sommario

1.0 PREMESSA.....	1
2.0 CARATTERISTICHE TECNICHE AEROGENERATORE.....	2
3.0 RISCHIO DI ROTTURA ACCIDENTALE.....	4
4.0 CALCOLO DELLA GITTATA	5
5.0 DISTACCO DELLA PALA INTERA.....	9
5.1 ROTTURA FRAMMENTO LUNGHEZZA DIECI METRI.....	15
5.2 ROTTURA FRAMMENTO LUNGHEZZA CINQUE METRI	20
5.3 ROTTURA FRAMMENTO LUNGHEZZA UN METRO.....	25
6.0 CONCLUSIONI	30

1.0 PREMESSA

La presente relazione descrive lo studio condotto relativamente al calcolo della gittata, in caso di incidente, se si dovessero separare dei frammenti dagli aerogeneratori utilizzati per la realizzazione di un "Parco Eolico" per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, nel territorio comunale di Manduria,

Il parco eolico in progetto risulta essere composto da 16 torri eoliche con potenza nominale per singolo aerogeneratore di 6,00 MW.

Il rischio di incidenti connessi all'esercizio di un campo eolico sono particolarmente bassi, in quanto sono pressoché nulli i pericoli di esplosione, di contaminazione, di incendio, poiché ciascun aerogeneratore è costituito da una serie di macchine elettriche che vengono costantemente monitorate e gestite mediante l'utilizzo di stazioni telematiche locali e remote; vien, inoltre sottoposto a periodiche manutenzioni che ne assicurino il corretto funzionamento e la integrità delle componenti meccaniche, elettriche ed elettroniche. Infine pe scongiurare qualsiasi rischio conseguente alla remota, ma sempre possibile rottura accidentale degli aerogeneratori, gli stessi saranno posizionati seguendo le indicazioni di sicurezza previste nelle Linee Guida per la costruzione di parchi eolici, e quindi, la distanza delle turbine dalle aree edificabili dei centri urbani sarà 15 volte il diametro dell'elica e comunque tale distanza sarà non inferiore a 1 km.

2.0 CARATTERISTICHE TECNICHE AEROGENERATORE

Il parco eolico in progetto prevede l'impiego di aerogeneratori della altezza complessiva di metri 207 con diametri dei rotori pari a 162 m.

La procedura seguita per il calcolo della gittata massima, in caso di rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore prende in considerazione le condizioni al contorno più gravose, in maniera tale da aumentare il grado di sicurezza massimo.

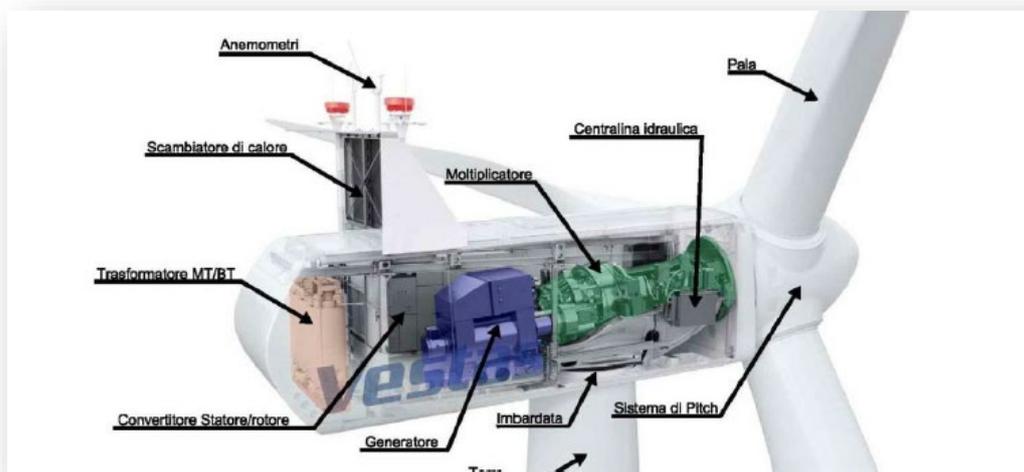
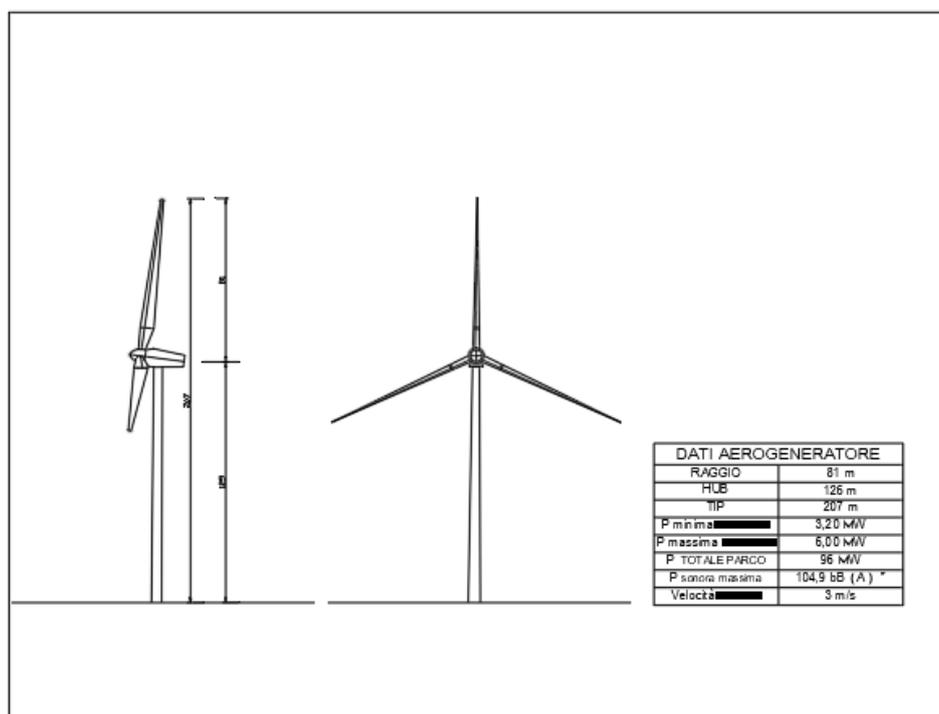


Figura 1 Componenti navicella Vestas

Per tale regione si è considerato il caso di rottura per distacco di un aerogeneratore dalle seguenti caratteristiche:

Diametro Rotore [m]	162
Area Spazzata [m ²]	20.601
Altezza del mozzo [m]	126
Numero di pale	3
Potenza nominale [MW]	6,00
Rotazione	oraria
Velocità massima delle pale in punta (m/s)	3m/s
Controllo della Velocità	Angolo di Pitch
Velocità rotore max [rpm]	12,1

Tabella 1 - Specifiche tecniche dell'aerogeneratore



Nella presente relazione si prenderanno in considerazione le condizioni realistiche, tenendo conto delle forze di attrito viscoso e della complessità del moto rotazionale, ovvero della rotazione della pala durante il moto di caduta. Inoltre verrà effettuato anche il calcolo nel caso di rottura di frammenti di pala con specifico riferimento a frammenti di lunghezza pari a 10 mt, 5 mt, e 1 mt.

Ciascun aerogeneratore è del tipo tripala ad asse orizzontale, costituito da una torre tubolare metallica a tronco di cono alta 126 m. In cima alla torre troverà alloggio la navicella cui è collegato il rotore di diametro pari a 162 m, per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pale di 207 m (TIP). La velocità del rotore sarà variabile con massimo pari a 12.1 giri/minuto, così come indicato dal costruttore.

Sarà effettuato il calcolo della gittata modellizzando, con opportune semplificazioni, il moto della pala o di un frammento di pala nell'aria considerando l'attrito viscoso o se si preferisce l'attrito dell'aria prodotto su di esso durante la caduta.

3.0 RISCHIO DI ROTTURA ACCIDENTALE

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse. Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico.

Durante il funzionamento dell'impianto, il più grande rischio è dovuto alla caduta di oggetti dall'alto, queste cadute possono essere dovute:

- a pezzi di ghiaccio formatisi sulla pala;
- a rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Per ciò che concerne la prima tipologia di evento, vista la latitudine dell'area di progetto e le caratteristiche climatiche, la sua probabilità si può considerare trascurabile quanto nulla.

Per ciò che riguarda la seconda tipologia è bene evidenziare che, potrebbe accadere, in linea teorica che sia abbia il distacco dell'intera pala o il distacco di un frammento.

