

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA  
 LEGGE OBIETTIVO N. 443/01  
 LINEA A.V./A.C. TORINO – VENEZIA Tratta MILANO – VERONA  
 Lotto Funzionale Brescia-Verona  
 PROGETTO DEFINITIVO**

**SICUREZZA LINEA A.V./A.C. – AREA INTERCLUSA –  
 INFRASTRUTTURE STRADALI TIPOLOGIE DI PROTEZIONE:  
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA SIMULAZIONI NUMERICHE**

IL PROGETTISTA INTEGRATORE

IL PROGETTISTA

saipem spa  
Tommaso Taranta

saipem spa  
Tommaso Taranta

Dottore in Ingegneria Civile Iscritto all'Albo degli Ingegneri della Provincia di Milano al n. A23047/01 Sez. A Settori a) civile e ambientale b) in assistenza c) dell'informazione) civile e ambientale d) industriale e) dell'informazio

Dottore in Ingegneria Civile Iscritto all'Albo degli Ingegneri della Provincia di Milano al n. A23047/01 Sez. A Settori a) civile e ambientale b) in assistenza c) dell'informazione) civile e ambientale d) industriale e) dell'informazio

Tel. 02.52020517 Fax: 02.52020509 CF. e P.IVA: 0083708157

Tel. 02.52020517 Fax: 02.52020509 CF. e P.IVA: 0083708157

ALTA SORVEGLIANZA



Verificato	Data	Approvato	Data

COMMESSA    LOTTO    FASE    ENTE    TIPO DOC.    OPERA/DISCIPLINA    PROGR.    REV.

I	N	0	5	0	0	D	E	2	E	X	S	C	0	0	0	0	0	7	7	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

PROGETTAZIONE GENERAL CONTRACTOR									Autorizzato/Data
Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Consorzio <b>Cepav due</b> Project Director (Ing. F. Lombardi)  Data: _____
0	31.03.14	Emissione per CdS	M.T.	31.03.14	GHE.F.	31.03.14	LAZZARI	31.03.14	

SAIPEM S.p.a. COMM. 032121

Data: 31.03.14

File: 16077\_01.doc



Progetto cofinanziato dalla Unione Europea

CUP: F81H91000000008

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>SINTESI DELL'ATTIVITÀ .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>ANALISI BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>7</b>
4.1	MODELLI NUMERICI .....	7
4.2	CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI MEZZI.....	7
<b>FASE III: STUDIO DI POSSIBILI INTERVENTI DI PROTEZIONE DELLA LINEA A.V. IN PRESENZA DI INTERFERENZA .....</b>		
<b>5</b>	<b>I MODELLI DI SIMULAZIONE MESSI A PUNTO.....</b>	<b>9</b>
5.1	MODELLI BASATI SULL'ANALISI BALISTICA .....	9
5.2	MODELLO PER LO STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEL VEICOLO IN SVIO IN PRESENZA DI DUNE .....	12
5.2.1	<i>Descrizione del tracciato percorso dal mezzo in svio .....</i>	<i>12</i>
5.2.2	<i>Forza dovuta all'attraversamento di un fosso di guardia .....</i>	<i>13</i>
5.2.3	<i>Calcolo dello spazio di arresto.....</i>	<i>14</i>
5.3	DETERMINAZIONE DELLE CONDIZIONI D'IMPATTO SULLE OPERE DI PROTEZIONE .....	14
5.3.1	<i>Calcolo delle Energie d'impatto.....</i>	<i>14</i>
5.3.2	<i>Calcolo delle Forze d'impatto.....</i>	<i>16</i>
<b>6</b>	<b>LE SIMULAZIONI NUMERICHE IN PRESENZA DI PROTEZIONI .....</b>	<b>19</b>
6.1	DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI SIMULATE .....	19
6.2	SIMULAZIONI NELLA ZONA DI "STRETTO AFFIANCAMENTO" .....	20
6.2.1	<i>Configurazioni con muro a sostegno del rilevato autostradale e muro a sostegno del rilevato AV.....</i>	<i>20</i>
6.2.2	<i>Configurazioni con scarpata del rilevato autostradale e muro a sostegno del rilevato della AV.....</i>	<i>23</i>
6.2.3	<i>Configurazioni con scarpata del rilevato autostradale e muro in testa al rilevato della AV.....</i>	<i>23</i>
6.2.4	<i>Configurazioni con scarpata del rilevato autostradale e muro posto all'interno dell'AI.....</i>	<i>24</i>
6.3	SIMULAZIONI CON DUNE ALTE 3 M E SCARPATA CON PENDENZA A 60°.....	25
6.4	SIMULAZIONI CON DUNE ALTE 3 M E SCARPATA 2/3 .....	26
6.5	DETERMINAZIONE DELLE AZIONI SULLE OPERE DI PROTEZIONE .....	27
6.5.1	<i>Calcolo delle Energie di impatto e delle relative forze .....</i>	<i>27</i>
<b>7</b>	<b>CRITERI PER LA DEFINIZIONE DELLE PROTEZIONI.....</b>	<b>28</b>
7.1	PRINCIPI PER LA DEFINIZIONE DELLE DIVERSE AREE.....	28
7.2	DEFINIZIONE DEL TIPO DI PROTEZIONE RICHIESTA NELLA ZONA DI AFFIANCAMENTO.....	31
7.3	DEFINIZIONE DEL TIPO DI PROTEZIONE RICHIESTA NELLA ZONA DI STRETTO AFFIANCAMENTO .....	64
<b>8</b>	<b>CRITERI PER LA DEFINIZIONE DELLE ENERGIE E DELLE FORZE IN FUNZIONE DELLE CLASSI VEICOLARI.....</b>	<b>72</b>
8.1	PRINCIPI PER LA DEFINIZIONE DELLE ENERGIE.....	72
8.2	PRINCIPI PER LA DEFINIZIONE DELLE FORZE .....	72

**NB: TUTTI GLI ELABORATI DI RIFERIMENTO CITATI ALL'INTERNO DEL DOCUMENTO SONO DA INTENDERSI CON IL CODICE COMMESSA "IN05" IN LUOGO DI "A202"**

## 1 PREMESSA

Il presente rapporto riguarda lo studio delle condizioni di interferenza dovute all'affiancamento della linea AC Milano – Verona tra le progressive 28+630 e 131+120 con le autostrade A4, BRE-BE-MI, "ACP" (ex SP19) e con la Bretella di collegamento tra la BRE-BE.MI e la A4.

Le diverse autostrade che corrono in affiancamento alla linea AC si presentano come sostanzialmente distinte in quanto:

- La A4-Serenissima: è una autostrada in esercizio a tre corsie per senso di marcia;
- La BRE-BE-MI: è una autostrada in costruzione a due corsie per senso di marcia già predisposta per l'ampliamento a tre corsie;
- La "ACP": è una autostrada in parte in esercizio e in parte in progetto a due corsie che costituisce il potenziamento della attuale SP19;

Per quanto riguarda l'A4, ovvero l'autostrada esistente, si è ipotizzato di non affidare in alcun modo la protezione della linea AV alle barriere di sicurezza eventualmente presenti al margine della autostrada. La situazione si configura quindi come sostanzialmente analoga a quanto già analizzato nello studio relativo all'affiancamento tra la linea AV e l'autostrada A1 nel tratto Milano - Bologna (cfr. doc. "Sicurezza Linea AV - Area Interclusa - Autostrada A1 - Relazione Generale" cod. A10100VE1SDIA000002 del 01.02.2003), sebbene quest'ultimo fosse riferito ad una sezione autostradale a quattro corsie.

Nella definizione delle protezioni nelle zone di affiancamento con la A4 sono stati quindi considerati a favore di sicurezza, le soluzioni definite nel citato studio riferito alla A1.

Per quanto attiene le autostrade in progetto si è invece fatto riferimento alle indicazioni contenute nelle sezioni tipo che prevedono, nelle configurazioni in rilevato, la presenza di barriere da bordo laterale.

Queste ultime possono essere, ai sensi del vigente D.M. 2367 del 2004, di classe H2 o H3 e si è quindi ritenuto, cautelativamente, opportuno far riferimento alla classe H2 considerando l'effetto di contenimento delle stesse ai fini della definizione delle protezioni.

La presenza di barriere di classe non inferiore ad H2 consente il totale contenimento delle autovetture e l'analisi, per le sezioni in rilevato, sarà quindi limitata al solo studio del comportamento dei mezzi pesanti.

In questo rapporto saranno illustrate le analisi effettuate per valutare le situazioni in cui la distanza tra la linea AV e l'autostrada in affiancamento sia tale da avere interferenza e saranno proposte diverse soluzioni di protezione al variare della distanza tra i due rilevati e della altezza degli stessi (Fase III dello studio).

La metodologia adottata in questa fase dello studio, già in parte descritta nel Documento A20200DE2EXSC0000076 "Condizioni di interferenza: relazione illustrativa", fa riferimento alle condizioni di marcia su una sezione autostradale corrente. Tali indicazioni non si applicano quindi ai

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N. 01-IR-E-16077\_01

Progetto  
IN05

Lotto  
00

Codifica Documento  
DE2 E X SC 0000 077

Rev.  
0

Foglio  
4 di 74

tratti nei quali la linea AV si trovi in prossimità di rampe di svincolo; in questi casi specifici verranno condotte verifiche puntuali.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N. 01-IR-E-16077\_01

Progetto  
IN05

Lotto  
00

Codifica Documento  
DE2 E X SC 0000 077

Rev.  
0

Foglio  
5 di 74

## 2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- “Sicurezza Linea AV - Area Interclusa - Autostrada A1 - *Tipologie di protezione: Relazione illustrativa simulazioni numeriche*” (cod. A10100VE1SDIA000001 del 01.10.2002).
- Sicurezza linea A.V./A.C. – Area Interclusa – Infrastrutture Stradale - *Condizioni di interferenza: Relazione illustrativa* (Documento A20200DE2EXSC0000076).

### 3 SINTESI DELL'ATTIVITÀ

Lo studio dell'interferenza tra le diverse autostrade e la AV si articola complessivamente su tre fasi distinte:

- FASE I: analisi delle condizioni di incidentalità, di traffico e di circolazione sulle autostrade interferenti;
- FASE II: identificazione delle condizioni di potenziale interferenza tra le diverse autostrade e la linea A.V.;
- FASE III: studio di possibili interventi di protezione della linea A.V. in presenza di interferenza con tempi di ritorno non accettabili.

Il presente rapporto riguarda i risultati della FASE III dello studio.

Analizzate, nel Documento A20200DE2EXSC0000076, la Fase I e la Fase II, ovvero le condizioni di incidentalità, di traffico e di circolazione sulle diverse autostrade che corrono in affiancamento alla AV e identificate le condizioni di potenziale interferenza tra l'autostrada e la linea A.V., lo scopo della Fase III è quello di definire, mantenendo inalterate le distanze previste nel progetto, dei sistemi di protezione che evitino l'invasione di veicoli o parti di questi sulla sede ferroviaria.

Il procedimento proposto per l'individuazione delle protezioni più idonee in relazione alla distanza è illustrato nel capitolo 7.

Individuate le soluzioni a cui corrispondono tempi di ritorno ritenuti non accettabili si individuano due tipi di protezione:

Tipo 1: Protezione con muri.

Nel presente studio sono state considerate quattro diverse situazioni in cui la protezione è affidata a muri in c.a.:

- 1) muro di sostegno a supporto del rilevato autostradale e della AV;
- 2) muro di sostegno a supporto del rilevato della AV e scarpata del rilevato autostradale (di altezza Hs) con pendenza 2/3;
- 3) muro in testa al rilevato AV<sup>1</sup> con scarpata del rilevato autostradale (di altezza Hs) con pendenza 2/3 e scarpata del rilevato ferroviario (di altezza Hf);
- 4) muro posto all'interno dell'area interclusa con scarpata del rilevato autostradale (di altezza Hs) con pendenza 2/3 e scarpata del rilevato ferroviario (di altezza Hf).

