

Regione Basilicata



Provincia di Matera



Comune Craco



Comune Stigliano

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE  
DI UN PARCO EOLICO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA, DELLE OPERE  
CONNESSE E DELLE INFRASTRUTTURE INDISPENSABILI  
LOCALITÀ Masseria San Marco (Craco) e Monte Quartarone (Stigliano)

**PROGETTO DEFINITIVO**

**A.7**  
*Analisi degli effetti della  
rottura degli organi rotanti*

*Proponente*



SARVE S.r.l.  
c/o Centro Servizi Imprese  
Via del Seminario Maggiore 115  
85100 - Potenza (PZ)

*Progettista*

Ing. Rossi Francesco Maria



Ing. Vassalli Quirino



Formato

A4

Scala

Scala stampa

1:1

CRC\_A7\_Analisi effetti rottura organi rotanti.docx  
CRC\_A7\_Analisi effetti rottura organi rotanti.pdf

Revisione	Descrizione	Data	Preparato	Controllato	Approvato
00	Emissione	30/11/2011	Bartolazzi	Bartolazzi	Italcantieri
01	Cambio WTG	29/03/2016	QV	QV/FR/AS	SARVE

## INDICE

<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>3</b>
<b>2. INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>3. STUDIO DI GITTATA DELLA PALA DELL'AEROGENERATORE .....</b>	<b>4</b>
3.1 IPOTESI DI CALCOLO.....	4
IPOTESI DI DISTACCO E CONSIDERAZIONI CAUTELATIVE .....	4
3.2 CALCOLO DI GITTATA .....	5
3.2.1 <i>Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica.....</i>	<i>7</i>
3.2.2 <i>Gittata massima.....</i>	<i>8</i>
3.2.3 <i>Calcolo della velocità periferica.....</i>	<i>9</i>
3.2.4 <i>Calcolo della gittata massima .....</i>	<i>10</i>

## **1. PREMESSA**

Con riferimento alle Procedure per la Realizzazione e l'Utilizzo degli impianti eolici contenute nel "Piano di Indirizzo Energetico Ambientale Regionale" approvato con L.R. 21/2010 ed emesso dal Dipartimento delle Attività Produttive della Regione Basilicata, è necessaria la valutazione della gittata massima che può avere l'elemento costruttivo "pala" dell'aerogeneratore in caso di improvviso ed accidentale distacco dal rotore dell'aerogeneratore stesso.

Il presente documento riporta lo studio effettuato per la valutazione della gittata massima della pala, con riferimento alla tecnologia utilizzata nel progetto di parco eolico previsto nei comuni di Craco e Stigliano, in provincia di Matera.

## **2. INTRODUZIONE**

Lo studio viene eseguito utilizzando una metodologia di calcolo che abbia rigore scientifico e considerando tutti i possibili effetti meccanici ed aerodinamici che possono in qualche modo influenzare la distanza di gittata della pala.

Nel calcolo s'ipotizza per ragioni cautelative l'applicazione delle condizioni peggiori in cui si possa verificare il distacco della pala dell'aerogeneratore.

In particolare, a causa delle caratteristiche costruttive degli aerogeneratori, la pala che accidentalmente si distacca dal rotore viene messa in moto dalla forza centrifuga determinata dalla rotazione del rotore stesso, con una velocità iniziale  $V_0$  proporzionale alla velocità di rotazione del rotore.

In questa trattazione verranno analizzate essenzialmente situazioni critiche che riguardano il distacco della pala integra dall'aerogeneratore, quindi senza che essa si frammenti in porzioni di varie dimensioni. Questo tipo di approccio semplifica moderatamente il problema ma garantisce una buona verosimiglianza del calcolo, poiché non potendo prevedere la forma, né le dimensioni dei frammenti che potrebbero staccarsi dalla pala ogni ipotesi in merito potrebbe generare scenari non del tutto attendibili.

### **3. STUDIO DI GITTATA DELLA PALA DELL'AEROGENERATORE**

Lo studio è stato condotto prendendo in esame le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore e della pala previsti nel progetto di parco eolico cui fa riferimento il presente lavoro. In particolare è stato considerato l'aerogeneratore modello N131 della Nordex con potenza nominale unitaria di 3500kW.

#### **3.1 Ipotesi di calcolo**

Di seguito sono elencate le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore e della pala utilizzata nello studio, le ipotesi di funzionamento e le condizioni cautelative adottate.