Il collegamento rigido tra le pale ed il mozzo limita sino a quasi ad annullare il rischio di distacco di una pala. infatti i materiali utilizzati per il collegamento delle pale al centro del rotore, saranno ad alta resistenza, classe 10.9 (i bulloni) e classe 10 (i dadi) secondo classificazione della Norma UNI EN ISO 898-1:2001.

il montaggio e il serraggio di viti e bulloni verrà realizzato con chiave dinamometrica, una chiave che effettua il serraggio al giusto valore di coppia, cioè attraverso una forza calibrata al di sotto della soglia limite, oltre la quale si ha un effetto torcente che danneggia la filettatura della vita e del bullone. In termini tecnici il controllo avviene misurando la coppia di serraggio, ovvero la forza espressa in Newton Metro (NW) con cui i due elementi vengono stretti.

In definitiva si può affermare che, in relazione alla:

- tipologia dei materiali utilizzati di qualità migliore presenti sul mercato
- metodologia di montaggio
- controlli effettuati dopo il montaggio

Il rischio di distacco di una pala costituisce un evento di probabilità pressoché nulla per aerogeneratori di grossa taglia. quali quelli in progetto.

Per quanto attiene il distacco di un frammento di pala osserviamo che le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro e carbonio rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche: l'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti meccaniche in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono di fatto unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato).

Infine si evidenzia che gli aerogeneratori sono dotati di un sistema di controllo pale. Il sistema di controllo è basato su un sistema multiprocessore, che gestisce automaticamente tutte le funzioni della turbina come

l'avvio, l'arresto, la produzione, la disponibilità dei sottosistemi. Questo sistema consente anche il controllo a distanza dell'aerogeneratore.

Il sistema di protezione è un sistema cablato completamente autonomo, capace di arrestare la turbina in qualunque situazione di emergenza, escludendo danni al sistema e mantenendo i carichi al di sotto dei limiti di progetto; gli aerogeneratori di grande taglia del tipo previsto in progetto, in considerazione anche del loro elevato valore commerciale, sono oggetto di programmi di manutenzione molto accurati che per quanto riguarda le pale è atto a verificare l'esistenza anche di piccole fratture, e se accertata la pericolosità, determinano interventi di manutenzione ordinaria quali riparazioni o straordinaria con la sostituzione della pala.

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto con parafulmini. In conformità a quanto previsto dalla norma CEI 81-1 la classe di protezione sarà quella più alta (Classe I). In termini probabilistici ciò significa un livello di protezione del 98% (il 2% di probabilità che a fulminazione avvenuta si abbiano danni al sistema).

Pertanto la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è molto limitata se non addirittura nulla.

4.0 CALCOLO DELLA GITTATA

Il calcolo della gittata è stato effettuato modellizzando, con opportune semplificazioni, il moto della pala o di un frammento di pala (in seguito indicato genericamente come "corpo") nell'aria considerando l'attrito viscoso inteso come l'attrito dell'aria prodotto su di esso durante la caduta.

Tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte sono a vantaggio di sicurezza, ovvero producono risultati con approssimazione in eccesso della gittata massima in caso di rottura di elementi rotanti, poiché il calcolo sarà fondato su un modello puramente balistico.

La determinazione dell'equazione del moto nel caso di un distacco di un corpo dal rotore in movimento è molto complessa. È evidente però che si tratta di un moto rotazionale complesso in quanto il corpo, quando inizierà il suo moto libero, continuerà anche a ruotare per l'ineluttabile legge fisica di conservazione della quantità di moto. Quindi nel moto libero (dopo il distacco) una parte dell'energia cinetica posseduta dal corpo verrà dissipata nel moto rotazionale che finirà per generare turbolenze. Di queste dissipazioni non si terrà conto nel calcolo che pertanto sarà prudenziale.

Una volta che il corpo si sarà distaccato le forze inerziali agenti saranno la forza di gravità e le forze viscosse dovute alla resistenza prodotta dall'aria. La velocità di rotazione al momento del distacco, presa in considerazione per il calcolo, è quella massima indicata dal costruttore. È evidente che i sofisticati sistemi di controllo non permetterebbero al rotore dell'aerogeneratore di ruotare ad una velocità maggiore di quelle indicate nelle specifiche tecniche.

Le assunzioni del modello sono:

- Si fa riferimento al baricentro del corpo (sulla base di forma e dimensione opportunamente ipotizzate) e si applicano ad esso le equazioni del moto;
- Si assume come velocità iniziale V_0 il vettore applicato nel baricentro di cui al punto precedente al momento del distacco, avente come modulo la velocità tangenziale corrispondente alla massima

velocità angolare di esercizio per un raggio pari alla distanza del baricentro dal centro di rotazione e come direzione quella della tangente nello stesso baricentro al moto circolare da esso mantenuto fino al momento del distacco;

- Si determina l'angolo α_0 per il quale la gittata è massima. La definizione di questo valore avviene per tentativi successivi, e dipende essenzialmente dalla geometria del sistema (altezza torre tubolare, diametro rotore, dimensioni della pala o del frammento) e dalla velocità di rotazione al momento del distacco;
- Si tiene conto, nel volo e nella traiettoria del corpo, della spinta generata dal vento in direzione ortogonale al piano del rotore che per convenzione porremo come il piano XZ e che tenderà a spostare il corpo stesso dal piano di rotazione XZ del rotore. La velocità di spinta del vento considerata è quella massima a cui funziona l'aerogeneratore (cut off);
- Si ipotizza la temperatura ambientale di 40°C, che minimizza alle condizioni d'esercizio la densità atmosferica e quindi l'attrito viscoso.

Il modulo della forza di attrito agente sulla pala (o sul frammento) in moto libero dopo il distacco è dato dalla formula.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2$$

Dove:

- ρ_{aria} è la densità dell'aria che cambia in relazione alla quota altimetrica del sito di installazione degli aerogeneratori ma anche in base alle dimensioni e quindi massime altezze raggiunte dal sistema torre tubolare + rotore;
- C_d è il coefficiente di attrito ampiamente dipendente dalle caratteristiche geometriche della pala. Sulla base di dati riportati in letteratura tale valore è stato assunto pari a 1;
- A è la superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria;
- V_{xz} è il modulo della proiezione del vettore velocità del corpo sul piano XZ misurata con riferimento al baricentro del corpo.

Il moto libero di un corpo di massa nota M sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, quindi, dalle seguenti equazioni:

$$a_x = d^2x/dt^2 = -1/M \times F_D \times \cos\alpha$$

$$a_y = d^2y/dt^2 = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M$$

$$a_z = d^2z/dt^2 = -1/M \times (F_D \times \sin\alpha + M \times g)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2$$

Dove:

- α rappresenta l'arcotangente del rapporto V_z/V_x e cambia da istante a istante durante il moto libero di caduta;
- w è il modulo della velocità del vento, supposta ortogonale al piano XZ e costante per tutta la durata del moto;
- V_y è il modulo della componente della velocità del corpo avente la stessa direzione del vento;
- g è l'accelerazione di gravità.

Le condizioni al contorno indipendenti sono:

- Temperatura ambiente e velocità del vento, impostate nei valori estremi di esercizio come precedentemente esposto;
- Altezza della torre, quota s.l.m. delle sue fondazioni ed eventuale dislivello del territorio circostante;
- Massa M , area efficace A , lunghezza L posizione del baricentro del corpo distaccato (posta a $1/3$ della lunghezza nel caso dell'intera pala e a $1/2$ nel caso di un frammento);
- α_0 viene inizializzato al valore arbitrario di 20° , prossimo a valori descritti in letteratura per analoghi esperimenti;
- si pongono ascissa e ordinata del baricentro del corpo al momento del distacco $X_0 = 0$ e $Y_0 = 0$ (fissando l'origine del sistema di riferimento cartesiano come oltre precisato);
- si pone la componente iniziale del vettore velocità in direzione del vento $V_{y0} = 0$, in quanto tale vettore, nel momento del distacco, è determinato dal solo movimento del rotore che è supposto ortogonale al vento stesso.