Tipo 2: Protezione con dune.

Le protezioni con dune che sono state considerate nello studio sono di due tipi:

- 1) duna in terra di altezza pari a 3 m e pendenza delle scarpate 2/3;
- 2) duna invalicabile in terra rinforzata di altezza pari a 3 m con scarpate inclinate a 60°.

<sup>1</sup> Come si vedrà in seguito questa soluzione si applica solo se l'altezza del rilevato ferroviario è almeno pari ad 1.5 m.

## 4 ANALISI BIBLIOGRAFICA

### 4.1 Modelli numerici

Per l'analisi del comportamento dei mezzi nell'area interclusa tra autostrada e linea ferroviaria ad alta velocità si sono utilizzati i seguenti testi o articoli, in aggiunta a quelli già citati nel Documento A20200DE2EXSC0000076:

- Heinz Heisler, "Advanced vehicle technology", Oxford ristampa 2001, Butterworth-Heinemann;
- Thomas D.Gillespie, "Fundamentals of vehicle dynamics", Warrendale 1992, Society of automative engineers.

Questi testi illustrano i limiti di ribaltamento dal punto di vista statico e dinamico in funzione delle varie classi veicolari.

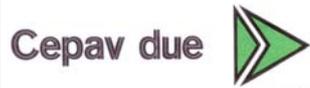
### 4.2 Caratteristiche meccaniche dei mezzi

- Giancarlo Genta, "Meccanica dell'autoveicolo", marzo 2000, Levrotto&Bella Torino;  
Questo testo contiene indicazioni relative alle traiettorie dopo l'urto, resistenze al rotolamento per il dimensionamento del letto d'arresto e indicazioni relative al comportamento dinamico del veicolo.
- Mario Poli, "Esercitazioni di Fisica 1", Bologna 1989, Pitagora Editrice Bologna.
- "A two-Dimensional Model of a falling vehicle", SAE Paper  
Sia il testo che l'articolo contengono indicazioni relative alla traiettoria di un corpo rigido che assegnata una velocità, perde contatto con il terreno e percorre una traiettoria parabolica.

I riferimenti sotto indicati contengono indicazioni circa la resistenza al rotolamento offerta dai diversi materiali. Sono stati analizzati nel corso dello studio sui letti d'arresto per la caratterizzazione delle resistenza al rotolamento dei materiali costituenti queste strutture di protezione.

- Massimo Losa "La prestazione frenante dei letti d'arresto mediante l'analisi dell'interazione tra ruota e terreno" in "Giornata di studio sul tema: La sicurezza intrinseca delle infrastrutture stradali", Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma 20-21 febbraio 1997
- Giancarlo Genta, "Meccanica dell'autoveicolo", marzo 2000, Levrotto&Bella Torino;
- AASHTO: "A policy on geometric design of highways and streets", 1994, American association of state highway and transportation officials
- Revue Générale des Routes et des Aerodromes, giugno 1983 n°598
- "Studio sulla distanza d'arresto in presenza di letti d'arresto "  
[www.coni.it/impianti/regolamenti/pdf/reg\\_fmi\\_moto.pdf](http://www.coni.it/impianti/regolamenti/pdf/reg_fmi_moto.pdf)

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N. 01-IR-E-16077\_01

Progetto  
IN05

Lotto  
00

Codifica Documento  
DE2 E X SC 0000 077

Rev.  
0

Foglio  
8 di 74

- “Studio sulla distanza d’arresto in presenza di letti d’arresto ”  
[www.coni.it/impianti/regolamenti/pdf/](http://www.coni.it/impianti/regolamenti/pdf/)
- “Coefficienti di resistenza al rotolamento al variare del materiale ”  
[www.geocities.com/mitogi/](http://www.geocities.com/mitogi/)
- “Coefficienti di resistenza al rotolamento al variare del materiale ”  
[www.teamtrajectoire.ch/team/](http://www.teamtrajectoire.ch/team/)

## FASE III: STUDIO DI POSSIBILI INTERVENTI DI PROTEZIONE DELLA LINEA A.V. IN PRESENZA DI INTERFERENZA

### 5 I MODELLI DI SIMULAZIONE MESSI A PUNTO

#### 5.1 Modelli basati sull'analisi balistica

Per la valutazione del comportamento di un veicolo o parte di esso in svio dall'autostrada è necessario determinare la velocità, l'angolo di svio e l'angolo con cui questo perde contatto con la sede stradale.

Se da un lato si può definire, sulla base dei dati illustrati in fase I, la distribuzione delle velocità di marcia per i diversi tipi di mezzi circolanti e la distribuzione dei mezzi nelle diverse corsie che compongono la carreggiata, non è possibile reperire dati circa il possibile angolo di svio, angolo di decollo e la velocità con cui il mezzo esce dalla sede stradale.

Tali parametri sono stati allora determinati mettendo a punto uno specifico modello per la valutazione delle condizioni di moto sia sulla piattaforma stradale che durante la perdita di contatto, basato sulle seguenti ipotesi:

- per il calcolo dell'angolo di svio e della velocità in cui il mezzo esce dalla sede stradale si fa riferimento alle ipotesi fatte nel Documento A20200DE2EXSC0000076 "Determinazione delle condizioni d'interferenza";
- per i valori dell'angolo di decollo, si stima di poter considerare a tutto vantaggio di sicurezza una pendenza trasversale della carreggiata nulla in virtù del fatto che, nel tratto autostradale considerato, c'è un'elevata prevalenza di rettifili in cui la pendenza della carreggiata è uguale a - 2.5%.

Il presente studio balistico si applica sia nel caso in cui, in stretto affiancamento, la sezione presenta un muro di sostegno in sostituzione della scarpata autostradale (Figura 1), sia in presenza di una scarpata con pendenza 2/3 (Figura 2 e Figura 3).

L'equazione del moto parabolico del veicolo o di parte di esso, approssimato come un punto materiale, che perde contatto con la sede stradale è definita come segue:

$$z = -x^2 \cdot \frac{g}{2 \cdot V^2 \cdot \cos^2 \vartheta} + x \cdot \operatorname{tg} \vartheta \quad \text{Eq. 1}$$

dove:

$g$  = accelerazione di gravità ( $\text{m/s}^2$ );

$V$  = velocità del veicolo ( $\text{m/s}$ );

$\vartheta$  = angolo di decollo del veicolo o parte di esso ( $^\circ$ ).

Secondo le ipotesi fatte  $\vartheta = 0$ , quindi l'equazione si riduce a:

$$z = -x^2 \cdot \frac{g}{2 \cdot V^2}$$

Eq. 2

Nel caso in cui sia presente una scarpata 2/3 occorre distinguere le due situazioni seguenti:

- 1) il veicolo perde contatto con la sede stradale e cade sulla scarpata (Figura 2);
- 2) il veicolo perde contatto con la sede stradale e cade oltre la scarpata (Figura 3).

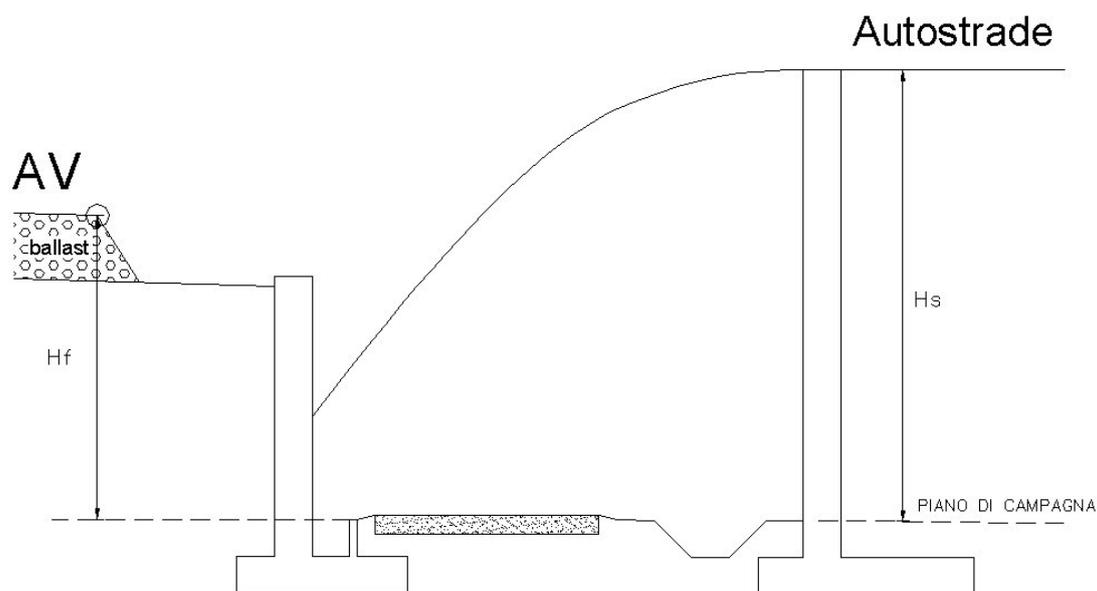


Figura 1: Caso di stretto affiancamento in cui il veicolo perde contatto con la sede stradale

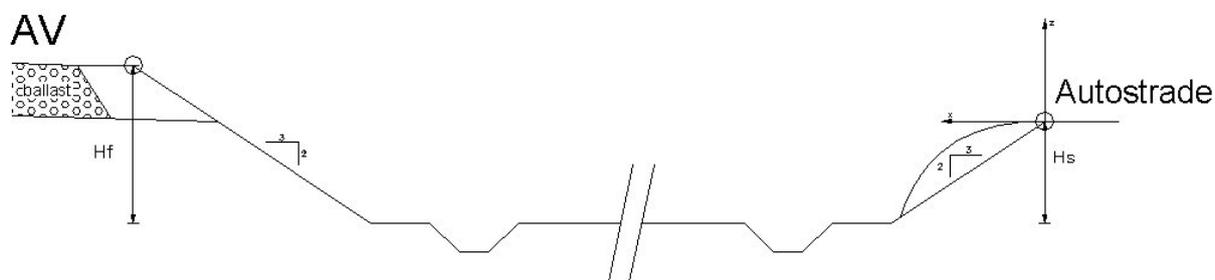


Figura 2: Caso con rilevato 2/3 in cui il veicolo perde contatto e cade sulla scarpata.

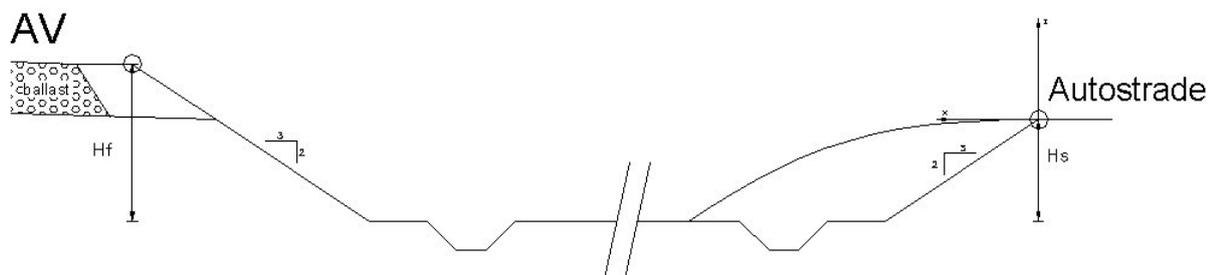


Figura 3: Caso con rilevato 2/3 in cui il veicolo perde contatto e cade oltre la scarpata.

Nel primo caso la distanza è la soluzione del seguente sistema:

$$\begin{cases} z = -x^2 \cdot \frac{g}{2 \cdot V^2} \\ z = -x \cdot \operatorname{tg} \alpha \end{cases} \quad \text{Eq. 3}$$

da cui:

$$d(\alpha) = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{2 \cdot g}{V^2} \cdot H}}{\frac{g}{V^2} \cos \alpha} \quad \text{Eq. 4}$$

dove:

H= è la quota del punto dove il veicolo perde contatto (origine del sistema di riferimento).

