

**COMUNI DI BITTI, ORUNE E BUDDUSO'**  
**PROVINCE DI NUORO E SASSARI**



**PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO "GOMORETTA"**

Elaborato: EP\_CIV\_R014

Scala : -

Data : 11 dicembre 2017

Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti

COMMITTENTE :  
Siemens Gamesa Renewable Energy Italy S.p.A.

RESPONSABILE TECNICO COMMESSA :  
Dott. Ing. Nicola Maria Pepe

COORDINAMENTO :

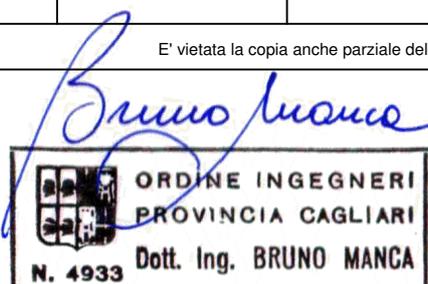
*Bm* Studio Tecnico Industriale  
Dott. Ing. **Bruno Manca**



N° REVISIONE	Data revisione	Elaborato	Controllato	Approvato	NOTE
Rev.00	11/12/2017	BM	NMPEPE	GMERCURIO/NMPEPE	A4 (210x297mm)

E' vietata la copia anche parziale del presente elaborato

Gruppo di lavoro : Dott.ssa in Arch. Giorgia Campus  
Dott.ssa Ing. Barbara Dessi  
Dott.ssa Ing. Alessandra Scalas



## INDICE

<b>1. MASSIMA GITTATA DI ELEMENTI ROTANTI NEL CASO DI ROTTURA ACCIDENTALE .....</b>	<b>2</b>
1.1 ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE MINIME.....	2
1.2 ROTTURA ACCIDENTALE DI PEZZI MECCANICI IN ROTAZIONE.....	5
<b>2. ANALISI TEORICA .....</b>	<b>5</b>
<b>3. TRAIETTORIA DEL FRAMMENTO .....</b>	<b>6</b>
<b>4. TEMPO DI VOLO .....</b>	<b>6</b>
<b>5. DISTANZA PERCORSO .....</b>	<b>6</b>
<b>6. MODELLO TEORICO .....</b>	<b>6</b>
<b>7. ANALISI AEROGENERATORE IN PROGETTO .....</b>	<b>8</b>
<b>8. PROVE SPERIMENTALI .....</b>	<b>9</b>
<b>9. RISCHIO DI INCIDENTI .....</b>	<b>9</b>

## 1. MASSIMA GITTATA DI ELEMENTI ROTANTI NEL CASO DI ROTTURA ACCIDENTALE

Il rischio è considerato in questo contesto come combinazione di due fattori:

- la probabilità che possa accadere un determinato evento;
- la probabilità che tale evento abbia conseguenze sfavorevoli.

Appare evidente che, durante il funzionamento dell'impianto, il più grande rischio per le persone possa essere dovuto alla caduta di oggetti dall'alto.

Queste cadute possono essere dovute a:

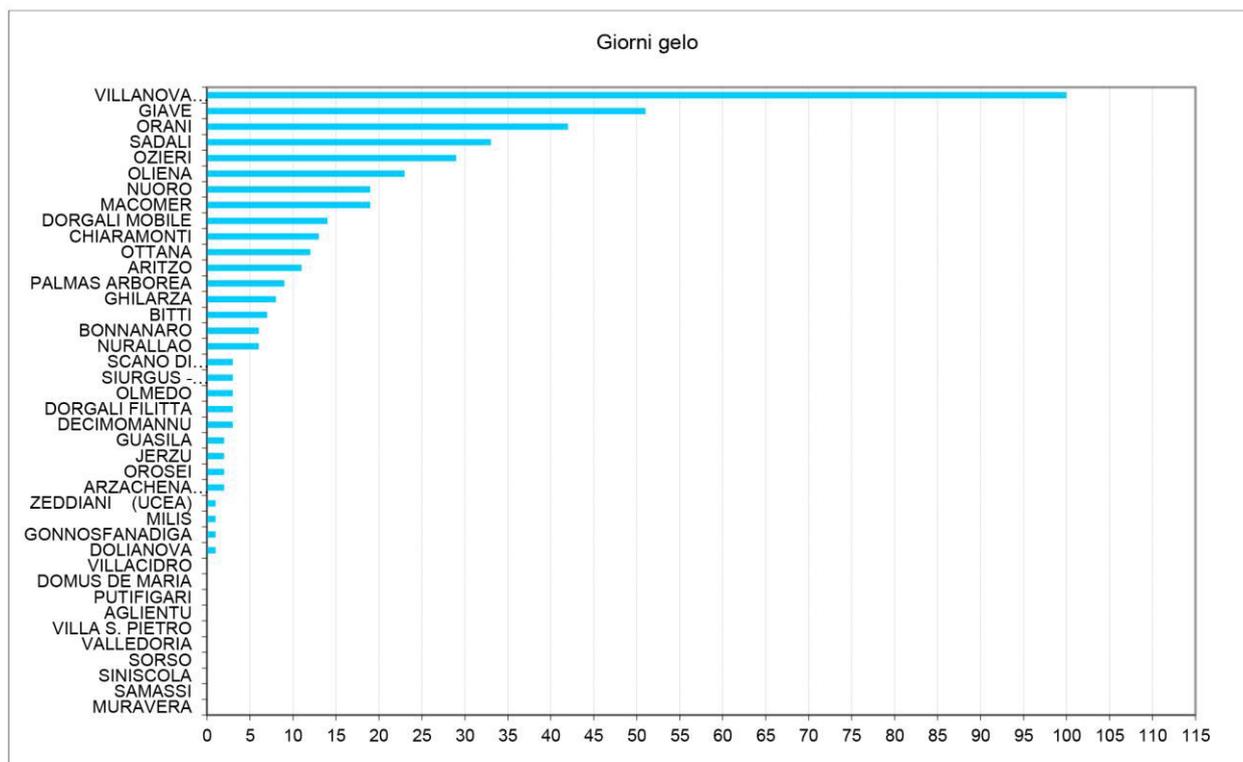
- pezzi di ghiaccio formatisi sulla pala;
- rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Per ciò che concerne la prima tipologia di evento, vista la latitudine dell'area di progetto, la sua probabilità si può considerare praticamente nulla.

### 1.1 ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE MINIME

Per l'analisi delle temperature minime si è fatto riferimento al documento "Analisi agrometeorologica e climatologica della Sardegna. Analisi delle condizioni meteorologiche e conseguenze sul territorio regionale nel periodo ottobre 2015 - settembre 2016" dell'AGENZIA REGIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE DELLA SARDEGNA – ARPAS.

Su tale documento vengono analizzati, tra i vari dati, il numero di giorni di gelo, vale a dire il numero di giorni in cui la temperatura minima è pari o inferiore a 0 °C; tale valore rappresenta un semplice indicatore che fornisce informazioni sulle condizioni di rischio meteorologico dovute a basse temperature, indipendentemente dai valori estremi. Come si può evidenziare dal grafico in Figura 1, nel corso dei mesi più freddi la maggior parte delle stazioni ARPAS ha registrato un numero piuttosto elevato di 'giorni di gelo' in alcune località dell'interno; in generale nel mese di Gennaio (2015) si è totalizzato il maggior numero di giorni di gelo.



**Figura 1- Numero di giorni di gelo ( $T_{min} \leq 0^{\circ}C$ ) registrati nell'annata 2015-2016**

Nello specifico si è andata ad analizzare la situazione della stazione più prossima all'area in esame individuata in quella di "Bitti", comune in cui è sito il parco eolico in progetto. La stazione di misura dista rispettivamente circa 7 Km dal settore n.1 del parco eolico e circa 4 Km dal settore n.2, come riportato in Figura 2.

Analizzando i valori riportati in Figura 1, si evince come per l'anno 2015-2016 si sono registrati 7 giorni in cui la temperatura è scesa sotto lo zero termico.