#### **Specifiche tecniche dell'aerogeneratore**

##### **ROTORE**

- Altezza mozzo 114 m
- Diametro 131 m
- Area spazzata 13'478 m<sup>2</sup>
- Velocità di rotazione massima 6.5 – 11.6 rpm
- Numero pale 3
- Lunghezza pala 65.5
- Posizione del baricentro 1/3 della sua lunghezza, a partire dalla radice

##### **CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO**

- Velocità di cut-in 3.0 m/s
- Velocità di cut-out 20.0 m/s
- Velocità nominale 10.3 rpm

#### **IPOTESI DI DISTACCO E CONSIDERAZIONI CAUTELATIVE**

- Per mettersi nella condizione di gittata massima possibile, si assume che il distacco della pala avvenga in fase di rotazione del rotore quando la pala passa nella metà superiore del piano di rotazione, sopra il mozzo;
- Si suppone che il distacco avvenga nelle condizioni di velocità massima di rotazione del rotore maggiorato del 10%, e quindi pari a 22.0 rpm;
- Si suppone che il vento presente all'altezza dell'Hub sia quello corrispondente alla velocità di rotazione nominale, e quindi compreso tra 3 m/s e 20 m/s. Tuttavia, poiché il vento è ortogonale al piano del rotore e la pala viene gittata nel piano stesso, l'azione meccanica del vento non dovrebbe aumentare la lunghezza della gittata. D'altra parte la pala ha un profilo alare, che per azione del vento e per effetto della posizione della pala rispetto a questo può essere sia portante (sostenendo in volo la pala), sia deportante (spingendola verso il basso). Nell'ipotesi peggiore si suppone in via cautelativa che l'azione del vento prolunghi il tempo di volo della pala stessa del 20%.
- Gli effetti viscosi dell'aria determinano una resistenza aerodinamica della stessa nel moto in aria, che tendono a frenare la pala stessa e a ridurre la lunghezza di gittata. Per cautela nel calcolo sono stati trascurati gli effetti viscosi frenanti dell'aria.
- Non sono stati considerati moti rotatori della pala che possono sopraggiungere in virtù della conservazione del momento della quantità di moto, poiché questa ulteriore assunzione fa sì che il caso esaminato sia la condizione peggiore ipotizzabile.

### **3.2 Calcolo di gittata**

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati (o urtano ad esempio) con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante e che compiono un moto parabolico. Chiaramente la resistenza dell'aria non è assolutamente trascurabile.

Infatti, più il corpo è grande, più la resistenza dell'aria (o di un altro fluido) influisce sulle variabili del moto (gittata, altezza massima, tempo di caduta). Una caratteristica importante della resistenza aerodinamica dei fluidi è che essa dipende dalla velocità: più veloci sono gli oggetti più grande è la resistenza dei fluidi nei quali si muovono: tale premessa è utile per

ritenere trascurabili le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto (aria).

Nel caso notevole di un proiettile non puntiforme, le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{g} = \mathbf{M}\mathbf{a}_G$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = 0$$

Supponendo di concentrare tutto nel centro di massa, il momento della forza peso è nullo (avendo scelto G come polo dei momenti). Pertanto la seconda equazione ci dice che il corpo durante la traiettoria che percorre, gira indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia. La soluzione del problema viene dalla risoluzione della prima equazione; ed evidenzia che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme e, di conseguenza, ne compirà il caratteristico andamento parabolico.

Il moto di un proiettile si può pensare come la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione modulo g) in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita da un corpo, se è denso e poco esteso, o altrimenti dal suo centro di massa, ha un andamento parabolico. La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato un proiettile (con velocità iniziale inclinata verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo. È interessante osservare che all'aumentare dell'angolo a formato con il terreno, la gittata del proiettile aumenta, presentando valore massimo per un angolo a pari a  $\pi/4$ ; ad ulteriori incrementi dell'angolo a il valore della gittata torna a diminuire presentando un valore nullo allorquando il proiettile è lanciato verso l'alto con angolo pari a  $\pi$ .

Per studiare la gittata di un proiettile che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) utilizzeremo un sistema di riferimento cartesiano x - y in cui l'origine 0 degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

### 3.2.1 Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica

Considereremo il moto bidimensionale di un proiettile, come il moto di un punto materiale, 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.