Nel secondo caso la distanza è la soluzione del seguente sistema:

$$\begin{cases} z = -x^2 \cdot \frac{g}{2 \cdot V^2} \\ z = -H \end{cases} \quad \text{Eq. 5}$$

da cui:

$$d(\alpha) = V \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (H_s + H)}{g}} \quad \text{Eq. 6}$$

dove:

$H_s$  = è l'altezza del rilevato stradale (il valore è negativo se risulta più bassa dell'altezza in cui il punto perde contatto).

## 5.2 Modello per lo studio del comportamento del veicolo in svio in presenza di dune

### 5.2.1 Descrizione del tracciato percorso dal mezzo in svio

Il modello del tracciato, già descritto nel Documento A20200DE2EXSC0000076, è stato modificato per studiare l'effetto di una duna interposta tra i rilevati stradale e ferroviario.

La sezione tipo dell'area interclusa è stata dunque modificata, secondo lo schema riportato in Figura 4.

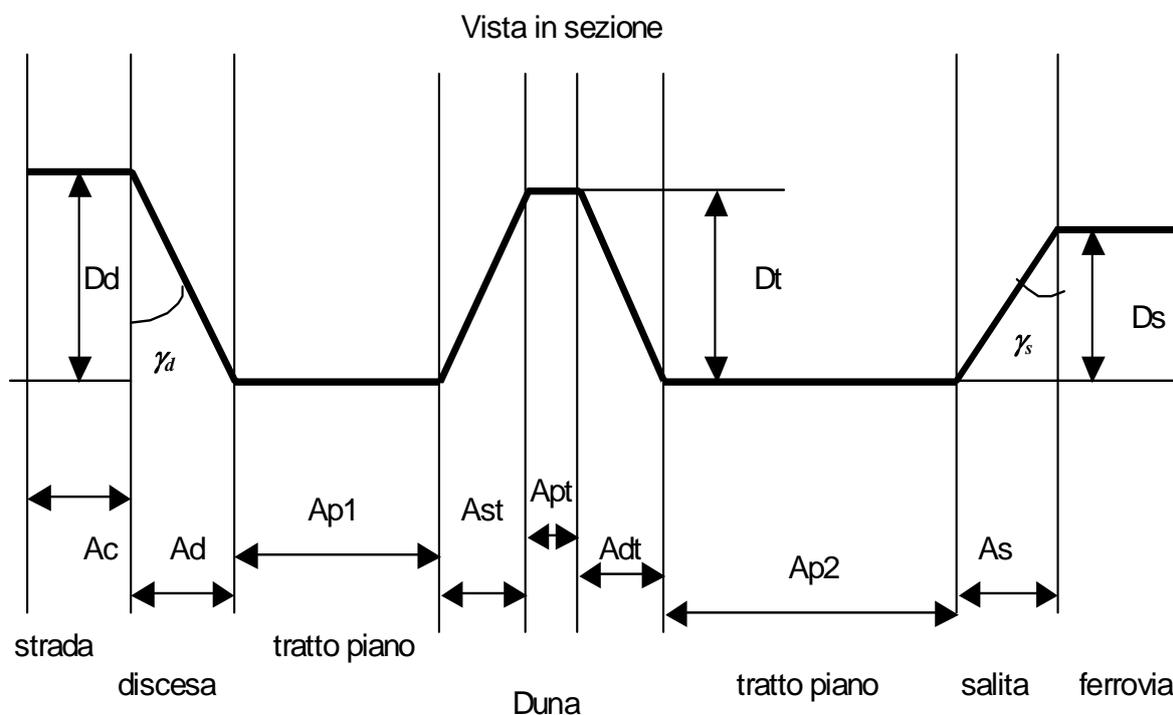


Figura 4: schematizzazione della sezione trasversale dell'area interclusa

Le variabili necessarie per descrivere la sezione vengono dunque così modificate:

- Descrizione dei rilevati ferroviario e stradale

$A_c$  = Larghezza carreggiata;

$D_d$  = Dislivello rampa in discesa (lato strada);

$D_s$  = Dislivello rampa in salita (lato ferrovia).

Le pendenze delle scarpate sia lato autostrada, sia lato ferrovia sono fissate a  $2/3$ , quindi i valori dell'ampiezza in pianta delle due rampe sono forniti da:

$A_d = D_d/2*3$  = Ampiezza (in pianta) della rampa in discesa lato autostrada;

$A_s = D_s/2*3$  = Ampiezza (in pianta) della rampa in salita lato ferrovia.

- Descrizione della zona interclusa e della duna

$A_{p1}$  = ampiezza del piano prima della duna  
 $A_{st}$  = ampiezza della salita della duna  
 $A_{pt}$  = ampiezza del piano della duna  
 $A_{dt}$  = ampiezza della discesa della duna;  
 $A_{p2}$  = ampiezza del piano dopo la duna;  
 $D_t$  = altezza della duna;

Si osserva che, a differenza del modello di tracciato sviluppato per il calcolo della distanza di interferenza, dove le pendenze delle scarpate erano costanti e fissate al valore di  $2/3$ , per poter studiare l'effetto di dune di diverse tipologie, è stato necessario introdurre come variabili le ampiezze in pianta dei tratti in salita e in discesa della duna, in modo da poter modellare pendenze diverse nei due tratti.

Come nel caso del modello di tracciato originario si suppone che quando il veicolo esce di strada possieda una velocità  $v$  ed un angolo di svio  $\alpha$  rispetto all'asse longitudinale dell'autostrada, come schematizzato nella Figura 5.

Il comportamento del veicolo nei tratti di discesa, piano o salita, sia relativi alla duna, che relativi ai rilevati, sono gestiti in maniera differente, secondo modalità del tutto identiche a quelle già esposte nel Documento A20200DE2EXSC0000076.

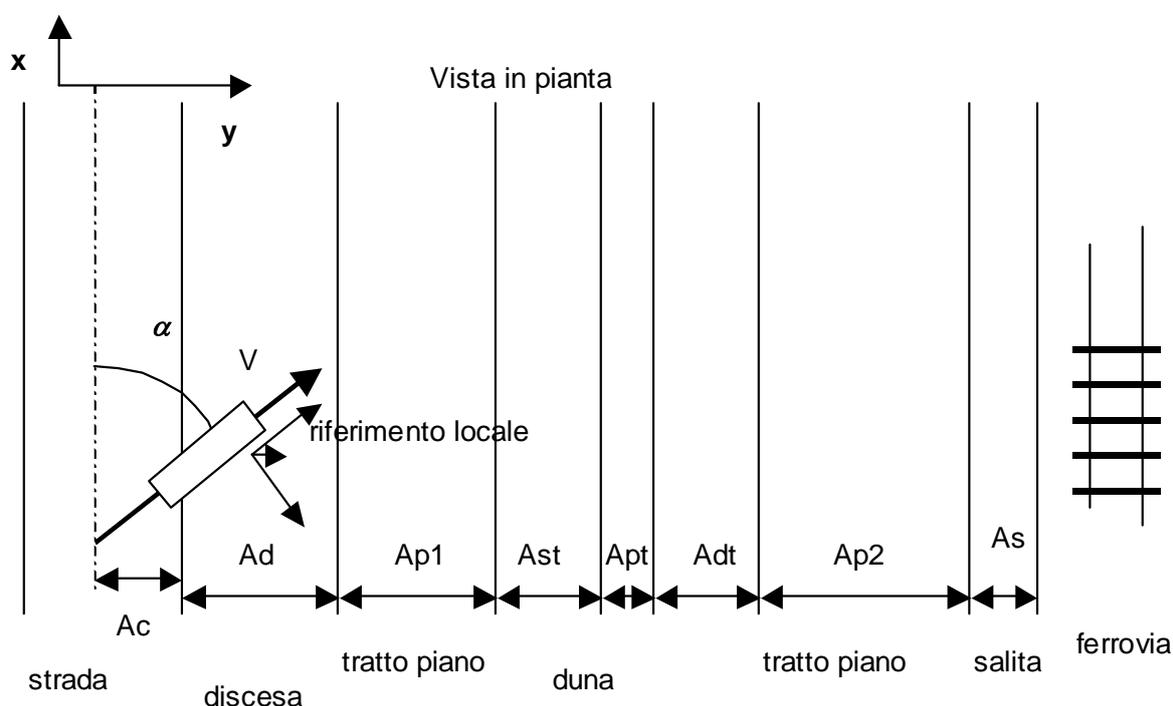


Figura 5: schematizzazione in pianta dell'area interclusa.

### 5.2.2 Forza dovuta all'attraversamento di un fosso di guardia

La forza impulsiva che approssima l'effetto dell'attraversamento di un fosso di guardia è calcolata, come già evidenziato nel Documento A20200DE2EXSC0000076, in funzione della geometria del fosso stesso e della ruota del veicolo che si trova ad attraversarlo.

Nel modello di tracciato in esame sono presenti quattro fossi di guardia, due dei quali relativi ai rilevati e due relativi alla duna, che hanno tra di loro dimensioni diverse; per questo motivo sono state introdotte nel programma due diverse subroutines per il calcolo del modulo di tale forza in funzione del tipo di fosso attraversato.

Il modello del tracciato appena descritto è stato dunque interfacciato coi i tre modelli di veicolo, autovettura, camion e camion con rimorchio, già realizzati senza l'introduzione di ulteriori modifiche.

### 5.2.3 *Calcolo dello spazio di arresto*

Anche nel caso di area interclusa con duna intermedia, uno degli obiettivi del modello di simulazione è stato quello di calcolare lo spazio di arresto di un veicolo che esce di strada in funzione della tipologia di sezione della zona interclusa, oltre che delle variabili cinematiche del veicolo.

Ancora una volta il programma è stato modificato per poter calcolare lo spazio di arresto del veicolo in esame al variare della lunghezza del primo tratto piano (Ap1).

Il modello realizzato è stato utilizzato come "core" di un programma che calcola per via iterativa lo spazio di arresto secondo la seguente procedura:

- 1) Si fornisce al programma (oltre a tutti gli altri dati necessari) una lunghezza iniziale per il tratto piano tra il rilevato stradale e la salita della duna intermedia.
- 2) Con la sezione così definita il programma esegue una simulazione durante la quale il veicolo può superare la duna e raggiungere il rilevato ferroviario.
- 3) Se la velocità del veicolo alla fine della simulazione è diversa da zero e se la direzione della traiettoria non è parallela all'asse stradale la lunghezza del tratto piano viene incrementata di 1 metro.
- 4) Il programma esegue una nuova simulazione con la sezione modificata.
- 5) Si ripetono i punti 3 e 4 finché una delle due condizioni al punto 3 non è verificata
- 6) Il programma termina con la scrittura su file dello spazio d'arresto.

## 5.3 **Determinazione delle condizioni d'impatto sulle opere di protezione**

### 5.3.1 *Calcolo delle Energie d'impatto*

Il valore dell'energia di impatto dipende dalla velocità, dalla massa e dall'angolo di svio.

In funzione di intervalli temporali fissati, il modello utilizzato per le simulazioni fornisce puntualmente i valori di velocità e angolo associati al moto del veicolo. A titolo d'esempio si riportano in Figura 6 e Figura 7 gli andamenti della velocità e dell'angolo di svio per un dato mezzo pesante, con una velocità di svio e per una data altezza del rilevato stradale (nell'esempio fissata in 4.00 m).