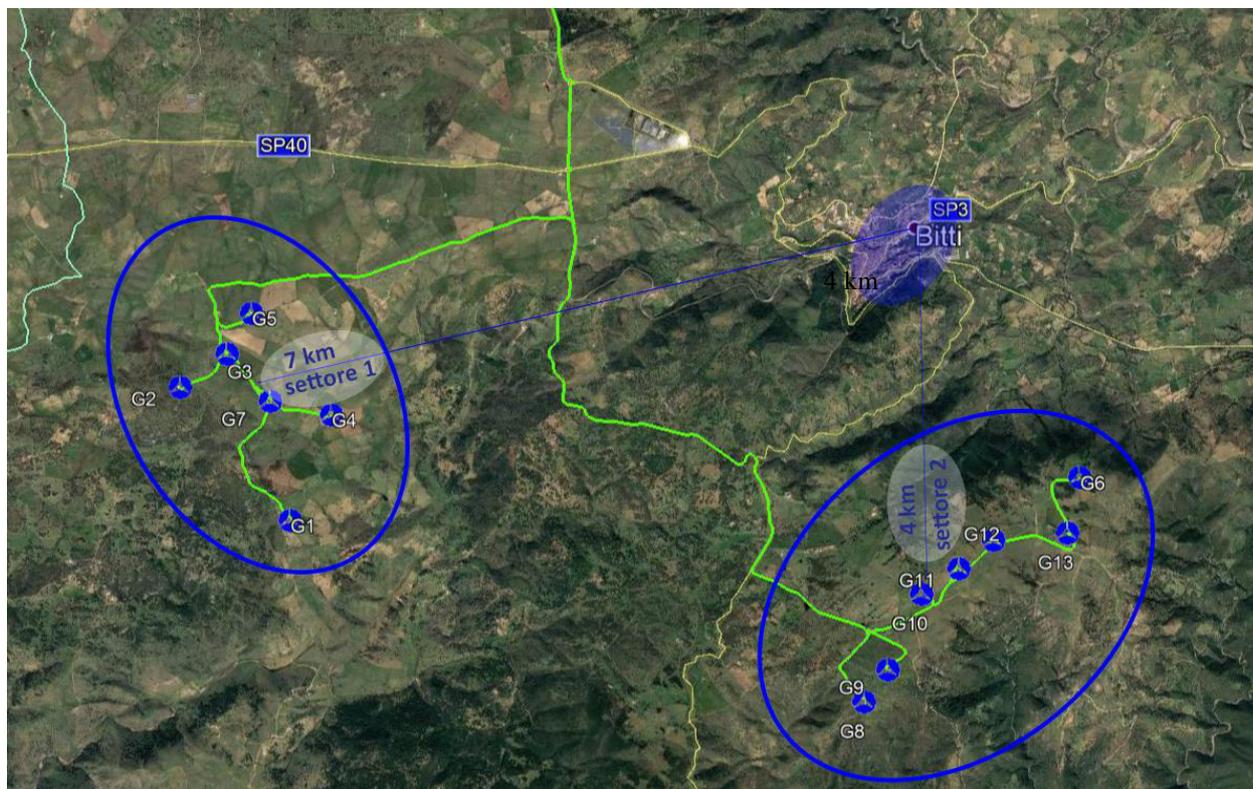


Figura 2 – Localizzazione della stazione ARPAS rispetto al parco eolico

Tabella 1 – Valori estremi di temperatura minima e permanenza dei valori orari sotto le soglie di 0, -3, -5 °C, mese di Gennaio 2015.