Sceglieremo un sistema di riferimento con l'origine degli assi  $O$  centrata nel punto di partenza del corpo  $(x_0, y_0)$ , con l'asse delle  $Y$  positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle  $X$  nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile; le componenti dell'accelerazione saranno

$$a_x = 0 \quad a_y = -g.$$

Rappresenteremo la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale  $V_0$  e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di  $\theta$  come in figura:

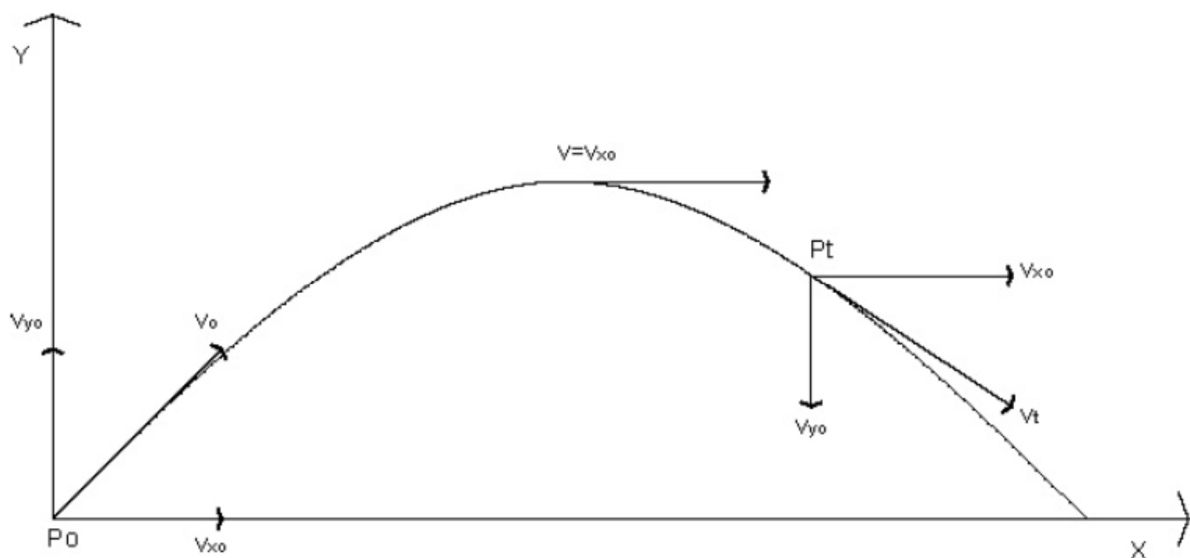


Figura 1 - Traiettoria di un grave in caduta

Ricordando che:

$$a_x = 0 \quad a_y = g \quad (\text{dove}) \quad g = -9.81 \text{ m/s}^2$$

e considerando che:

Direzione  $x$ : il MOTO è RETTILINEO UNIFORME

Direzione  $y$ : il MOTO è UNIFORMEMENTE ACCELERATO

La velocità  $V_0$  ha componenti nelle due direzioni:

$$v_x = v_0 \cos\theta$$

$$v_y = v_0 \sin\theta$$

Da cui:

$$v_x = v_{x0}$$

$$x = x_0 + v_{x0}t$$

e

$$v_y = gt + v_{y0}$$

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

### 3.2.2 Gittata massima

La gittata è la distanza percorsa dal proiettile in direzione x prima di toccare terra.

Questo valore si trova imponendo che nella equazione

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

sia nullo y determinando così l'istante t in cui avviene il transito (e in questo caso l'impatto) alla quota  $y = 0$  sarà:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 = 0$$

Nell'ipotesi semplificativa che  $y_0 = 0$  si ottiene:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t = 0$$

da cui le due soluzioni:

$$t_0 = 0$$

$$t_1 = -\frac{2v_{y0}}{g} = -\frac{2v_0 \sin\theta}{g}$$

$t_0$  corrisponde all'istante di lancio del proiettile (abbiamo infatti ipotizzato per semplicità che  $y_0 = 0$ );  $t_1$  all'istante in cui il proiettile, avvenuto il lancio, tocca nuovamente terra.

Sostituendo quest'ultimo valore  $x = x_0 + v_{x0}t$  nell'equazione, descrittiva del moto lungo x, si ricaverà il valore della gittata:

$$x = x_0 - 2\frac{v_0^2}{g} \sin\theta \cos\theta$$

Ipotizzando per semplicità che

$$x_0 = 0$$



ed essendo

$$2\sin\theta\cos\theta = \sin 2\theta$$

si può riscrivere la equazione per il calcolo della gittata come:

$$x = -\frac{v_0}{g} \sin 2\theta$$

La gittata massima è così funzione del modulo della velocità iniziale, della ascissa e della quota iniziale di lancio (che in questo caso semplificato sono state considerate nulle), **e di  $\theta$  angolo di inclinazione della gittata: in particolare essa sarà massima quando  $\sin 2\theta = 1$  cioè  $2\theta = \pi/2$  ossia  $\theta = \pi/4$ .**

Nel caso in questione  $y_0$  non sarà uguale a zero, ma corrispondente alla quota del baricentro G del sistema ipotizzato rispetto alla quota del piano di campagna.