Dalle precedenti dipendono le seguenti ulteriori condizioni:

- quota di distacco Z_0 ;
- densità atmosferica paria iniziale;
- componenti iniziali V_{x0} e V_{z0} del vettore velocità e tutte le componenti del vettore accelerazione;

La soluzione del sistema di equazioni viene determinata con il metodo di Eulero che è un metodo iterativo per la risoluzione di equazioni differenziali partendo dalle condizioni al contorno. Tale soluzione ci permetterà di definire il moto del corpo distaccato nello spazio tridimensionale rappresentato in un sistema cartesiano ortogonale XYZ, in cui:

- il piano XY rappresenta il piano orizzontale, corrispondente al livello del mare;
- il piano XZ viene fatto coincidere con il piano su cui giace il rotore (ortogonale alla direzione del vento);
- il piano YZ viene fissato, ortogonalmente agli altri due piani coordinati, facendo coincidere l'origine del sistema con la proiezione sul piano XY del baricentro del corpo nell'istante del distacco.

Con questa rappresentazione geometrica è evidente che al momento della definizione della gittata massima si dovrà tenere in conto della lunghezza del corpo in caduta, ma anche della geometria del modello. Ora, poiché la gittata è calcolata a partire dal centro torre, dovrà essere calcolata la distanza tra centro torre e punto di caduta del baricentro del corpo distaccato.

Nel punto di caduta si dovrà tenere poi in conto della lunghezza del frammento o della pala. Pertanto in definitiva la gittata massima, sarà uguale a:

$$G_{\max} = \text{distanza (centro torre, punto di caduta)} + 2/3L \text{ (nel caso di pala intera di lunghezza } L)$$

$$G_{\max} = \text{distanza (centro torre, punto di caduta)} + L/2 \text{ (nel caso del frammento di lunghezza } L)$$

Una volta impostato e risolto il modello con riferimento al valore di inizializzazione di α_0 si è proceduto per tentativi, provando a variare α_0 , di un grado per volta, nella direzione in cui G_{\max} risultava aumentare e fino a che non si registrava un decremento, individuando in tal modo il valore di α_0 che massimizza G_{\max} .

5.0 DISTACCO DELLA PALA INTERA

Come detto il moto libero di un corpo di massa nota M , sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, dalle seguenti equazioni:

$$a_x = d^2x/dt^2 = -1/M \times F_D \times \cos\alpha$$

$$a_y = d^2y/dt^2 = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M$$

$$a_z = d^2z/dt^2 = -1/M \times (F_D \times \sin\alpha + M \times g)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2$$

L'equazione differenziale è risolta con il metodo iterativo di Eulero, rispetto alle variabili x , y e z . Nell'istante in cui z assume il valore pari al livello previsto per l'impatto (ovvero la quota media della base torre s.l.m.), il punto di caduta del baricentro della pala è calcolato (teorema di Pitagora) dai corrispondenti valori di x e y nello stesso istante. La gittata massima sarà poi ottenuta in base alle caratteristiche geometriche dell'intero sistema, ovvero l'estensione massima del corpo rispetto al baricentro e la distanza del centro torre dall'asse z del sistema di riferimento.

In pratica:

$$G_{max} = X_{caduta} - X_{torre} + 2/3L \text{ (pala intera di lunghezza } L)$$

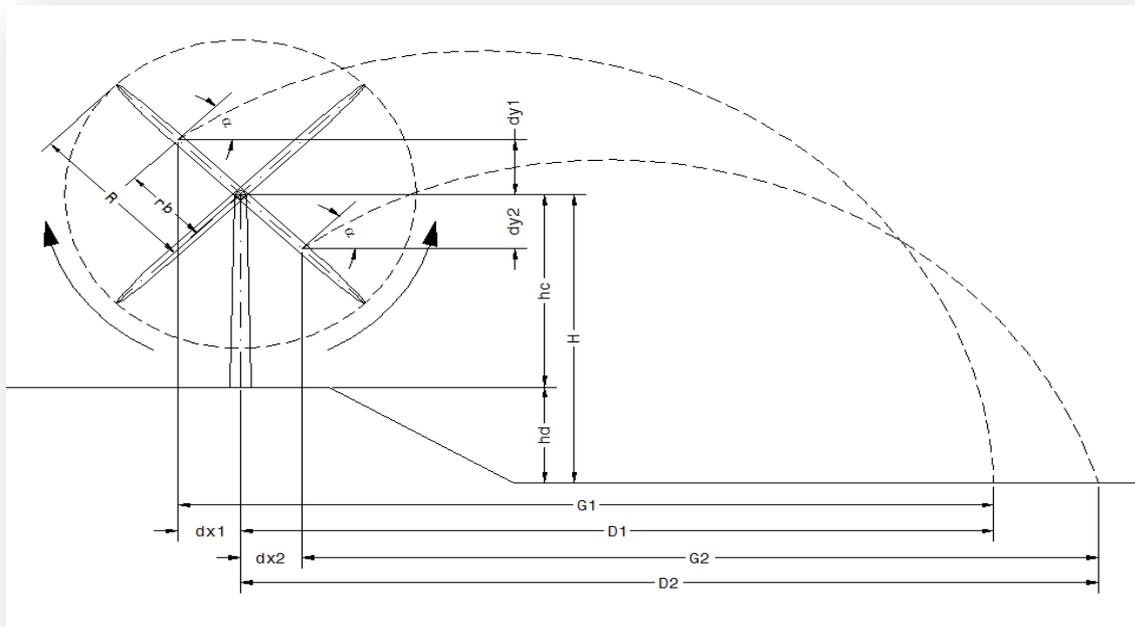
Nel caso di distacco dell'intera pala i parametri assumeranno i seguenti valori:

- Altezza mozzo $Q_t=126$ m, diametro rotore 162 m, lunghezza pala di circa 80 m, velocità di rotazione 12,1 g/min, che è la velocità massima consentita così come da specifiche del costruttore;
- La posizione del baricentro della pala a $1/3$ della lunghezza della pala, quindi più vicina al centro di rotazione;
- $C_d = 0,09$ per oggetti semi-affusolati;
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, e del moto rotazionale complesso a cui la pala è soggetta in caso di distacco.

Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo α_0 a cui avviene il distacco più gravoso, cautelativamente si sono analizzati entrambi i sensi di rotazioni.

Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha_0 = 333^\circ$ per ottenere un tempo di volo massimo.

In considerazione del fatto che il terreno nell'immediato intorno degli aerogeneratori di progetto è pressoché pianeggiante, ma trovandoci zona caratterizzate da leggeri rilievi morfologici, cautelativamente si è condotta una ulteriore ipotesi che prevede la quota di impatto punto di caduta posta più bassa della quota di base della torre. Sulla base dei valori rilevati in sito, si è fissata un'altezza media cautelativa di ulteriori 5 m. Si è considerata la velocità massima della pala a 33,32 m/s.



Oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore.

Il valore della densità dell'aria considerato è $\rho = 0,898$, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 150 m s.l.m. (valori limite che determinano le condizioni più sfavorevoli nel calcolo).

Nel grafico la traiettoria del moto che ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

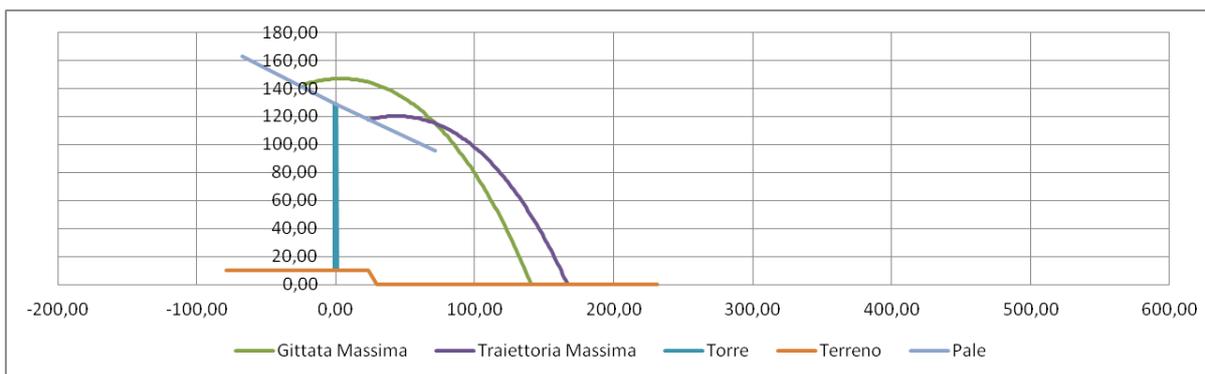


Figura 4 - Traiettoria del moto della pala intera, a seguito del distacco

Di seguito sono riportati in modo tabellati i valori della traiettoria, in senso orario, suddivisi per frazioni di volo.