Stazioni	T minime assolute (°C)	N° ore mensili e massimi giornalieri			Valori "normali" ed estremi del periodo 1995-2007		
		0 °C	-3 °C	-5 °C	0 °C	-3 °C	-5 °C
VILLANOVA STRISAILI	-8.4	169 (14)	81 (11)	28 (7)	203 [93 - 323]	78 [47 - 166]	30 [15 - 97]
GAVOI	-7.7	109 (13)	63 (9)	29 (8)	-	-	-
SADALI	-7.6	38 (11)	3 (2)	1 (1)	54 [3 - 185]	7 [0 - 47]	0 [0 - 13]
GIAVE	-6.9	65 (11)	15 (8)	6 (6)	99 [10 - 199]	19 [0 - 100]	1.125 [0 - 43]
ILLORAI	-5.7	18 (7)	6 (4)	0 (0)	48 [0 - 238]	2.5 [0 - 48]	0.125 [0 - 24]
ORANI	-5.3	63 (8)	9 (6)	0 (0)	46 [8 - 140]	7 [0 - 57]	0 [0 - 25]
MACOMER	-4.7	30 (7)	2 (2)	0 (0)	16 [0 - 138]	0 [0 - 34]	0 [0 - 10]
OZIERI	-4.6	60 (9)	6 (5)	0 (0)	48 [13 - 142]	4 [0 - 44]	0 [0 - 5]
BENETUTTI	-4.3	46 (8)	1 (1)	0 (0)	31 [21 - 158]	4 [0 - 52]	0 [0 - 14]
NUORO	-3.9	36 (7)	5 (2)	0 (0)	21 [0 - 92]	0.25 [0 - 17]	0 [0 - 2]
CHIARAMONTI	-3.8	27 (6)	1 (1)	0 (0)	28 [1 - 71]	0 [0 - 7]	0 [0]
OLIENA	-3.8	25 (7)	1 (1)	0 (0)	27.5 [12 - 140]	0.625 [0 - 51]	0 [0 - 4]
NURALLAO	-3.4	11 (8)	0 (0)	0 (0)	4 [0 - 54]	0 [0 - 6]	0 [0]
OTTANA	-3.2	32 (8)	0 (0)	0 (0)	44 [9 - 108]	1 [0 - 16]	0 [0 - 1]
DORGALI MOBILE	-2.5	29 (8)	0 (0)	0 (0)	-	-	-
GUASILA	-2.5	8 (8)	0 (0)	0 (0)	0 [0 - 36]	0 [0 - 5]	0 [0]
GHILARZA	-2.3	11 (3)	0 (0)	0 (0)	7.5 [0 - 56]	0 [0 - 6]	0 [0]
SCANO DI MONTIFERRO	-2.1	7 (7)	0 (0)	0 (0)	1 [0 - 74]	0 [0 - 11]	0 [0]
BITTI	-2.0	14 (7)	0 (0)	0 (0)	25 [0 - 160]	0 [0 - 34]	0 [0 - 15]
OLMEDO	-1.7	15 (3)	0 (0)	0 (0)	5 [0 - 44]	0 [0 - 3]	0 [0]

Nella Tabella 1 è possibile osservare come per la stazione di Bitti nel mese di Gennaio 2015 ci siano state 14 ore di temperature sotto lo zero con un andamento estremo registrato negli anni 1995 – 2007 pari ad un minimo di 0 ore ed un massimo di 160 ore.

## 1.2 ROTTURA ACCIDENTALE DI PEZZI MECCANICI IN ROTAZIONE

Viene indagato il tipo di danno che potrebbe essere provocato da elementi rotanti in caso di rottura con particolare riferimento alla gittata massima di tali frammenti.

Le pale dei rotori di progetto sono realizzate in composito di fibra di vetro con resina epossidica. L'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi 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).

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo le turbine della piattaforma Gamesa G132 saranno protette con un parafulmine. In conformità a quanto previsto dalla norma CEI 81-1 la classe di protezione sarà quella più alta (Classe I, IO standard IEC 62305, IEC 61400 e IEC61024). 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 possiamo sicuramente affermare che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è bassa, seppure esistente.

## 2. ANALISI TEORICA

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° e di moto a "giavellotto" del frammento.

Le forze di resistenza viscosa agendo sulla superficie del frammento si oppongono al moto e ne riducono il tempo e la distanza di volo. A questa azione si contrappongono le forze aerodinamiche di portanza che si innescano sulla pala/sezione-di-pala distaccata (in virtù del profilo aerodinamico secondo il quale vengono modellate le sezioni trasversali della pala stessa), prolungando il tempo e la distanza di volo. Il prevalere di una o dell'altra forza è fortemente dipendente dalle caratteristiche di volo: rollio, beccheggio ed imbardata della pala/sezione-di-pala durante il volo. L'azione della portanza può essere considerata nei calcoli schematizzandola in una riduzione percentuale di peso della parte distaccata.