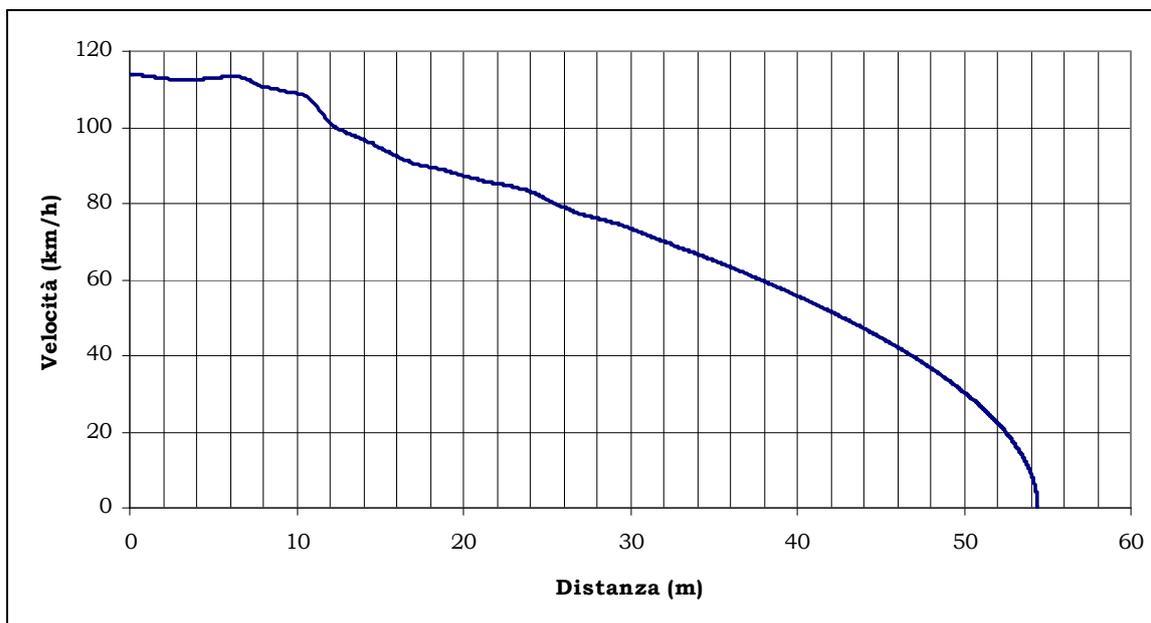


Figura 6: Esempio di andamento della velocità in funzione della distanza

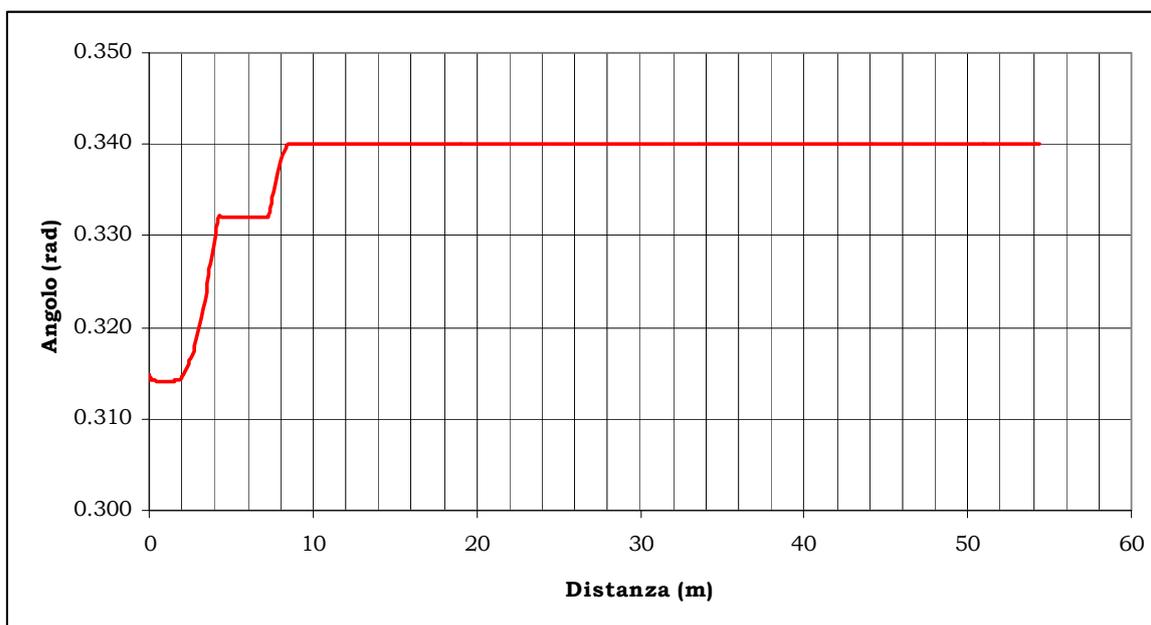


Figura 7: Esempio di andamento dell'angolo di svio in funzione della distanza.

L'energia è calcolata tramite la seguente espressione:

$$E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V \cdot \text{sen} \gamma)^2$$

dove:

M= massa in tonnellate;

V = velocità del mezzo in m/s;

$\gamma$  = angolo di svio.

In virtù del particolare comportamento cinematico degli autotreni in cui si hanno due urti distinti ed in successione, l'energia d'impatto viene calcolata considerando l'elemento più critico. Nel caso specifico per le tipologie C5 e C6 la distribuzione delle masse assunta nello studio è la seguente:

Tipologia di veicolo	Massa Motrice (T)	Massa Rimorchio (T)
C5	13	13
C6	16	22

Mentre per la categoria C5 è indifferente l'elemento che si considera più critico, per la categoria C6 questo è il rimorchio, in quanto dotato di una massa maggiore.

I valori di  $V$  e  $\gamma$  devono essere desunti dai risultati dalle simulazioni numeriche.

### 5.3.2 Calcolo delle Forze d'impatto

Nota la velocità e l'angolo rispetto all'asse longitudinale dell'AI, quali ad esempio quelli visti in Figura 6 ed in Figura 7, è possibile determinare la forza massima e la media agente sulla testa dell'opera di protezione mediante la formulazione proposta da Hirsch. La procedura proposta è sinteticamente illustrata nel seguito.

A partire dall'accelerazione media durante l'urto

$$A_{VG} G_{lat} = \frac{V_I^2 \cdot \sin^2 \vartheta}{2 \cdot g \{AL \cdot \sin \vartheta - B[1 - \cos \vartheta] + D\}} \quad \text{Eq. 7}$$

il valore massimo è stimato in:

$$\max G_{lat} = \frac{\pi}{2} \cdot (A_{VG} G_{lat}) \quad \text{Eq. 8}$$

A partire dall'accelerazione laterale si può definire la forza laterale media:

$$\text{avg} F_{lat} = (A_{VG} G_{lat}) \cdot P_I \quad \text{Eq. 9}$$

e la massima:

$$\max F_{lat} = \frac{\pi}{2} (\text{avg} F_{lat}) \quad \text{Eq. 10}$$

Nelle equazioni sopra si è adottata la seguente simbologia:

$V_I$  = velocità d'impatto del veicolo (m/s);

$\vartheta$  = angolo d'impatto del veicolo (rad);

$g$  = accelerazione di gravità ( $m/s^2$ );

$AL$  = distanza dal frontale del veicolo al centro di massa (m);

B= Larghezza carreggiata del veicolo (m);  
 D= spostamento laterale della barriera (m). Nel caso di barriere rigide è uguale a zero;  
 P<sub>1</sub>= peso del corpo impattante (kN).

Queste equazioni sono funzione:

- 1) tipo di barriera, rigida o flessibile;
- 2) dimensioni del veicolo;
- 3) posizione del centro di massa del veicolo;
- 4) velocità d'impatto del veicolo;
- 5) angolo d'impatto del veicolo.

Si noti però che lo stesso Hirsch evidenzia come i risultati da lui prodotti si pongano al di sotto dei valori trovati da altri autori. Riferendosi agli studi di Bloom e di Buth, che portano a risultati confrontabili tra di loro, si è osservato che tra i valori di forza ottenuti da questi ultimi e quelli ottenibili con il modello di Hirsch, al variare della massa del mezzo, esisteva una relazione sostanzialmente lineare.

Per stimare i valori di forza che si avrebbero congruentemente con gli studi di Bloom e Buth si è quindi partiti da quelli di Hirsch modificandoli secondo una relazione dipendente dalla massa come segue:

$$\frac{F_{\text{Bloom/Buth}}}{F_{\text{Hirsch}}} = \frac{0.034 \cdot m + 55.013}{0.0169 \cdot m + 98.391} \quad \text{Eq. 11}$$

dove:

m= massa del veicolo in tonnellate.

Per ciascun istante di una data simulazione è quindi possibile stimare, a partire dalla velocità e dall'angolo di svio, la forza applicata su un eventuale ostacolo, secondo i due approcci (Hirsch e Bloom/Buth). A titolo d'esempio si riportano in Figura 8 gli andamenti della forza massima per le medesime condizioni esemplificate in Figura 6 ed in Figura 7, rappresentati per comodità al variare della distanza in retto tra il ciglio del rilevato autostradale e l'ostacolo rigido contro cui il mezzo impatta.

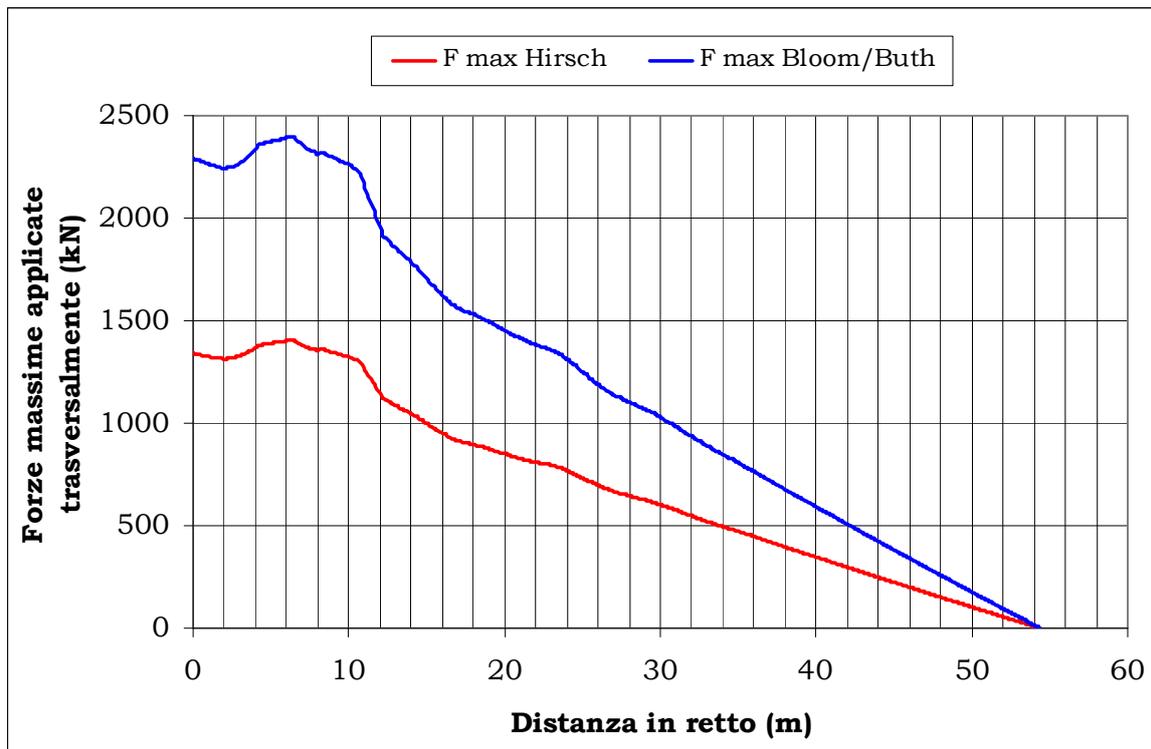


Figura 8: Andamento della forza massima calcolata secondo i metodi di Hirsch e Bloom/Buth