Angolo di rottura pari a 333°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0,00	-22,30	142,94
0,07	-20,32	143,53
0,13	-18,35	144,07
0,20	-16,39	144,56
0,27	-14,44	145,01
0,33	-12,49	145,41
0,40	-10,56	145,77
0,47	-8,63	146,08
0,54	-6,70	146,34
0,60	-4,79	146,56
0,67	-2,88	146,74
0,74	-0,98	146,87
0,80	0,91	146,96
0,87	2,79	147,00
0,94	4,67	147,00
1,00	6,54	146,96
1,07	8,40	146,87
1,14	10,25	146,74
1,20	12,10	146,56
1,27	13,94	146,34
1,34	15,77	146,08
1,41	17,59	145,78
1,47	19,41	145,43
1,54	21,22	145,04
1,61	23,02	144,61
1,67	24,82	144,13
1,74	26,60	143,62
1,81	28,38	143,06
1,87	30,16	142,46
1,94	31,93	141,82

Angolo di rottura pari a 205,3°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0,00	23,78	117,77
0,06	25,48	118,18
0,12	27,17	118,55
0,18	28,86	118,88
0,24	30,54	119,18
0,30	32,21	119,45
0,36	33,88	119,68
0,41	35,54	119,87
0,47	37,20	120,03
0,53	38,85	120,15
0,59	40,49	120,24
0,65	42,13	120,29
0,71	43,77	120,31
0,77	45,39	120,30
0,83	47,01	120,25
0,89	48,63	120,16
0,95	50,24	120,05
1,01	51,84	119,89
1,07	53,44	119,71
1,13	55,03	119,49
1,18	56,62	119,24
1,24	58,20	118,95
1,30	59,78	118,63
1,36	61,35	118,28
1,42	62,91	117,89
1,48	64,47	117,47
1,54	66,03	117,02
1,60	67,57	116,53
1,66	69,12	116,02
1,72	70,65	115,47

Angolo di rottura pari a 333°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
2,01	33,68	141,14
2,07	35,44	140,41
2,14	37,18	139,65
2,21	38,92	138,84
2,28	40,65	138,00
2,34	42,38	137,11
2,41	44,09	136,19
2,48	45,81	135,22
2,54	47,51	134,21
2,61	49,21	133,17
2,68	50,90	132,08
2,74	52,58	130,96
2,81	54,26	129,79
2,88	55,93	128,59
2,95	57,59	127,34
3,01	59,25	126,06
3,08	60,90	124,74
3,15	62,54	123,38
3,21	64,18	121,98
3,28	65,81	120,55
3,35	67,43	119,07
3,41	69,05	117,56
3,48	70,66	116,01
3,55	72,26	114,42
3,61	73,86	112,80
3,68	75,45	111,14
3,75	77,04	109,44
3,82	78,62	107,70
3,88	80,19	105,93
3,95	81,75	104,12

Angolo di rottura pari a 205,3°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
1,78	72,19	114,88
1,84	73,71	114,27
1,90	75,23	113,62
1,96	76,75	112,94
2,01	78,26	112,23
2,07	79,76	111,49
2,13	81,26	110,71
2,19	82,76	109,91
2,25	84,24	109,07
2,31	85,73	108,20
2,37	87,21	107,30
2,43	88,68	106,37
2,49	90,15	105,41
2,55	91,61	104,41
2,61	93,07	103,39
2,67	94,52	102,33
2,73	95,96	101,25
2,78	97,41	100,13
2,84	98,84	98,98
2,90	100,27	97,81
2,96	101,70	96,60
3,02	103,12	95,36
3,08	104,54	94,09
3,14	105,95	92,80
3,20	107,36	91,47
3,26	108,76	90,11
3,32	110,15	88,73
3,38	111,55	87,31
3,44	112,93	85,87
3,50	114,31	84,39

Angolo di rottura pari a 333°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
4,02	83,31	102,27
4,08	84,87	100,39
4,15	86,41	98,47
4,22	87,96	96,51
4,28	89,49	94,52
4,35	91,02	92,49
4,42	92,54	90,43
4,48	94,06	88,33
4,55	95,57	86,20
4,62	97,07	84,03
4,69	98,57	81,82
4,75	100,06	79,58
4,82	101,55	77,31
4,89	103,03	75,00
4,95	104,51	72,65
5,02	105,97	70,27
5,09	107,44	67,86
5,15	108,89	65,41
5,22	110,35	62,93
5,29	111,79	60,42
5,35	113,23	57,87
5,42	114,66	55,29
5,49	116,09	52,67
5,56	117,51	50,02
5,62	118,93	47,34
5,69	120,34	44,62
5,76	121,75	41,87
5,82	123,15	39,09
5,89	124,54	36,28
5,96	125,93	33,43

Angolo di rottura pari a 205,3°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
3,55	115,69	82,89
3,61	117,06	81,36
3,67	118,43	79,79
3,73	119,79	78,20
3,79	121,15	76,59
3,85	122,50	74,94
3,91	123,85	73,26
3,97	125,19	71,56
4,03	126,53	69,82
4,09	127,86	68,06
4,15	129,19	66,27
4,21	130,52	64,46
4,27	131,84	62,61
4,33	133,15	60,74
4,38	134,46	58,84
4,44	135,76	56,91
4,50	137,07	54,95
4,56	138,36	52,97
4,62	139,65	50,96
4,68	140,94	48,92
4,74	142,22	46,86
4,80	143,50	44,76
4,86	144,77	42,64
4,92	146,04	40,50
4,98	147,30	38,33
5,04	148,56	36,13
5,10	149,82	33,90
5,15	151,07	31,65
5,21	152,32	29,37
5,27	153,56	27,06

Angolo di rottura pari a 333°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
6,02	127,31	30,55
6,09	128,69	27,64
6,16	130,06	24,69
6,22	131,43	21,72
6,29	132,79	18,71
6,36	134,14	15,67
6,43	135,49	12,60
6,49	136,84	9,50
6,56	138,17	6,36
6,63	139,51	3,20
6,69	140,84	0,00

Angolo di rottura pari a 205,3°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
5,33	154,80	24,73
5,39	156,03	22,38
5,45	157,26	19,99
5,51	158,48	17,58
5,57	159,70	15,15
5,63	160,92	12,69
5,69	162,13	10,20
5,75	163,34	7,69
5,81	164,54	5,15
5,87	165,74	2,59
5,92	166,93	0,00

Il tempo di permanenza in volo massimo è di 6,69 secondi circa. Il valore della gittata massima è 166,93 m. **L'ipotesi più gravosa però si manifesta considerando la lunghezza della pala (2/3L), la rottura che avviene ad un angolo di 205.3°, comprendo una distanza pari a $D_{max} = 200,45$ m.**

5.1 ROTTURA FRAMMENTO LUNGHEZZA DIECI METRI

Benché, come detto, il distacco di un frammento di pala è da considerarsi un evento **pressoché impossibile**, di seguito si riporta il valore della gittata massima come soluzione dell'equazione differenziale più volte richiamata, nel caso di un frammento di lunghezza pari a 10 m.

I parametri fisici e geometrici che si assumeranno saranno i seguenti:

- Altezza mozzo $Q_t = 126$ m, diametro rotore 162 m, lunghezza pala alla rottura di circa 72 m, lunghezza frammento 10 m, velocità di rotazione 12,10 g/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore);
- La posizione del baricentro della pala a 1/2 della lunghezza del frammento;
- $C_d = 0.09$ per corpi semi affusolati e 0.42 per corpi emisferici, sulla base di dati riportati in letteratura;
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria.
-

Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo α_0 a cui avviene il distacco più gravoso, cautelativamente si sono analizzati entrambi i sensi di rotazioni.

Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha_0 = 205,30^\circ$ si ottiene la gittata massima.

In considerazione del fatto che il terreno nell'immediato intorno degli aerogeneratori di progetto è pressoché pianeggiante, ma trovandoci zona caratterizzate da leggeri rilievi morfologici, cautelativamente si è condotta una ulteriore ipotesi che prevede la quota di impatto punto di caduta posta più bassa della quota di base della torre. Sulla base dei valori rilevati in sito, si è fissata un'altezza media cautelativa di ulteriori 10 m.

Si è considerata la velocità massima di rotazione del frammento di 91,61 m/s a cui funziona l'aerogeneratore. Oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore.

Il valore della densità dell'aria considerato è $\rho = 0,898$, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 150 m s.l.m. (valori limite che determinano le condizioni più sfavorevoli nel calcolo).