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, ossia  $r_g = 21.83$  m essendo il raggio di ciascuna pala uguale a 65.50 m.

Di conseguenza l'altezza di lancio sarà uguale a:

$$y_0 = H_{torre} + Y_g$$

dove

$$Y_g = \frac{1}{3} r_g \cdot \sin\theta$$

Ciò implica che la soluzione di t sarà:

$$t = \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4 \left( \frac{1}{2} g y_0 \right)}}{g}$$

tale valore andrà sostituito nell'equazione descrittiva del moto lungo x, per trovare la gittata massima.

### 3.2.3 Calcolo della velocità periferica

La velocità angolare media  $\omega$  è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo. 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  $2\pi$  radianti,

per n giri avremo  $2\pi n$  radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare  $\omega$  al minuto del corpo in movimento.

Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/s}$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio r percorre la circonferenza  $2\pi r$ ; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà  $2\pi n$  metri/minuto. E questo sarà lo spazio percorso da tutti i punti situati sulla periferia del corpo in movimento circolare.

Dunque la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante (considerando la velocità massima del rotore di 11.6 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot r_g = \frac{2\pi n}{60} r_g = 26.50 \text{ m/s}$$

### 3.2.4 Calcolo della gittata massima

Quindi, nell'ipotesi di distacco di una pala nel punto di serraggio del mozzo, punto di maggiore sollecitazione a causa del collegamento, vengono considerate le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema è considerato di tipo rigido non vincolato;
- si ritengono trascurabili le forze di resistenza dell'aria;
- le componenti dell'accelerazione saranno  $a_x = 0$ ,  $a_y = -g$ ;
- la velocità periferica  $v_0$  è uguale a 26.50 m/s;
- Le coordinate del punto di partenza del corpo, non saranno (0,0) coincidenti con l'origine degli assi ma  $(0, H_G = H_{torre} + Y_g)$  ossia le coordinate del baricentro G di una pala.

La risoluzione dell'equazione descrittiva del moto, nelle suddette condizioni, sarà quindi:

$$Gittata_{max} = v_{x0} \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4 \left( \frac{1}{2} g \cdot H_g \right)}}{g}$$

Al valore di gittata massima andrà aggiunta la distanza  $X_g$  del baricentro rispetto all'asse della torre  $X_g = r_g \cdot \cos\theta$  e la distanza del vertice della pala considerato nelle condizioni più gravose, ovvero disposto nella parte più lontana dal baricentro, ossia a  $X_g = 21.47$  m.

Nella tabella che segue si sono indicati i valori più rappresentativi della gittata massima e della distanza totale dalla torre nel punto di caduta rispetto a valori di  $\theta$  corrispondenti a 0, 45, 90 e 25 gradi, quest'ultimo che rappresenta l'angolo per il quale si ottiene il valore di gittata massima.

<b>angolo (°)</b>	0	45	90	<b>25</b>
<b>angolo <math>\pi</math></b>	6,28	0,785	1,57	0,4
<b>cos</b>	1,0	0,7	0,0	0,9
<b>sin</b>	0,0	0,7	1,0	0,4
<b>sin2<math>\theta</math></b>	0,0	1,0	0,0	0,8

<b><math>L_G</math>=</b>	<b>64,4</b>			
<b><math>N</math>=</b>	<b>11,6</b>			
<b><math>r_G</math>=</b>	<b>21,47</b>			
<b><math>H_{torre}</math>=</b>	<b>114</b>			
<b><math>Y_G</math>=</b>	-0,02	5,06	7,16	3,02
<b><math>Y_0</math>=</b>	113,98	5,06	121,16	117,02
<b><math>H_G</math>=</b>	113,98	119,06	121,16	117,02
<b><math>X_G</math>=</b>	21,47	15,19	0,02	19,46

<b><math>V_{og}</math>=</b>	26,06	26,06	26,06	26,06
<b><math>V_x</math>=</b>	26,06	18,44	0,02	23,62
<b><math>V_y</math>=</b>	-0,08	18,42	26,06	11,01

<b>Gittata <math>_{max}</math>=</b>	<b>125,4</b>	<b>131,8</b>	<b>0,2</b>	<b>114,9</b>
-------------------------------------	--------------	--------------	------------	--------------