## 6 LE SIMULAZIONI NUMERICHE IN PRESENZA DI PROTEZIONI

### 6.1 Descrizione delle condizioni simulate

Per studiare le condizioni dove vi è potenziale interferenza tra le diverse autostrade e la linea A.C./A.V. e definire le protezioni più idonee, si è proceduto secondo il seguente criterio:

- a sono state in primo luogo valutate le condizioni di vincolo geometrico per l'inserimento dei diversi tipi di protezione (cfr. Tabella 1);
- b per le configurazioni geometriche nelle quali lo spazio a disposizione è tale da richiedere la realizzazione di un muro di sostegno a contenimento di entrambi i rilevati (quello della linea AV e quello autostradale), si è condotta la verifica con il modello "balistico". Si è così definita l'altezza minima del muro al margine della linea AV tale da non avere invasione della linea da parte di un mezzo in svio o di parte di esso;
- c per le configurazioni nelle quali lo spazio nell'Area Interclusa è sufficiente a realizzare anche la scarpata del rilevato della linea AV ma non per realizzare una duna come elemento di protezione, sono state valutate due distinte protezioni:
  - d.1. la realizzazione di un muro in testa al rilevato ferroviario;  
Per questo caso sono state effettuate valutazioni di tipo geometrico in relazione alla pendenza, all'altezza della scarpata del rilevato AV e alle caratteristiche geometriche dei mezzi analizzati.
  - d.2. la realizzazione di un muro all'interno dell'area interclusa.  
Per questo caso è stata condotta anche un'analisi con il modello balistico per valutare l'effetto del possibile svio del carico trasportato su un autotreno al momento dell'urto contro il muro, qualora questo abbia una altezza inferiore a 4 m ovvero a 3 m ma con opportuna sagomatura;
- e nelle configurazioni tali da consentire l'inserimento di una "duna stretta" con altezza di 3 m e pendenza delle scarpate di 60°) sono state verificate le condizioni di stabilità di un possibile mezzo in svio che impatta contro la duna per verificarne le condizioni di invalicabilità;
- f per le configurazioni geometriche dell'Area Interclusa sufficientemente ampie da consentire l'inserimento di una duna di altezza pari a 3 m ma con pendenza delle scarpate di 2/3 è stato simulato il comportamento di un mezzo in svio, con una resistenza a rotolamento di 0.25 costante su tutta la sezione considerando la possibile presenza di fossi al piede delle scarpate il tempo di ritorno complessivo è stato fissato in 100 anni. Questa parte dello studio è atta a verificare l'efficacia dell'inserimento della duna per la protezione della linea AV;
- g nelle configurazioni per le quali la distanza tra la linea AV e l'autostrada è sufficiente per l'inserimento di una duna con pendenza 2/3, ma non protegge dall'invasione della linea AV da parte di un mezzo in svio, si è previsto l'inserimento di una duna stretta con pendenza delle scarpate pari a 60°.

Per la valutazione delle azioni sulle opere di protezione sono state considerate, cautelativamente, le condizioni di impatto definite nello studio di affiancamento tra la linea AV e la Autostrada A1 (cfr. doc. "Sicurezza Linea AV - Area Interclusa - Autostrada A1 - Tipologie di protezione: Relazione illustrativa simulazioni numeriche" - cod. A10100VE1SDIA000001). Sono state così definite le azioni massime prevedibili (espresse in termini di energie d'urto e di forze applicate alle opere) al variare della altezza del rilevato autostradale e della distanza tra l'opera di protezione ed il limite superiore del rilevato stesso.

TIPO DI PROTEZIONE	CONFIGURAZIONE GEOMETRICA MINIMA
Inserimento di muri di sostegno in cemento armato (zona di stretto affiancamento)	$6.60^2 \leq L_p < (20.10 \text{ m} + 3/2 \cdot H_f + 3/2 \cdot H_s)$
Inserimento di una duna "stretta" di altezza pari a 3 m e con pendenza delle scarpate di 60°.	$L_p \geq (20.10 \text{ m} + 3/2 \cdot H_f + 3/2 \cdot H_s)$
Inserimento di una duna di altezza pari a 3 m e con pendenza delle scarpate 2/3.	$L_p \geq (28.90 \text{ m} + 3/2 \cdot H_f + 3/2 \cdot H_s)$

Tabella 1: condizioni di vincolo geometrico per l'inserimento delle diverse opere di protezione

## 6.2 Simulazioni nella zona di "stretto affiancamento"

### 6.2.1 Configurazioni con muro a sostegno del rilevato autostradale e muro a sostegno del rilevato AV

Come visto in premessa lo studio è stato effettuato distinguendo:

- l'autostrada A4 (esistente) dove sono stati adottati gli standard di protezione definiti nello studio dell'affiancamento A1/AV, basati sull'ipotesi di assenza di barriere a bordo autostrada;
- le autostrade in progetto dove si è considerata la presenza di barriere di protezione a bordo autostradale e la specifica configurazione infrastrutturale delle diverse autostrade.

Nell'analisi si è tenuto conto del fatto che un mezzo pesante in svio, schematizzato come un parallelepipedo di larghezza pari a 2.2 m e di altezza 4 m con una posizione del baricentro di 1.9 m rispetto al piano viario, percorre una traiettoria parabolica rappresentata in Figura 9. L'altezza del muro ferroviario di protezione deve essere quindi incrementata di due metri in virtù del fatto che la parabola rappresenta il moto del baricentro, ma non essendo il veicolo un punto materiale ma bensì un corpo rigido, parte del carico si troverà ad un'altezza maggiore.

<sup>2</sup> salvo eventuali situazioni locali da valutare caso per caso con W comunque maggiore di 4.70m

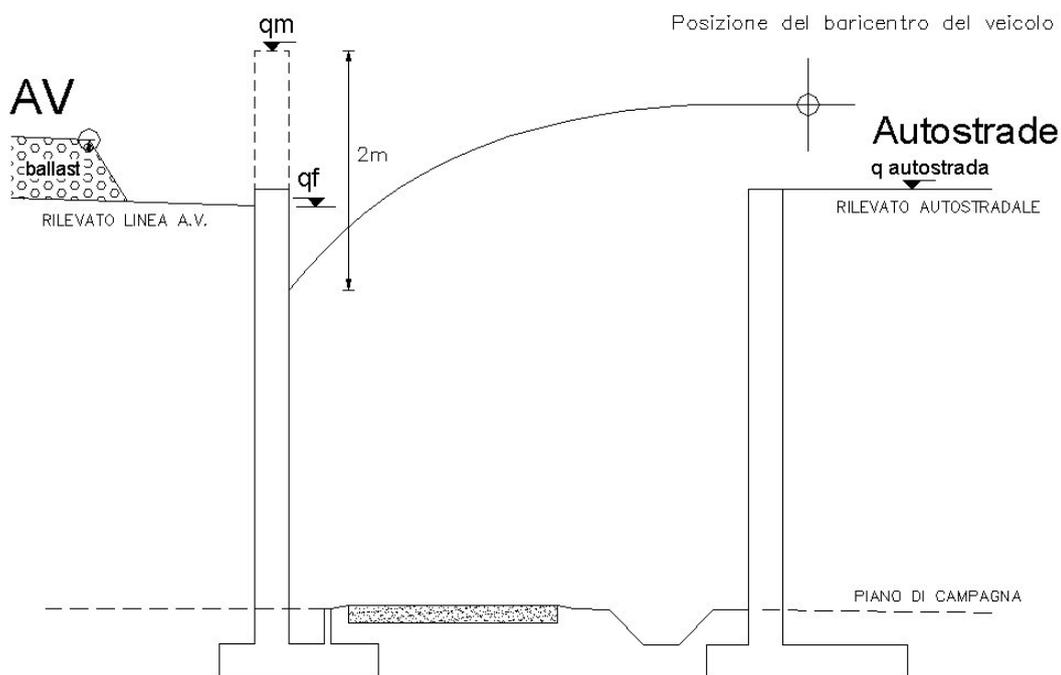


Figura 9: schematizzazione della configurazione con muri a sostegno del rilevato autostradale e del rilevato AV.

Per l'analisi delle condizioni di svio in presenza di muri su entrambi i rilevati (autostradale e ferroviario) nel caso di infrastrutture in progetto si è fatto cautelativamente riferimento allo svio di un autoarticolato di tipo C6, dalla corsia più lontana dal margine e con la velocità corrispondente al 99.97-esimo percentile (cfr. documento A20200DE2EXSC0000076).

Sotto queste ipotesi è stato possibile definire i diagrammi di Figura 10 e di Figura 11, validi rispettivamente per la BRE-BE-MI e per le due autostrade a due corsie (ACP e BRETELLA) da cui si deduce l'altezza minima del muro a bordo AV rispetto alla quota del ciglio autostradale.

Per comodità di lettura in figura 12 è riportato il diagramma da utilizzare per la A4 tratto dallo studio di affiancamento tra la linea AV e la Autostrada A1 (cfr. doc. "Sicurezza Linea AV - Area Interclusa - Autostrada A1 - Tipologie di protezione: Relazione illustrativa simulazioni numeriche" - cod. A10100VE1SDIA000001).

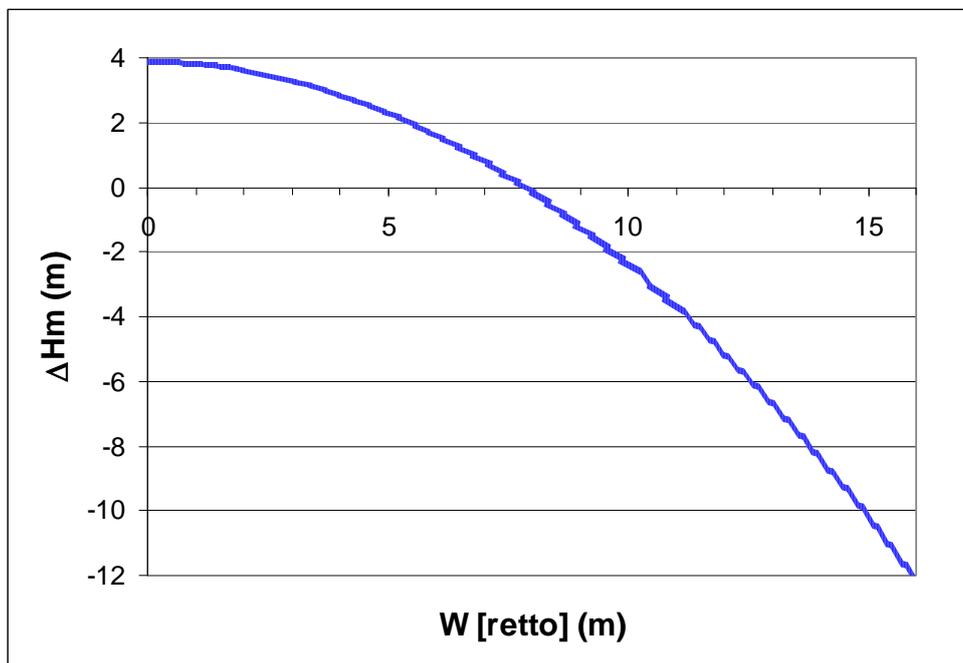


Figura 10: definizione delle altezze minime dei muri di sostegno dei rilevati ferroviari per la protezione della linea AV - BRE - BE - MI.