Nel grafico la traiettoria del moto che ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

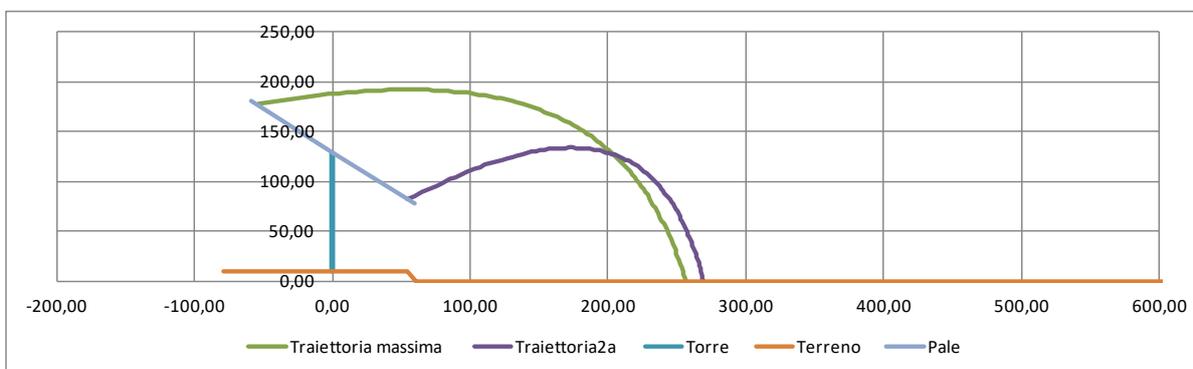


Figura 5 - Traiettoria del moto di un frammento di 10 m, a seguito di rottura

Di seguito sono riportati in modo tabellati i valori della traiettoria, in senso orario, suddivisi per frazioni di volo.

Angolo di rottura pari a 323,2°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0,00	-53,89	177,20
0,10	-45,99	179,05
0,20	-38,28	180,76
0,30	-30,74	182,34
0,39	-23,38	183,78
0,49	-16,18	185,10
0,59	-9,15	186,30
0,69	-2,28	187,37
0,79	4,43	188,33
0,89	10,99	189,16
0,99	17,40	189,89
1,09	23,66	190,50
1,18	29,78	191,01
1,28	35,76	191,40
1,38	41,60	191,70
1,48	47,31	191,89
1,58	52,88	191,99
1,68	58,33	191,99
1,78	63,65	191,89
1,87	68,85	191,70
1,97	73,94	191,42
2,07	78,90	191,06
2,17	83,75	190,61
2,27	88,49	190,07

Angolo di rottura pari a 220,7°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0,00	54,84	81,89
0,09	60,12	85,62
0,19	65,28	89,18
0,28	70,33	92,57
0,38	75,27	95,81
0,47	80,10	98,89
0,57	84,82	101,81
0,66	89,44	104,58
0,75	93,96	107,21
0,85	98,38	109,69
0,94	102,70	112,04
1,04	106,93	114,24
1,13	111,07	116,31
1,23	115,11	118,25
1,32	119,07	120,06
1,41	122,94	121,75
1,51	126,72	123,31
1,60	130,42	124,75
1,70	134,05	126,07
1,79	137,59	127,28
1,89	141,05	128,38
1,98	144,44	129,36
2,07	147,75	130,24
2,17	150,99	131,01

Angolo di rottura pari a 323,2°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
2,37	93,13	189,45
2,47	97,65	188,75
2,57	102,07	187,97
2,66	106,40	187,12
2,76	110,62	186,19
2,86	114,74	185,19
2,96	118,77	184,12
3,06	122,71	182,97
3,16	126,56	181,76
3,26	130,32	180,49
3,35	133,99	179,14
3,45	137,58	177,74
3,55	141,09	176,27
3,65	144,51	174,74
3,75	147,86	173,15
3,85	151,13	171,50
3,95	154,33	169,80
4,05	157,45	168,04
4,14	160,50	166,23
4,24	163,48	164,36
4,34	166,40	162,44
4,44	169,24	160,47
4,54	172,02	158,46
4,64	174,74	156,39
4,74	177,40	154,28
4,84	179,99	152,12
4,93	182,52	149,92
5,03	185,00	147,67

Angolo di rottura pari a 220,7°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
2,26	154,17	131,68
2,36	157,27	132,25
2,45	160,30	132,72
2,55	163,27	133,09
2,64	166,17	133,37
2,73	169,01	133,56
2,83	171,78	133,65
2,92	174,50	133,66
3,02	177,15	133,58
3,11	179,75	133,42
3,20	182,29	133,17
3,30	184,77	132,85
3,39	187,20	132,44
3,49	189,58	131,96
3,58	191,91	131,40
3,68	194,18	130,77
3,77	196,40	130,06
3,86	198,58	129,29
3,96	200,71	128,44
4,05	202,79	127,53
4,15	204,83	126,55
4,24	206,82	125,51
4,34	208,76	124,40
4,43	210,67	123,23
4,52	212,53	122,00
4,62	214,35	120,71
4,71	216,14	119,37
4,81	217,88	117,96

Angolo di rottura pari a 323,2°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
5,13	187,42	145,38
5,23	189,78	143,05
5,33	192,09	140,67
5,43	194,35	138,26
5,53	196,56	135,81
5,62	198,71	133,32
5,72	200,82	130,79
5,82	202,87	128,22
5,92	204,88	125,62
6,02	206,85	122,99
6,12	208,77	120,32
6,22	210,64	117,62
6,32	212,47	114,88
6,41	214,26	112,12
6,51	216,01	109,32
6,61	217,72	106,49
6,71	219,39	103,64
6,81	221,02	100,75
6,91	222,62	97,83
7,01	224,18	94,89
7,10	225,70	91,92
7,20	227,18	88,93
7,30	228,64	85,91
7,40	230,06	82,86
7,50	231,44	79,79
7,60	232,80	76,69
7,70	234,12	73,58
7,80	235,42	70,43

Angolo di rottura pari a 220,7°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
4,90	219,58	116,50
5,00	221,25	114,99
5,09	222,88	113,43
5,18	224,48	111,81
5,28	226,04	110,14
5,37	227,57	108,42
5,47	229,06	106,65
5,56	230,52	104,84
5,66	231,95	102,98
5,75	233,34	101,07
5,84	234,71	99,12
5,94	236,05	97,13
6,03	237,35	95,09
6,13	238,63	93,01
6,22	239,88	90,89
6,32	241,11	88,73
6,41	242,30	86,54
6,50	243,47	84,30
6,60	244,62	82,03
6,69	245,74	79,72
6,79	246,83	77,37
6,88	247,90	74,99
6,98	248,95	72,58
7,07	249,97	70,13
7,16	250,97	67,65
7,26	251,95	65,14
7,35	252,91	62,60
7,45	253,85	60,02

Angolo di rottura pari a 323,2°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
7,89	236,68	67,27
7,99	237,92	64,09
8,09	239,12	60,88
8,19	240,30	57,65
8,29	241,45	54,40
8,39	242,58	51,13
8,49	243,68	47,85
8,58	244,75	44,54
8,68	245,80	41,21
8,78	246,83	37,87
8,88	247,83	34,51
8,98	248,81	31,13
9,08	249,77	27,73
9,18	250,70	24,32
9,28	251,62	20,89
9,37	252,51	17,45
9,47	253,38	13,99
9,57	254,24	10,51
9,67	255,07	7,02
9,77	255,88	3,52
9,87	256,68	0,00

Angolo di rottura pari a 220,7°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
7,54	254,77	57,42
7,64	255,66	54,79
7,73	256,54	52,13
7,82	257,40	49,44
7,92	258,24	46,72
8,01	259,06	43,98
8,11	259,86	41,21
8,20	260,65	38,41
8,29	261,42	35,60
8,39	262,17	32,75
8,48	262,90	29,88
8,58	263,62	26,99
8,67	264,32	24,08
8,77	265,01	21,14
8,86	265,68	18,18
8,95	266,34	15,20
9,05	266,99	12,20
9,14	267,61	9,18
9,24	268,23	6,14
9,33	268,83	3,08
9,43	269,42	0,00

Il tempo di permanenza in volo massimo è di 9,87 secondi circa. Il valore della gittata massima è 269,42 m. L'ipotesi più gravosa però si manifesta considerando la lunghezza residuale del frammento, la rottura che avviene ad un angolo di 220,70°, comprendo una distanza pari a $D_{max} = 276,10$ m.