<b>Distanza <math>_{totale}</math>=</b>	<b>211,3</b>	<b>211,4</b>	<b>64,6</b>	<b>228,8</b>
---	--------------	--------------	-------------	--------------

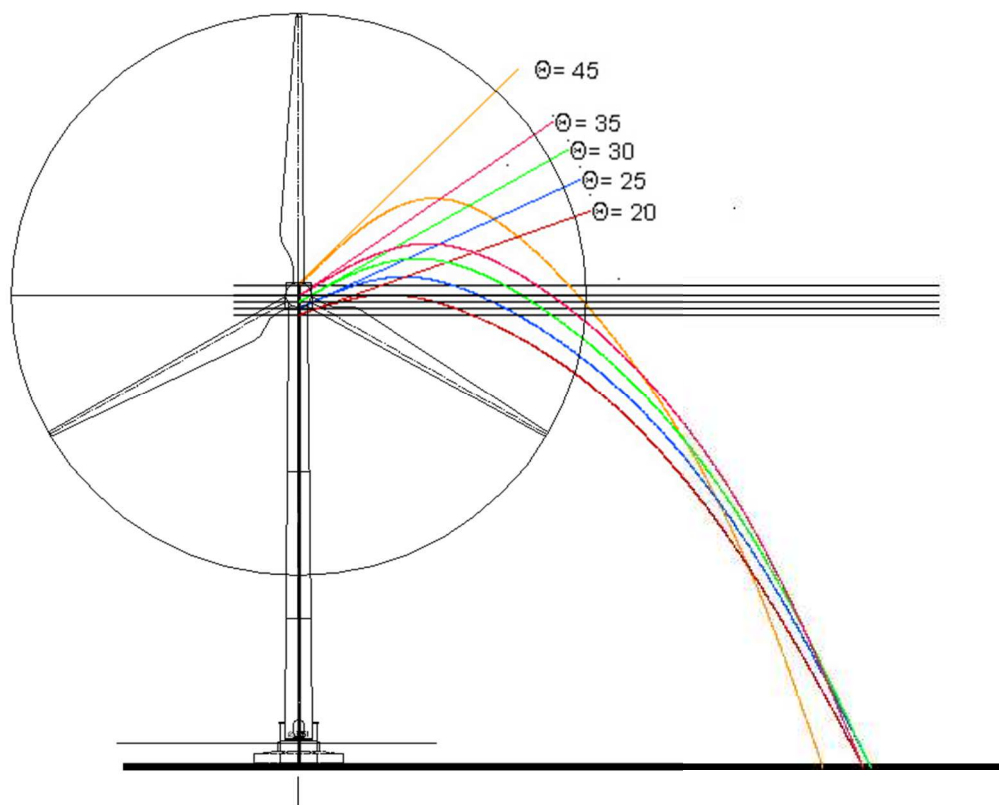


Figura 2 - Traiettoria di caduta in relazione all'angolo  $\theta$

In conclusione scegliendo il valore che rappresenta le condizioni più gravose ossia quello con un angolo di lancio  $\theta = 25$  e sommando la sua distanza orizzontale dal baricentro e la distanza del vertice della pala si ha **la distanza massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale è di circa 228,80 m.**

Si tenga presente che tale valore nella realtà risulta inferiore; difatti è giusto considerare agire simultaneamente le condizioni peggiori di velocità del vento, velocità di rotazione, azione di portanza sul profilo alare dopo il distacco ma le cause che porterebbero ad un eventuale distacco della pala o parte di essa sono rappresentate da un colpo di fulmine o da un urto accidentale di notevole intensità agente alla base della torre.

L'accadimento di tali fenomeni ha un valore di rischio molto basso, resi ancora più bassi dal fattore di contemporaneità. Si tenga conto che tutte le turbine eoliche sono dotate di un complesso sistema parafulmine, e per quanto riguarda l'urto non è pensabile potersi tutelare

da un incidente, quale un velivolo o altro, che impatta sul rotore di una turbina o alla base della torre.

È verificata la distanza minima di ogni aerogeneratore da ogni potenziale ricettore ai sensi del DM 10/09/2010 "Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati dalle Fonti Rinnovabili" pari a 200 m. La distanza degli aerogeneratori dalle abitazioni e dai fabbricati rurali sede di residenza ai sensi del PIEAR, risulta essere in ogni caso non inferiore ai 300 m, limite minimo fissato dal PIEAR, per la salvaguardia in caso di rottura accidentale degli organi rotanti.