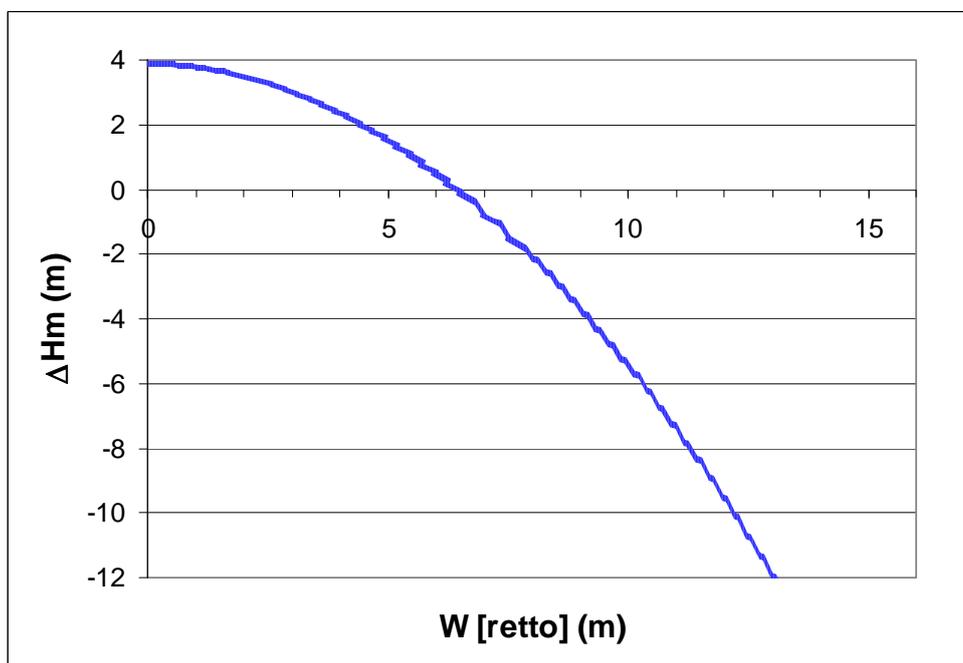


Figura 11: definizione delle altezze minime dei muri di sostegno dei rilevati ferroviari per la protezione della linea ACP e BRETILLA.

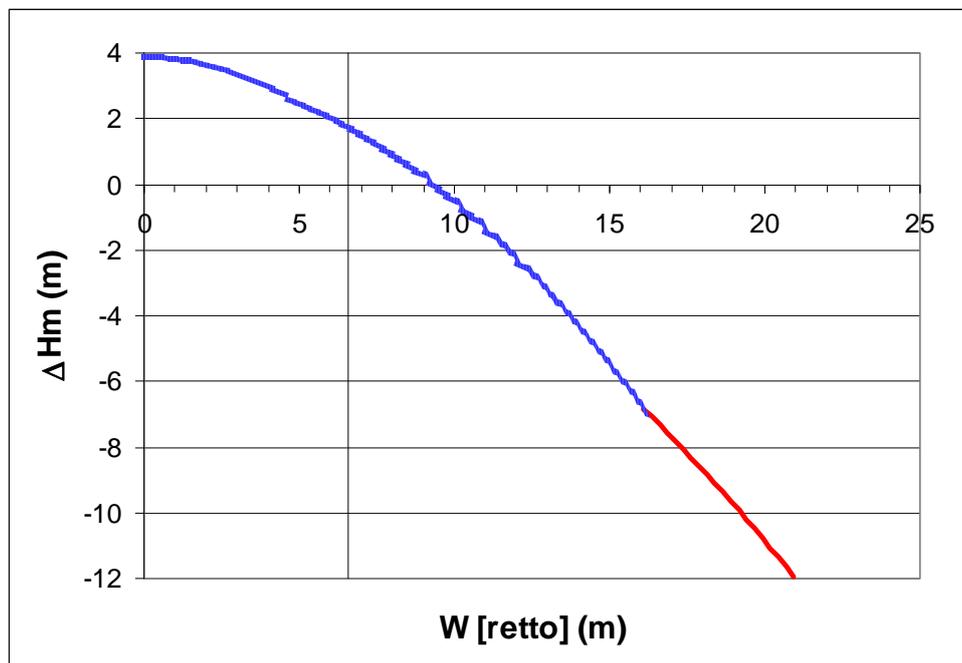


Figura 12: definizione delle altezze minime dei muri di sostegno dei rilevati ferroviari per la protezione della linea AV - A4.

### 6.2.2 Configurazioni con scarpata del rilevato autostradale e muro a sostegno del rilevato della AV

Quando si è in presenza di una interferenza ma la distanza tra la linea AV e l'autostrada è sufficiente per l'inserimento della scarpata del rilevato autostradale, il meccanismo di svio degli autoveicoli è costituito da un primo moto tendenzialmente a contatto con il terreno lungo la scarpata della autostradale (salvo il primo tratto durante il quale il veicolo si può anche staccare) e nell'area interclusa e da un successivo urto rigido contro il muro di sostegno del rilevato AV.

Dovendosi considerare la possibilità che sul muro possa impattare un mezzo pesante, è richiesto ancora che la protezione arrivi ad una quota di circa 2 m superiore all'altezza del baricentro. Essendo quest'ultimo ipotizzato ad una quota pari a 1.9 m, rispetto al piano campagna, l'altezza del muro è stata fissata in 4 m.

### 6.2.3 Configurazioni con scarpata del rilevato autostradale e muro in testa al rilevato della AV

Quando la distanza  $L_p$  è sufficiente per la realizzazione delle scarpate dei due rilevati (autostrada ed AV) ma non per l'inserimento di una duna invalicabile con pendenza delle scarpate di  $60^\circ$  all'interno dell'area interclusa, è possibile prevedere la realizzazione di un muro in c.a. in sommità al rilevato AV.

Per quanto visto nel paragrafo precedente anche in questo caso i mezzi pesanti impattano contro il muro che dovrà quindi, in generale, essere ancora alto 4 m.

Si può però osservare che, se il rilevato è sufficientemente alto da far sì che il veicolo si trovi interamente sulla scarpata, il baricentro del mezzo si abbassa di una quantità pari a circa 1 m rispetto al

piano di appoggio del muro, posto all'altezza della testa del rilevato (considerando la situazione limite di mezzo parallelo al muro, su una scarpata con pendenza 2/3 ed una larghezza del mezzo pari a 2.50 m). In questo caso il muro in testa può avere una altezza di 3 m, calcolata ancora rispetto alla testa del rilevato.

Si noti che questa condizione si può avere solo nel caso in cui l'altezza della scarpata sia tale da consentire la totale inclinazione del mezzo ovvero quando entrambe le ruote si trovano sulla scarpata. Nelle condizioni viste sopra questo si ha per altezze del rilevato ferroviario non inferiori ad 1.50 m. Per  $H_f < 1.5$  m dovrà quindi essere mantenuta la soluzione con muro con altezza pari a 4 m dal piano campagna senza realizzare la scarpata ovvero potrà essere realizzato il muro in testa al rilevato AV ma di altezza ancora pari a 4 m.

#### **6.2.4 Configurazioni con scarpata del rilevato autostradale e muro posto all'interno dell'AI**

In alternativa alla soluzione vista nel paragrafo 6.2.3, qualora lo spazio nella AI lo consenta, potrà essere realizzato un muro in c.a. all'interno dell'area interclusa posto ad una distanza non inferiore a 6.9 m rispetto al piede del rilevato autostradale.

La distanza minima di 6.9 m dalla autostrada è stata imposta considerando il fatto che, come visto nella Figura 3, nella prima fase dopo lo svio il mezzo può perdere contatto con la scarpata e potrebbe quindi "saltare" il muro posto al piede della stessa.

Nella situazione considerata, il muro posto all'interno dell'AI ha la funzione di contenere il mezzo in svio ed il suo carico (che potrebbe sganciarsi durante l'urto). La sua altezza dovrà quindi essere pari a 4 m.

La medesima funzione di totale contenimento potrà essere ottenuta con un muro di altezza pari a 3 m a condizione che la porzione di muro che va da terra ad una altezza di 2 m sia configurata con un angolo di scarpa di 60°.

Nel caso in cui non dovesse essere possibile realizzare il muro a totale contenimento all'interno dell'AI, si può separare la funzione di contenimento del veicolo in svio da quella di contenimento del suo carico. Per far ciò occorre che tra il muro e la linea AV ci sia uno spazio sufficiente per consentire al carico, una volta sganciatosi dal mezzo, di cadere all'interno di tale spazio. Il muro, in quest'ultimo caso, potrà essere realizzato di una altezza pari a 1.9 m. Visto che la distanza minima tra il muro e la linea AV è, per questioni geometriche, pari a 6 m, le verifiche sono state condotte considerando tale valore come dato di input per il calcolo.

Dallo schema di Figura 13 (che si riferisce ad un autotreno tipo C6 che urta con una configurazione di velocità ed angolo di svio pari alla massima prevista a bordo autostrada nello studio dell'affiancamento A1/AV) si nota che il carico urta contro il terreno in prossimità del rilevato ferroviario ma dovrebbe essere contenuto dal corpo del rilevato stesso. L'analisi della Figura 13 evidenzia come il carico che cade, la cui forma non è nota a priori, può compiere, dopo l'urto con il terreno, successivi rotolamenti che, nel caso in cui il piano del ferro sia prossimo al piano campagna, possono portare ad una invasione della linea AV.

Si ritiene quindi che questa soluzione possa essere adottata solo in presenza di rilevati ferroviari di altezza non inferiore ad 1.5 m. In mancanza di tale requisito il muro nell'area interclusa dovrà

garantire il totale contenimento del mezzo in svio. Nel caso in cui, per altri motivi, questo non dovesse risultare possibile, potrà essere considerata una protezione realizzata con un muro posto all'interno dell'AI di altezza pari ad 1.90 m ed una opportuna protezione al piede del rilevato AV (muro con  $h=1.5$  m).

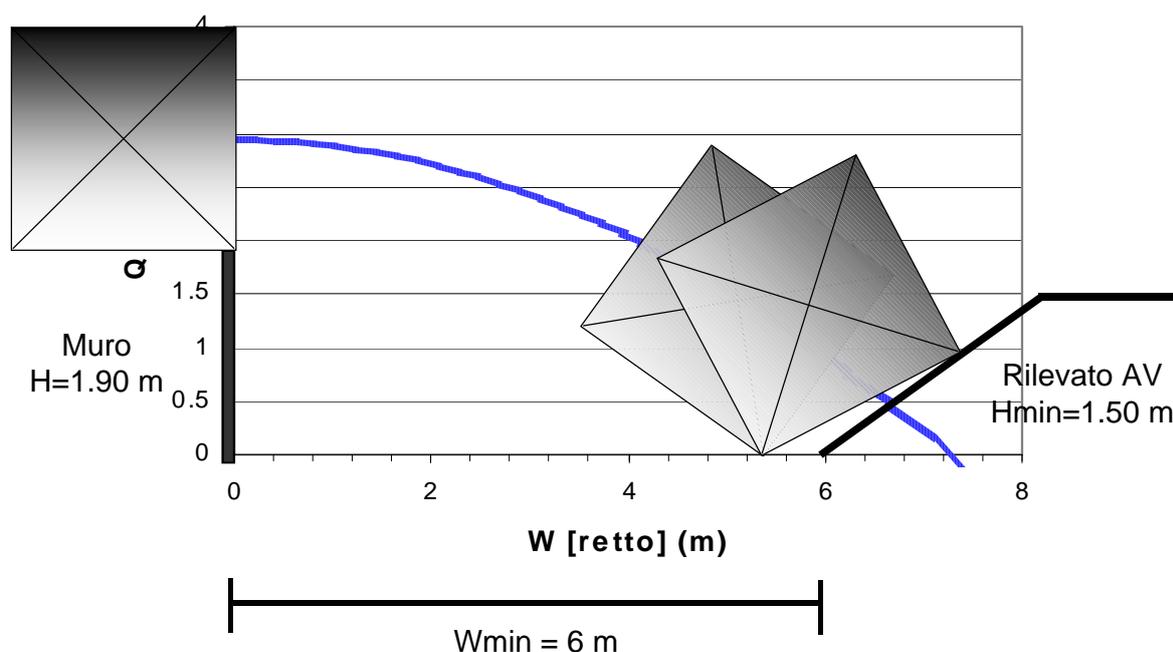


Figura 13: Meccanismo di caduta del carico di un autotreno che impatta contro un muro nell'AI.