5.2 ROTTURA FRAMMENTO LUNGHEZZA CINQUE METRI

Nel caso in cui il frammento di pala che subisce il distacco sia di lunghezza pari a 5 m, i parametri fisici e geometrici che si assumeranno saranno i seguenti:

- Altezza mozzo $Q_t = 125$ m, diametro rotore 162 m, lunghezza pala alla rottura di circa 76,5 m, lunghezza frammento 5 m, velocità di rotazione 12,10 g/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore);
- La posizione del baricentro della pala a 1/2 della lunghezza del frammento;
- $C_d = 0.09$ per corpi semi affusolati e 0.42 per corpi emisferici, sulla base di dati riportati in letteratura;
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria.

Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo α_0 a cui avviene il distacco più gravoso, cautelativamente si sono analizzati entrambi i sensi di rotazioni.

Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha_0 = 322,90^\circ$ si ottiene la gittata massima.

In considerazione del fatto che il terreno nell'immediato intorno degli aerogeneratori di progetto è pressoché pianeggiante, ma trovandoci zona caratterizzate da leggeri rilievi morfologici, cautelativamente si è condotta una ulteriore ipotesi che prevede la quota di impatto punto di caduta posta più bassa della quota di base della torre. Sulla base dei valori rilevati in sito, si è fissata un'altezza media cautelativa di ulteriori 5 m.

Si è considerata la velocità massima di rotazione del frammento di 96,93 m/s a cui funziona l'aerogeneratore. Oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore.

Il valore della densità dell'aria considerato è $\rho = 0,898$, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 150 m s.l.m. (valori limite che determinano le condizioni più sfavorevoli nel calcolo).

Nel grafico la traiettoria del moto che ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

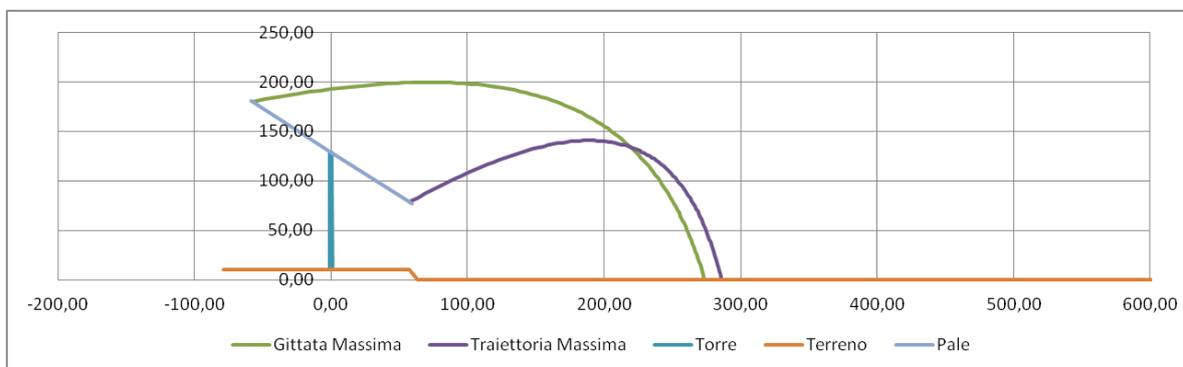


Figura 6 - Traiettoria del moto di un frammento di 5 m, a seguito di rottura

Di seguito sono riportati in modo tabellati i valori della traiettoria, in senso orario, suddivisi per frazioni di volo.

Angolo di rottura pari a 322,9°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0,00	-56,76	180,28
0,10	-48,09	182,53
0,21	-39,62	184,63
0,31	-31,36	186,57
0,41	-23,29	188,36
0,51	-15,42	190,00
0,62	-7,74	191,51
0,72	-0,23	192,87
0,82	7,09	194,10
0,93	14,23	195,20
1,03	21,21	196,16
1,13	28,02	197,01
1,24	34,67	197,72
1,34	41,16	198,32
1,44	47,49	198,81
1,54	53,67	199,17
1,65	59,70	199,43
1,75	65,59	199,58
1,85	71,34	199,62
1,96	76,95	199,56
2,06	82,43	199,39
2,16	87,77	199,13
2,27	92,99	198,77
2,37	98,09	198,32
2,47	103,06	197,77
2,57	107,91	197,14
2,68	112,65	196,42

Angolo di rottura pari a 221,1°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0,00	57,65	78,71
0,10	63,46	83,08
0,20	69,14	87,25
0,30	74,68	91,24
0,40	80,10	95,04
0,49	85,40	98,65
0,59	90,58	102,09
0,69	95,63	105,36
0,79	100,57	108,45
0,89	105,40	111,38
0,99	110,11	114,15
1,09	114,72	116,76
1,19	119,22	119,22
1,28	123,62	121,52
1,38	127,92	123,68
1,48	132,12	125,69
1,58	136,22	127,56
1,68	140,23	129,30
1,78	144,14	130,90
1,88	147,97	132,36
1,98	151,71	133,70
2,08	155,36	134,92
2,17	158,93	136,01
2,27	162,41	136,98
2,37	165,82	137,83
2,47	169,15	138,58
2,57	172,40	139,20

Angolo di rottura pari a 322,9°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
2,78	117,27	195,61
2,88	121,78	194,72
2,99	126,19	193,74
3,09	130,49	192,69
3,19	134,69	191,56
3,29	138,78	190,36
3,40	142,78	189,08
3,50	146,69	187,73
3,60	150,50	186,30
3,71	154,21	184,81
3,81	157,84	183,25
3,91	161,39	181,63
4,02	164,85	179,94
4,12	168,22	178,19
4,22	171,52	176,38
4,32	174,73	174,51
4,43	177,87	172,58
4,53	180,94	170,60
4,63	183,93	168,56
4,74	186,85	166,47
4,84	189,70	164,32
4,94	192,48	162,12
5,04	195,20	159,87
5,15	197,85	157,58
5,25	200,43	155,23
5,35	202,96	152,84
5,46	205,42	150,40

Angolo di rottura pari a 221,1°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
2,67	175,58	139,72
2,77	178,68	140,14
2,87	181,72	140,45
2,96	184,68	140,65
3,06	187,58	140,76
3,16	190,41	140,77
3,26	193,17	140,69
3,36	195,87	140,51
3,46	198,51	140,24
3,56	201,09	139,88
3,66	203,61	139,44
3,76	206,07	138,91
3,85	208,47	138,30
3,95	210,82	137,61
4,05	213,12	136,84
4,15	215,36	136,00
4,25	217,55	135,08
4,35	219,69	134,08
4,45	221,78	133,01
4,55	223,83	131,88
4,64	225,83	130,67
4,74	227,78	129,40
4,84	229,68	128,06
4,94	231,55	126,66
5,04	233,37	125,19
5,14	235,14	123,67
5,24	236,88	122,08

Angolo di rottura pari a 322,9°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
5,56	207,83	147,92
5,66	210,18	145,39
5,77	212,47	142,83
5,87	214,71	140,22
5,97	216,89	137,57
6,07	219,02	134,88
6,18	221,10	132,15
6,28	223,13	129,39
6,38	225,12	126,58
6,49	227,05	123,75
6,59	228,94	120,87
6,69	230,78	117,97
6,80	232,58	115,03
6,90	234,34	112,06
7,00	236,06	109,05
7,10	237,73	106,02
7,21	239,36	102,95
7,31	240,96	99,86
7,41	242,51	96,74
7,52	244,03	93,59
7,62	245,52	90,41
7,72	246,96	87,20
7,82	248,38	83,97
7,93	249,76	80,71
8,03	251,10	77,43
8,13	252,42	74,12
8,24	253,70	70,79

Angolo di rottura pari a 221,1°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
5,34	238,58	120,44
5,44	240,24	118,74
5,53	241,86	116,98
5,63	243,44	115,17
5,73	244,99	113,30
5,83	246,50	111,39
5,93	247,97	109,42
6,03	249,42	107,40
6,13	250,83	105,34
6,23	252,20	103,23
6,32	253,55	101,07
6,42	254,86	98,87
6,52	256,15	96,62
6,62	257,40	94,33
6,72	258,63	92,00
6,82	259,83	89,62
6,92	261,00	87,21
7,02	262,14	84,76
7,11	263,26	82,26
7,21	264,35	79,73
7,31	265,42	77,17
7,41	266,46	74,57
7,51	267,48	71,93
7,61	268,47	69,26
7,71	269,45	66,56
7,81	270,40	63,82
7,91	271,32	61,05