---

### 3. TRAIETTORIA DEL FRAMMENTO

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, static&dinamic forces, static drag e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione-di-pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

### 4. TEMPO 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.

### 5. DISTANZA PERCORSA

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco,
- dalle forze di attrito in-plane ed out-plane che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo,
- dal tempo di volo così come sopra definito.

La distanza in-plane dipende dalle forze di attrito e dalla componente orizzontale della velocità iniziale in-plane quando il distacco avviene in corrispondenza di un angolo di 45 gradi; la distanza out-plane dipende dalle forze di attrito e dalla velocità del vento nel momento del distacco. La somma vettoriale della distanza in-plane e della distanza out-plane permette di ricavare la distanza totale percorsa in volo dalla pala/sezione di pala distaccata.

### 6. MODELLO TEORICO

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": in caso di rottura, per il principio di conservazione del momento angolare, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano; inoltre a causa delle diverse pressioni cinetiche esercitate dal vento, lo spezzone tende anche a ruotare intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto "a giavellotto" sono da escludere data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell'azione del vento.

Per completezza di trattazione è doveroso citare lo studio eseguito dalla PB Power Ltd per conto della società Vestas Wind System "VESTAS V80 – Blade throw calculation under normal operating conditions" (2001). Dai risultati di tale studio si evince che, in caso di rottura accidentale, il valore di gittata massima degli elementi rotanti di una pala dell'aerogeneratore VESTAS V80 risulta inferiore ai 350 metri, escludendo a ragione tutti i casi puramente teorici di moto e traiettoria a giavellotto.

Di seguito una tabella estratta dallo studio effettuato in merito alla massima gittata in caso di rottura dell'intera pala o di parte di essa per l'aerogeneratore V80, in relazione all'entità del "drag force coefficient"<sup>1</sup>:

<b>Case 3a</b>	5m blade section	10m blade section	Whole blade
	For Drag IPA= 1.26 m <sup>2</sup> IPCD=0.5 OPCD=0.5 OPA=1.26 m <sup>2</sup>	For Drag IPA= 4.9 m <sup>2</sup> IPCD=0.5 OPCD=0.5 OPA=4.9m <sup>2</sup>	For Drag IPA= 40.73 m <sup>2</sup> IPCD=0.5 OPCD=0.5 OPA=40.73 m <sup>2</sup>
<b>Rotorspeed = 20 rpm</b>			
Flight Time	13.88	12.76	6.74
In-plane distance (m)	316.3	296.4	103.8
Outplane distance (m)	143.1	121.2	24.0
Vectorial distance (m)	347.2	320.2	106.5

*Figura 3 - Caso 3a: drag force coefficient = 0,5*

<sup>1</sup> Il drag force coefficient è un parametro atto a descrivere l'entità della forza (drag force) che si oppone al moto di un corpo all'interno di un fluido. Tale parametro tiene conto della viscosità del mezzo, della velocità posseduta dal corpo, nonché della forma e della rugosità superficiale dello stesso. Più è alto il suo valore, maggiore è l'entità della forza che si oppone al moto, minore è la distanza percorsa dal corpo.

<b>Case 3b</b>	5m blade section	10m blade section	Whole blade
	For Drag IPA= 1.26 m <sup>2</sup> IPCD=1 OPCD=1 OPA=1.26 m <sup>2</sup>	For Drag IPA= 4.9 m <sup>2</sup> IPCD=1 OPCD=1 OPA=4.9m <sup>2</sup>	For Drag IPA= 40.73 m <sup>2</sup> IPCD=1 OPCD=1 OPA=40.73 m <sup>2</sup>
<b>Rotorspeed = 20 rpm</b>			
Flight Time	13.88	12.76	6.74
In-plane distance (m)	216.6	208.5	94.6
Outplane distance (m)	195.2	169.2	41.0
Vectorial distance (m)	291.6	268.5	103.1