### 6.3 Simulazioni con dune alte 3 m e scarpata con pendenza a $60^\circ$

Le protezioni realizzate da dune strette con scarpata di pendenza pari  $60^\circ$  è schematicamente rappresentata in Figura 14. Questa tipologia di protezione si presenta di fatto come un elemento invalicabile tanto per le autovetture quanto per i mezzi pesanti..

La verifica dell'invalicabilità è stata condotta confrontando l'accelerazione trasversale indotta dalla pendenza della scarpata con il limite di rollio che porta al ribaltamento del mezzo.

Per una scarpata con pendenza di  $60^\circ$  si ottiene la seguente accelerazione trasversale

$$a_y = \tan(60^\circ) \cdot g = 1.7 \text{ g}$$

da confrontare con i limiti di ribaltamento statici e dinamici dei mezzi leggeri e dei mezzi pesanti ovvero:

	$a_y$ ribaltamento statico	$a_y$ ribaltamento dinamico
Mezzi leggeri	1.2 g -1.7 g (auto sportive) 1.2 g -1.6 g (berline)	0.8 g -1.1 g
Mezzi pesanti	0.6 g - 0.8 g (autocarri medi) 0.4 g - 0.6 g (autocarri pesanti)	0.2 g - 0.3 g

Appare immediato osservare che in tutte le possibili condizioni, il mezzo supera i valori di limite al ribaltamento quando si consideri il ribaltamento dinamico. Nel caso statico i mezzi pesanti si ribaltano mentre le autovetture si trovano al limite dell'intervallo proposto in letteratura ed è quindi assai probabile che si ribaltino anch'esse.

Considerando che la duna con scarpa da  $60^\circ$  è utilizzata essenzialmente nelle situazioni dove la duna in terra viene superata con una velocità residua tale da invadere la retrostante sede AV appare più probabile che il meccanismo di ribaltamento che si viene ad innescare sia di tipo dinamico e che quindi anche per le autovetture si manifesti il ribaltamento quando queste si dispongono lungo la scarpata della duna.

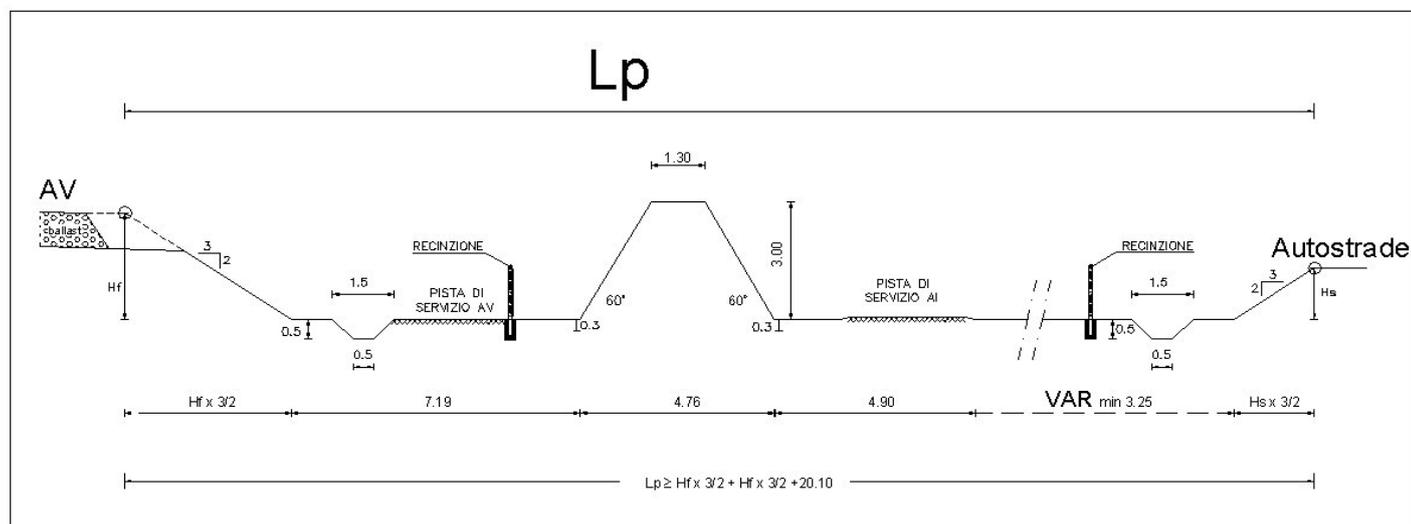


Figura 14: schematizzazione dell'area di svio per le simulazioni numeriche con duna di pendenza pari a  $60^\circ$ .

#### 6.4 Simulazioni con dune alte 3 m e scarpata 2/3

Il modello di simulazione illustrato nel paragrafo 5.2 consente di definire la distanza in sezione ( $L_p$ ) tra il ciglio del rilevato autostradale ed il limite della sede ferroviaria considerato come invalicabile, tale che il mezzo in svio non invada la linea AV con un tempo di ritorno complessivo inferiore a 100 anni.

In questa fase dello studio si sono analizzate le configurazioni dell'area interclusa dove, per varie altezze della scarpata autostradale e della scarpata ferroviaria, sia presente una duna in terra di altezza pari a 3 m e pendenza delle scarpate 2/3 (Figura 15).

Come definito nel paragrafo 6.1 le condizioni che possono essere risolte con l'inserimento di una duna in terra con pendenza delle scarpate 2/3 sono limitate inferiormente dalla necessità di disporre di uno spazio sufficiente in area interclusa, come schematicamente illustrato in Figura 15. In aggiunta non si sono considerate ammissibili questo tipo di protezioni in presenza di un rilevato ferroviario di altezza minore di 1m, come già nello studio dell'affiancamento con la A1.

Considerando i valori di LP al di sopra dei quali la AV può considerarsi intrinsecamente protetta (definiti, per le diverse autostrade, nel documento A20200DE2EXSC0000076) e le configurazioni geometriche minime per l'inserimento delle dune con scarpata 2/3, delle dune con scarpata a 60° e dei muri sono stati realizzati i diagrammi riportati nel paragrafo 7.2 da Figura 36 a Figura 77 relativi alle diverse autostrade in progetto ed a diverse altezze dei rilevati autostradali (o trincee).

Dall'analisi dei diversi diagrammi emerge che, nella maggior parte dei casi, lo spazio necessario per l'inserimento di una duna con scarpa 2/3 è superiore a quello di interferenza. Anche laddove questa soluzione potrebbe essere fisicamente inserita il campo di applicazione risulta talmente modesto da non far ritenere questo tipo di intervento di protezione applicabile alle autostrade in progetto.

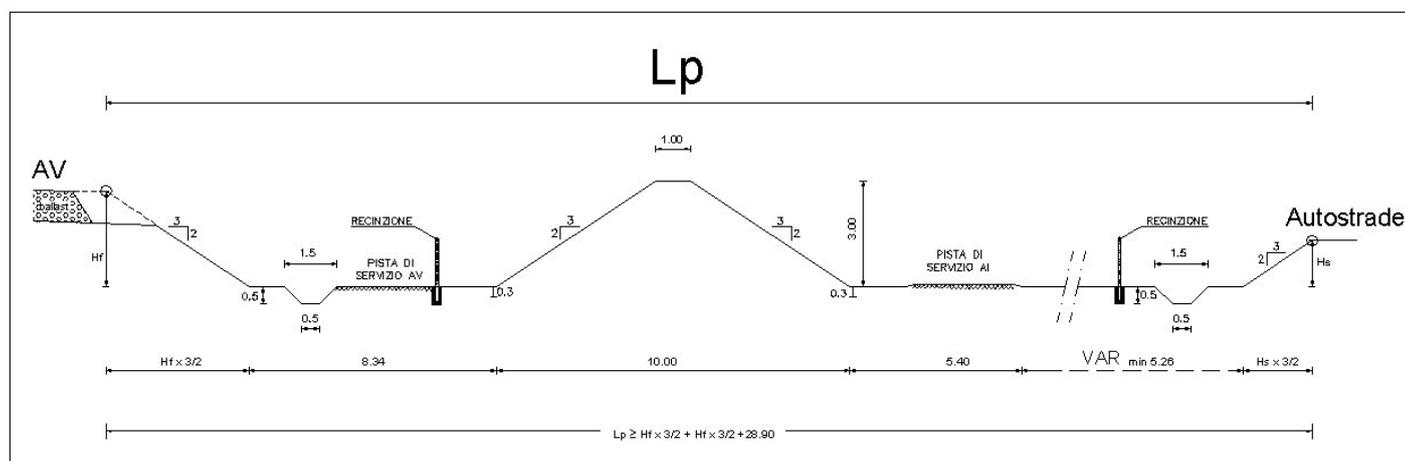


Figura 15: schematizzazione dell'area di svio per le simulazioni numeriche con duna di pendenza 2/3

## 6.5 Determinazione delle azioni sulle opere di protezione

### 6.5.1 Calcolo delle Energie di impatto e delle relative forze

Per consentire il dimensionamento strutturale delle opere di protezione poste all'interno dell'area interclusa o in prossimità del rilevato della linea AV, sono state determinate le energie di impatto e le forze massime e medie (secondo le due formulazioni di Hirsch e di Bloom/Buth) al variare della distanza dell'opera rispetto al ciglio autostradale. Il sistema di riferimento considerato è posizionato sul ciglio destro dell'autostrada e diretto secondo la perpendicolare all'asse del tracciato.

In via cautelativa, si è ritenuto opportuno fare riferimento alle condizioni più critiche ovvero quelle considerate per la A4 che, si rammenta, sono quelle già definite per la A1 sintetizzate nel successivo paragrafo 8.1.

Non esistendo una corrispondenza diretta tra l'inviluppo delle energie, con le varie altezze del rilevato, e l'inviluppo delle forze associate ad ogni tipologia di veicolo, si è proceduto seguendo gli studi effettuati da Hirsch e Bloom&Buth, calcolando le forze massime e medie associate, istante per istante, alla velocità ed all'angolo di svio, per ciascun mezzo considerato.

I diagrammi di calcolo che sintetizzano le forze così ottenute sono riportati nel paragrafo 8.2

## 7 CRITERI PER LA DEFINIZIONE DELLE PROTEZIONI

### 7.1 Principi per la definizione delle diverse aree

Nelle zone dove la distanza tra la linea AV e l'autostrada è tale che, sulla base delle indicazioni fornite nel documento A20200DE2EXSC0000076, un mezzo in svio può invadere la linea ferroviaria con un tempo di ritorno complessivo minore di 100 anni, sono state studiate le seguenti tipologie di protezione:

1. muro in c.a. di sostegno del rilevato ferroviario;
2. muro in c.a. di protezione posto alla sommità del rilevato ferroviario;
3. muro in c.a. di protezione posto all'interno dell'area interclusa;
4. duna in terra rinforzata con angolo di scarpa pari a 60°, di altezza pari a 3 m;
5. duna in terra con scarpata 2/3, di altezza pari a 3 m.

La definizione della soluzione da adottare passa attraverso due verifiche distinte:

- ✓ la soluzione che si vuole adottare deve essere in grado di garantire la non invasione della linea AV da parte del veicolo in svio (con tempo di ritorno complessivo non inferiore a 100 anni);
- ✓ all'interno dell'area interclusa deve essere disponibile uno spazio sufficiente per l'inserimento dell'opera di protezione.

Sulla base di questa schematizzazione nel citato documento A20200DE2EXSC0000076 sono state identificate 3 possibili situazioni riepilogate di seguito:

- Situazione A - di non interferenza: si applica in quelle zone nelle quali la distanza tra il ciglio del rilevato stradale e quello del rilevato ferroviario è maggiore del valore di  $L_p$  di interferenza calcolato per una data altezza dei due rilevati mediante la procedura illustrata nel documento A20200DE2EXSC0000076;
- situazione B - di "affiancamento": in queste zone la distanza tra i rilevati è minore di  $L_p$  di interferenza ed un mezzo in svio può invadere la sede ferroviaria. La larghezza dell'area interclusa è però sufficiente per affidare la protezione della linea AV a dune (di diverso tipo a seconda dello spazio disponibile);
- situazione C - di "stretto affiancamento": in queste zone vi può essere ancora invasione della linea AV ma lo spazio disponibile non è sufficiente ad inserire dune e la protezione è affidata alla presenza di muri in c.a.