Angolo di rottura pari a 322,9°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
8,34	254,95	67,44
8,44	256,17	64,07
8,55	257,36	60,67
8,65	258,53	57,25
8,75	259,67	53,81
8,85	260,77	50,35
8,96	261,86	46,87
9,06	262,91	43,37
9,16	263,95	39,85
9,27	264,95	36,31
9,37	265,94	32,75
9,47	266,89	29,18
9,58	267,83	25,59
9,68	268,74	21,98
9,78	269,64	18,36
9,88	270,51	14,72
9,99	271,36	11,06
10,09	272,19	7,39
10,19	273,00	3,70
10,30	273,79	0,00

Angolo di rottura pari a 221,1°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
8,00	272,23	58,25
8,10	273,12	55,42
8,20	273,98	52,56
8,30	274,83	49,67
8,40	275,65	46,76
8,50	276,46	43,81
8,60	277,25	40,84
8,70	278,02	37,84
8,79	278,77	34,82
8,89	279,51	31,77
8,99	280,23	28,69
9,09	280,93	25,59
9,19	281,62	22,47
9,29	282,29	19,33
9,39	282,94	16,16
9,49	283,58	12,97
9,59	284,21	9,76
9,68	284,82	6,53
9,78	285,42	3,27
9,88	286,00	0,00

Il tempo di permanenza in volo massimo è di 10,30 secondi circa. Il valore della gittata massima è 286,00 m. L'ipotesi più gravosa però si manifesta considerando la lunghezza residuale del frammento, la rottura che avviene ad un angolo di 221,10°, comprendo una distanza pari a $D_{\max} = 288,50$ m.

5.3 ROTTURA FRAMMENTO LUNGHEZZA UN METRO

Nel caso in cui il frammento di pala che subisce il distacco sia di lunghezza pari a 1 m, i parametri fisici e geometrici che si assumeranno saranno i seguenti:

- Altezza mozzo $Q_t = 126$ m, diametro rotore 162 m, lunghezza pala alla rottura di circa 78,5 m, lunghezza frammento 1 m, velocità di rotazione 12,10 g/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore);
- La posizione del baricentro della pala a $1/2$ della lunghezza del frammento;
- $C_d = 0.09$ per corpi semi affusolati e 0.42 per corpi emisferici, sulla base di dati riportati in letteratura;
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria.

Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo α_0 a cui avviene il distacco più gravoso, cautelativamente si sono analizzati entrambi i sensi di rotazioni.

Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha_0 = 322,80^\circ$ si ottiene la gittata massima.

In considerazione del fatto che il terreno nell'immediato intorno degli aerogeneratori di progetto è pressoché pianeggiante, ma trovandoci zona caratterizzate da leggeri rilievi morfologici, cautelativamente si è condotta una ulteriore ipotesi che prevede la quota di impatto punto di caduta posta più bassa della quota di base della torre. Sulla base dei valori rilevati in sito, si è fissata un' altezza media cautelativa di ulteriori 5 m.

Si è considerata la velocità massima di rotazione del frammento di 99,47 m/s a cui funziona l'aerogeneratore. Oltre questa velocità le pale vanno in stallo e non ruotano. La velocità del vento determina una componente del moto che è perpendicolare al piano di rotazione del rotore.

Il valore della densità dell'aria considerato è $\rho = 0,898$, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 150 m s.l.m. (valori limite che determinano le condizioni più sfavorevoli nel calcolo).

Nel grafico la traiettoria del moto che ricordiamo, avviene nello spazio XYZ.

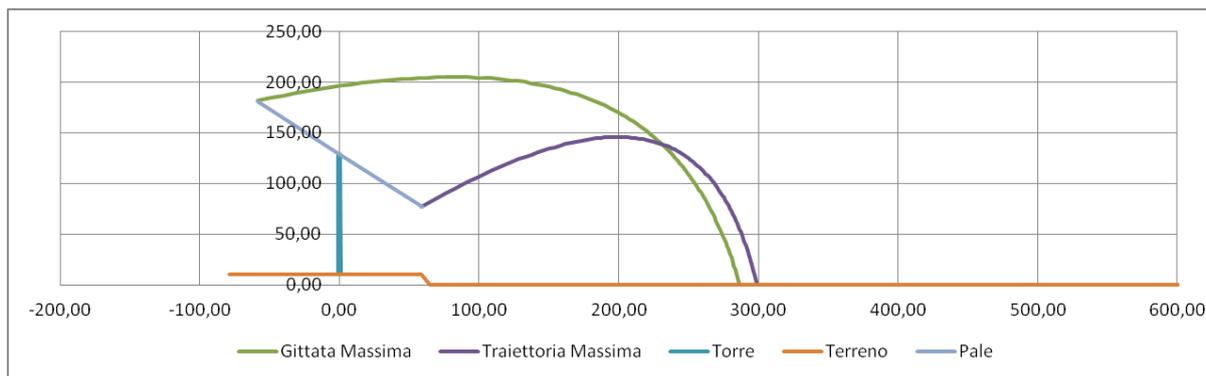


Figura 7 - Traiettoria del moto di un frammento di 1 m, a seguito di rottura

Di seguito sono riportati in modo tabellati i valori della traiettoria, in senso orario, suddivisi per frazioni di volo.

Angolo di rottura pari a $322,8^\circ$

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0,00	-58,13	181,75
0,11	-49,06	184,31
0,21	-40,21	186,69
0,32	-31,56	188,92
0,42	-23,13	190,98
0,53	-14,89	192,88
0,63	-6,86	194,63
0,74	0,99	196,23
0,84	8,64	197,68
0,95	16,12	198,99
1,06	23,41	200,16
1,16	30,53	201,20
1,27	37,47	202,10
1,37	44,26	202,88
1,48	50,87	203,52
1,58	57,33	204,05
1,69	63,64	204,45
1,79	69,79	204,73
1,90	75,80	204,90

Angolo di rottura pari a $221,3^\circ$

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0,00	58,98	77,20
0,10	65,12	81,95
0,20	71,11	86,49
0,30	76,96	90,83
0,41	82,68	94,97
0,51	88,27	98,91
0,61	93,73	102,66
0,71	99,06	106,22
0,81	104,27	109,60
0,91	109,36	112,81
1,01	114,33	115,84
1,12	119,18	118,70
1,22	123,93	121,40
1,32	128,56	123,93
1,42	133,09	126,31
1,52	137,52	128,53
1,62	141,84	130,60
1,72	146,06	132,52
1,83	150,19	134,30

Angolo di rottura pari a 322,8°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0,00	-58,13	181,75
2,00	81,66	204,96
2,11	87,38	204,91
2,22	92,96	204,75
2,32	98,41	204,49
2,43	103,73	204,13
2,53	108,93	203,67
2,64	113,99	203,11
2,74	118,94	202,45
2,85	123,77	201,71
2,95	128,48	200,87
3,06	133,08	199,95
3,17	137,57	198,94
3,27	141,95	197,84
3,38	146,22	196,67
3,48	150,40	195,41
3,59	154,47	194,08
3,69	158,45	192,67
3,80	162,33	191,19
3,90	166,11	189,63
4,01	169,81	188,01
4,12	173,42	186,31
4,22	176,94	184,55
4,33	180,37	182,72
4,43	183,73	180,83
4,54	187,00	178,88
4,64	190,20	176,86
4,75	193,32	174,79
4,85	196,36	172,65
4,96	199,33	170,46

Angolo di rottura pari a 221,3°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0,00	58,98	77,20
1,93	154,22	135,94
2,03	158,15	137,44
2,13	162,00	138,80
2,23	165,76	140,04
2,33	169,43	141,14
2,43	173,02	142,12
2,54	176,52	142,98
2,64	179,94	143,72
2,74	183,29	144,34
2,84	186,55	144,85
2,94	189,74	145,25
3,04	192,86	145,54
3,14	195,91	145,72
3,25	198,88	145,80
3,35	201,79	145,77
3,45	204,63	145,65
3,55	207,41	145,43
3,65	210,12	145,11
3,75	212,76	144,71
3,85	215,35	144,21
3,96	217,88	143,62
4,06	220,35	142,95
4,16	222,76	142,19
4,26	225,12	141,36
4,36	227,42	140,44
4,46	229,67	139,44
4,56	231,87	138,36
4,67	234,01	137,21
4,77	236,11	135,99