*Figura 4 - Caso 3a: drag force coefficient = 1*

<b>Case 3c</b>	5m blade section	10m blade section	Whole blade
	For Drag IPA= 1.26 m <sup>2</sup> IPCD=1.5 OPCD=1.5 OPA=1.26 m <sup>2</sup>	For Drag IPA= 4.9 m <sup>2</sup> IPCD=1.5 OPCD=1.5 OPA=4.9m <sup>2</sup>	For Drag IPA= 40.73 m <sup>2</sup> IPCD=1.5 OPCD=1.5 OPA=40.73 m <sup>2</sup>
<b>Rotorspeed = 20 rpm</b>			
Flight Time	13.88	12.76	6.74
In-plane distance (m)	168.2	164.2	87.3
Outplane distance (m)	223.8	196.3	53.7
Vectorial distance (m)	280.0	256.0	102.5

*Figura 5 - Caso 3a: drag force coefficient = 1,5*

La velocità assunta è pari a 20 giri/minuto.

## 7. ANALISI AEROGENERATORE IN PROGETTO

La velocità massima di rotazione del tipo di aerogeneratore previsto in progetto non supera i 10,5 giri/minuto.

Volendo dedurre dei risultati più reali per l'aerogeneratore di progetto, restando comunque in regime cautelativo, vale a dire considerando una velocità di rotazione di circa 21 rpm (maggiore di quella che è in realtà, che si ricorda è pari a 10,5 rpm) a garanzia di un margine del 50% che tenga conto di eventuali transitori dovuti allo slittamento del generatore ed agli effetti del sistema di pendenza, considerando che gli studi effettuati da Vestas riguardano un aerogeneratore caratterizzato da un diametro di 80 m, quindi di dimensioni inferiori a quelle dell'aerogeneratore di progetto, si può affermare che i dati riportati nelle tabelle di cui sopra possano essere ridotti - senza commettere errore di sottostima - di almeno il 10-20%.

Quindi considerando il caso peggiore che possa verificarsi, vale a dire condizioni di drag force coefficient pari a 0,5 e rottura di una sezione palare di dimensione pari a 5 m, la massima gittata che può verificarsi, e quindi la massima distanza a cui il frammento tocca il suolo, è pari a circa 310 m.

## 8. PROVE SPERIMENTALI

Esperienze pratiche su parchi eolici esistenti, con analisi effettuata su un lungo periodo di osservazione, hanno dimostrato che ciò che si verifica in realtà in caso di rottura di parti della pala (caso in cui la gittata risulta essere superiore al caso di rottura/distacco dell'intera pala) è un moto di rotazione complesso e la distanza di volo è sempre ben al di sotto dei risultati ottenuti attraverso i calcoli matematici. Le parti che subiscono il distacco a causa di eventi esterni come la fulminazione sono state rinvenute a non più di 40-50 m dalla base della torre eolica.

## 9. RISCHIO DI INCIDENTI

I principali rischi di incidente connessi con la fase di realizzazione dell'opera sono quelli tipici della realizzazione di opere in quota: carichi sospesi, cadute accidentali dall'alto. Si farà pertanto uso di tutti i dispositivi di sicurezza e modalità operative per ridurre al minimo il rischio di incidenti con ovvia conformità alla legislazione vigente in materia di sicurezza nei cantieri.

Per quanto riguarda la formazione di ghiaccio e la probabilità che questo si stacchi procurando dei rischi alle persone risulta molto bassa, in quanto le temperature al di sotto dello zero in prossimità del parco eolico si manifestano per brevi periodi dell'anno, come mostrato nel paragrafo § 1.1.

Al fine di ridurre al minimo le pur residue possibilità di impatto con elementi distaccatisi dal rotore, in fase di progettazione si è considerato il valore calcolato della gittata massima di elementi rotanti, inferiore:

- alla distanza da strade statali e provinciali, distanza che sarà pari almeno a 320 m;
- alla distanza da qualsiasi edificio anche non abitato insistente nell'area di impianto, distanza che sarà pari ad almeno 320 m.