Angolo di rottura pari a 322,8°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0,00	-58,13	181,75
5,07	202,23	168,22
5,17	205,06	165,92
5,28	207,83	163,57
5,38	210,52	161,16
5,49	213,15	158,71
5,59	215,72	156,21
5,70	218,23	153,66
5,80	220,67	151,06
5,91	223,06	148,41
6,01	225,39	145,73
6,12	227,67	143,00
6,23	229,89	140,22
6,33	232,06	137,41
6,44	234,17	134,55
6,54	236,24	131,66
6,65	238,25	128,72
6,75	240,22	125,75
6,86	242,14	122,74
6,96	244,01	119,70
7,07	245,84	116,62
7,18	247,62	113,51
7,28	249,37	110,36
7,39	251,07	107,18
7,49	252,73	103,97
7,60	254,34	100,73
7,70	255,93	97,46
7,81	257,47	94,16
7,91	258,97	90,83
8,02	260,44	87,47

Angolo di rottura pari a 221,3°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0,00	58,98	77,20
4,87	238,16	134,70
4,97	240,16	133,33
5,07	242,11	131,90
5,17	244,02	130,40
5,27	245,89	128,84
5,38	247,71	127,21
5,48	249,50	125,52
5,58	251,24	123,77
5,68	252,94	121,96
5,78	254,60	120,09
5,88	256,22	118,16
5,98	257,80	116,18
6,09	259,35	114,15
6,19	260,86	112,06
6,29	262,34	109,92
6,39	263,79	107,73
6,49	265,20	105,49
6,59	266,58	103,21
6,69	267,92	100,87
6,80	269,24	98,49
6,90	270,52	96,07
7,00	271,78	93,60
7,10	273,00	91,09
7,20	274,20	88,53
7,30	275,37	85,94
7,40	276,51	83,31
7,51	277,63	80,63
7,61	278,72	77,92
7,71	279,79	75,17

Angolo di rottura pari a 322,8°

t1	x1	y1
[s]	[m]	[m]
0,00	-58,13	181,75
8,13	261,88	84,09
8,23	263,28	80,68
8,34	264,65	77,24
8,44	265,98	73,78
8,55	267,28	70,29
8,65	268,55	66,78
8,76	269,79	63,24
8,86	271,00	59,68
8,97	272,18	56,10
9,07	273,34	52,49
9,18	274,46	48,87
9,29	275,56	45,22
9,39	276,63	41,56
9,50	277,68	37,87
9,60	278,70	34,16
9,71	279,70	30,44
9,81	280,67	26,69
9,92	281,62	22,93
10,02	282,55	19,15
10,13	283,45	15,35
10,24	284,33	11,54
10,34	285,20	7,71
10,45	286,04	3,86
10,55	286,86	0,00

Angolo di rottura pari a 221,3°

t2	x2	y2
[s]	[m]	[m]
0,00	58,98	77,20
7,81	280,83	72,39
7,91	281,85	69,57
8,01	282,84	66,71
8,11	283,81	63,82
8,22	284,76	60,90
8,32	285,69	57,95
8,42	286,59	54,96
8,52	287,48	51,94
8,62	288,34	48,89
8,72	289,19	45,82
8,82	290,01	42,71
8,93	290,82	39,58
9,03	291,61	36,42
9,13	292,37	33,23
9,23	293,13	30,01
9,33	293,86	26,77
9,43	294,58	23,51
9,53	295,28	20,22
9,64	295,96	16,91
9,74	296,63	13,57
9,84	297,28	10,21
9,94	297,92	6,83
10,04	298,55	3,42
10,14	299,15	0,00

Il tempo di permanenza in volo massimo è di 10,55 secondi circa. Il valore della gittata massima è 299,15 m. **L'ipotesi più gravosa però si manifesta considerando la lunghezza residuale del frammento, la rottura che avviene ad un angolo di 221,30°, comprendo una distanza pari a $D_{max} = 299,65$ m.**

6.0 CONCLUSIONI

È importante rimarcare che, sulla base di accurati studi statistici su aerogeneratori di grossa taglia, la rottura di un frammento di pala è **da escludere** in considerazione delle caratteristiche costruttive delle pale stesse. Il distacco dell'intera pala è invece potenzialmente possibile, dovuto ad esempio, ad una cattiva manutenzione (verifica del corretto serraggio dei prigionieri che incardinano la pala al centro del rotore).

La definizione del moto di una pala di un aerogeneratore o di un frammento di pala è un problema alquanto complesso. È certo, d'altra parte sulla base dell'esperienza e di semplici considerazioni fisiche (conservazione della quantità di moto), che trattasi di un moto rotazionale complesso in un fluido viscoso (aria).

Il moto libero di un corpo di massa nota M sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, dalle seguenti equazioni:

$$a_x = d^2x/dt^2 = -1/M \times F_D \times \cos\alpha$$

$$a_y = d^2y/dt^2 = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M$$

$$a_z = d^2z/dt^2 = -1/M \times (F_D \times \sin\alpha + M \times g)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}^2$$

In particolare F_D è la forza di attrito dovuta alla resistenza dell'aria sul corpo in movimento che è direttamente proporzionale al quadrato della velocità ma , dipende dalla densità dell'aria ρ_{aria} , da forma e superficie dell'elemento in movimento (A , C_D). Attribuendo opportuni valori ai vari coefficienti si sono risolte le equazioni differenziali, con il metodo iterativo di Eulero, rispetto alle variabili x , y e z . Da queste poi è stata calcolata la gittata sulla base di considerazioni geometriche.

Dal momento che sono stati considerati per ciascun parametro valori ampiamente conservativi e nelle condizioni di esercizio più gravose (massima velocità di rotazione, massima velocità del vento) il valore della gittata calcolato si può considerare ampiamente conservativo, pertanto da considerarsi quale gittata massima. Il valore calcolato per la gittata massima dell'intera pala nel caso di rottura accidentale è il seguente:

$$***D_{max} = 200,45 m (pala intera)***$$

Il calcolo è stato poi eseguito risolvendo le stesse equazioni nel caso in cui il distacco fosse riferito a frammenti di pala, benché tale evento è da considerarsi pressoché impossibile, con i seguenti risultati:

$$***D_{max} = 276,10 m (Frammento L = 10 m)***$$

$$***D_{max} = 288,50 m (Frammento L = 5 m)***$$

$$***D_{max} = 299,65 m (Frammento L = 1 m)***$$

Dai risultati è evidente che:

- Nel caso dell'intera pala il notevole peso, incide notevolmente sulla lunghezza della traiettoria, oltre che sul tempo di volo;
- Nel caso dei frammenti, quanto più piccoli (e quindi leggeri) essi sono, tanto maggiore è il valore della gittata;
- I valori della gittata sono tutti dipendenti dall'angolo α_0 a cui avviene il distacco. In tutti i casi il valore dell'angolo massimo per cui si ha il valore massimo della gittata è stato definito valutando tutte le possibilità.

—
Anche nel caso peggiore la gittata si mantiene al di sotto dei 300 m.

E' importante infine ribadire che, in uno specifico studio del costruttore degli aerogeneratori in progetto si dimostra che la rottura di un frammento di pala è da escludere in considerazione delle caratteristiche costruttive delle pale stesse.

Tale affermazione è peraltro avvalorata dalla statistica, su un campione di 15.679 unità di aerogeneratori di grande taglia del tipo di quelli in progetto tale evento non si è mai verificato. Il distacco dell'intera pala è invece potenzialmente possibile, e sempre secondo il costruttore, dovuto ad una cattiva manutenzione (verifica del corretto serraggio dei prigionieri che incardinano la pala al centro del rotore).

E' peraltro evidente che attesi i notevoli interessi economici in gioco la manutenzione ordinaria, straordinaria degli aerogeneratori sarà effettuata puntualmente dalla proprietà dell'impianto. La rottura di una pala comporterebbe un fermo macchina con costi più elevati di quelli che si sostengono con la normale manutenzione ordinaria, ed anche una eventuale sostituzione di una pala.

In definitiva il distacco di una pala è un evento con probabilità molto bassa e praticamente nulla.

Il distacco accidentale di un frammento appare un evento ancora meno probabile in considerazione delle modalità costruttive delle pale stesse. Si tratta di pezzi unici realizzati con resine e fibre con tessiture che assicurano un'alta resistenza meccanica, e che anche nel caso peggiore (fulminazione) porterebbero la pala a piegarsi, senza spezzarsi e quindi senza generare distacco di frammenti.

Ing. Dino Distinto

Arch. Savino Marucci