Le protezioni tipo 1, 2 e 3 rientrano nella situazione progettuale C ovvero di "stretto affiancamento" mentre le protezioni tipo 4 e 5 sono utilizzate nelle situazioni B di "affiancamento".



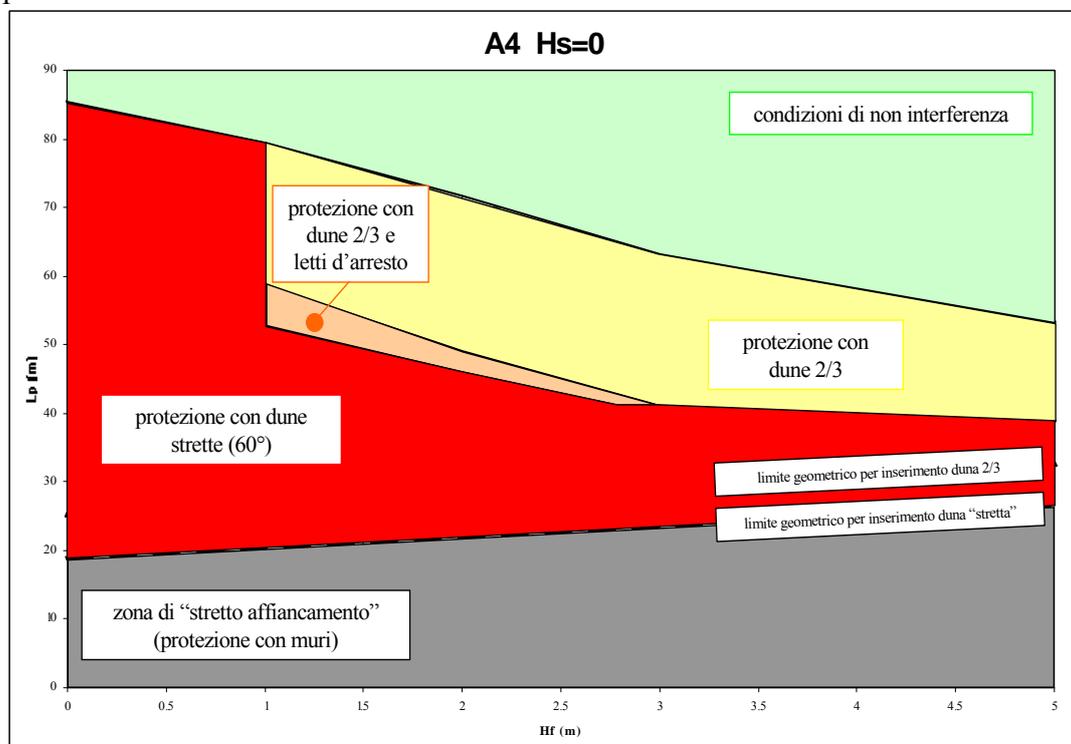


## 7.2 Definizione del tipo di protezione richiesta nella zona di affiancamento

Per valutare la tipologia di protezione da adottare in ogni specifica situazione progettuale occorre seguire la seguente procedura:

- definire l'altezza del rilevato ferroviario ( $H_f$ );
- definire l'altezza del rilevato stradale ( $H_s$ ) ed approssimarla all'unità per eccesso;
- definire la distanza  $L_p$  tra la sede ferroviaria a la sede stradale;
- entrare in uno dei seguenti diagrammi ciascuno valido per un valore prefissato di  $H_s$ :

- per la A4 da



- Figura 17 a Figura 35;
- per la BRE-BE-MI da Figura 36 a Figura 54;
- per la ACP da Figura 55 a Figura 71;
- per la BRETTELLA da Figura 72 a Figura 77.

Dai diagrammi riportati è possibile individuare il tipo di protezione da adottare in relazione alla distanza  $L_p$  ed alla altezza dei rilevati. Le diverse linee presenti nei diagrammi identificano una serie di settori all'interno dei quali sono comprese diverse coppie di valori  $L_p$  ed  $H_f$ . In ciascun settore la protezione è assegnata ad opere o a sistemi di protezione di tipo diverso.

Un esempio può chiarire le modalità d'uso dei diagrammi a scopo progettuale.

Si consideri ad esempio di avere nel tratto di affiancamento con la A4 un rilevato stradale di altezza pari a 2 m ed un rilevato ferroviario di altezza anch'esso pari a 2 m. Si entra nel diagramma di

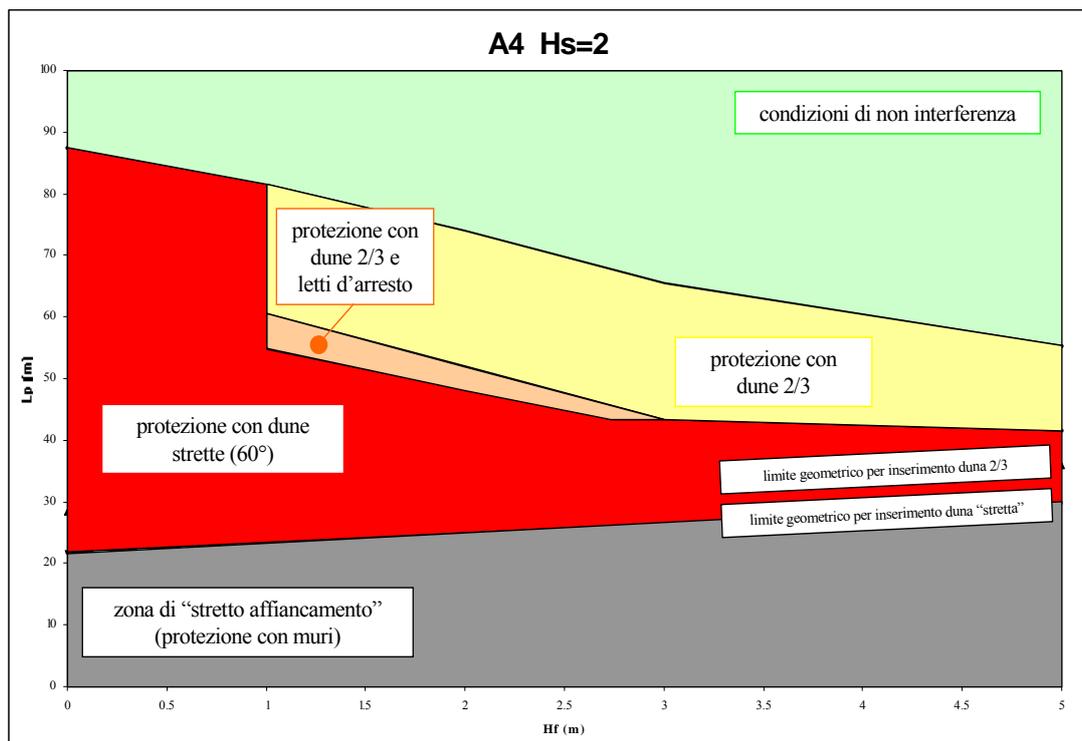


Figura 19 con  $H_f = 2$  m.

Si possono verificare i seguenti casi in relazione al valore assunto dal parametro  $L_p$ :

- se la distanza  $L_p$  è maggiore di 74 m non occorre prevedere interventi di protezione e la sezione schematica di riferimento è quella di Figura 78;
- se la distanza  $L_p$  è compresa tra 48 e 74 m la protezione può essere realizzata con una duna in terra con pendenza delle scarpate pari a 2/3 come illustrato nella sezione schematica di Figura 79;
- se la distanza  $L_p$  è compresa tra 25 e 48 m occorre realizzare un protezione con una duna in terra rinforzata di tipo invalicabile con angolo di scarpa di  $60^\circ$ , come illustrato nella sezione schematica riportata in Figura 80. Come si può osservare dal diagramma per  $L_p$  maggiori di circa 31 m lo spazio sarebbe sufficiente per realizzare una duna con scarpata 2/3 ma le simulazioni effettuate hanno dimostrato che questo tipo di duna, posta così vicino all'autostrada, non protegge la linea AV dal possibile svio con tempo di ritorno di 100 anni. Le analisi condotte hanno invece evidenziato che l'inserimento di una duna con angolo di scarpa di  $60^\circ$  produce il ribaltamento del mezzo impattante e costituisce quindi un ostacolo di fatto invalicabile;
- se la distanza  $L_p$  è minore di 25 m lo spazio non è più sufficiente per l'inserimento della duna stretta e si rientra nel caso di stretto affiancamento, discusso nel paragrafo seguente.

Come già evidenziato in precedenza le soluzioni con dune in terra con scarpa 2/3 non sono applicabili quando  $H_f$  è minore di 1 m. L'unica soluzione, nelle zone di affiancamento con rilevati ferroviari di altezza inferiore, è quella di inserire nell'area interclusa un elemento invalicabile, quali sono le dune in terra rinforzata con angolo di scarpa di  $60^\circ$ .

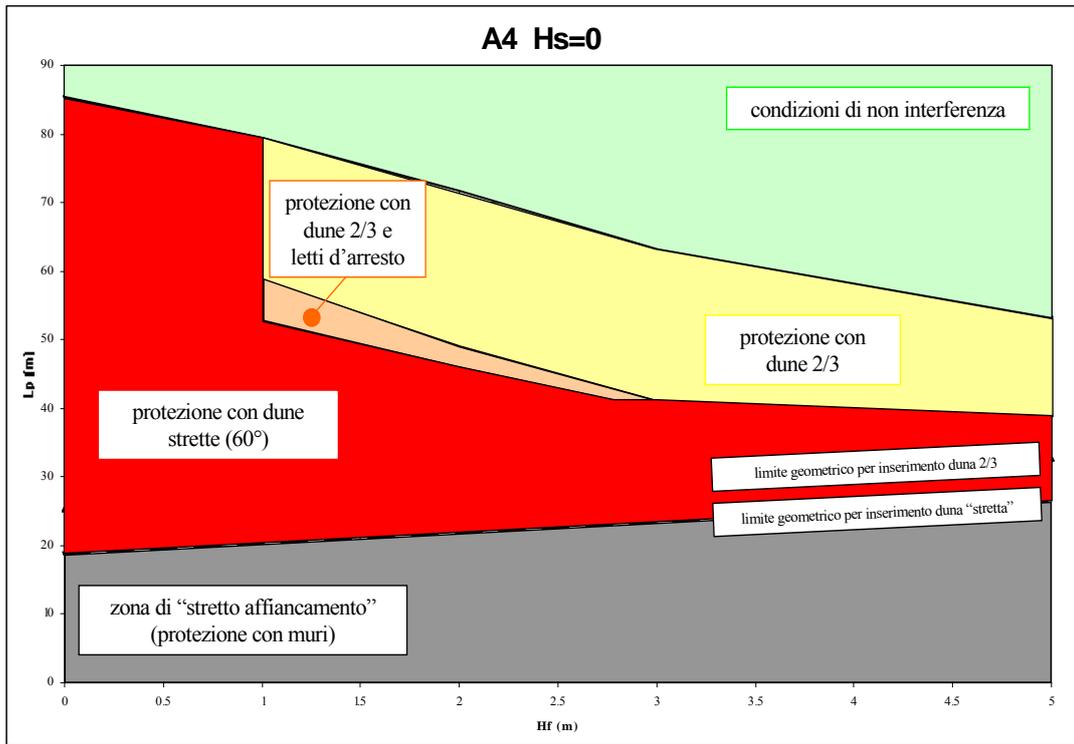


Figura 17: diagramma per la definizione delle opere di protezione per autostrada A4 Hs=0

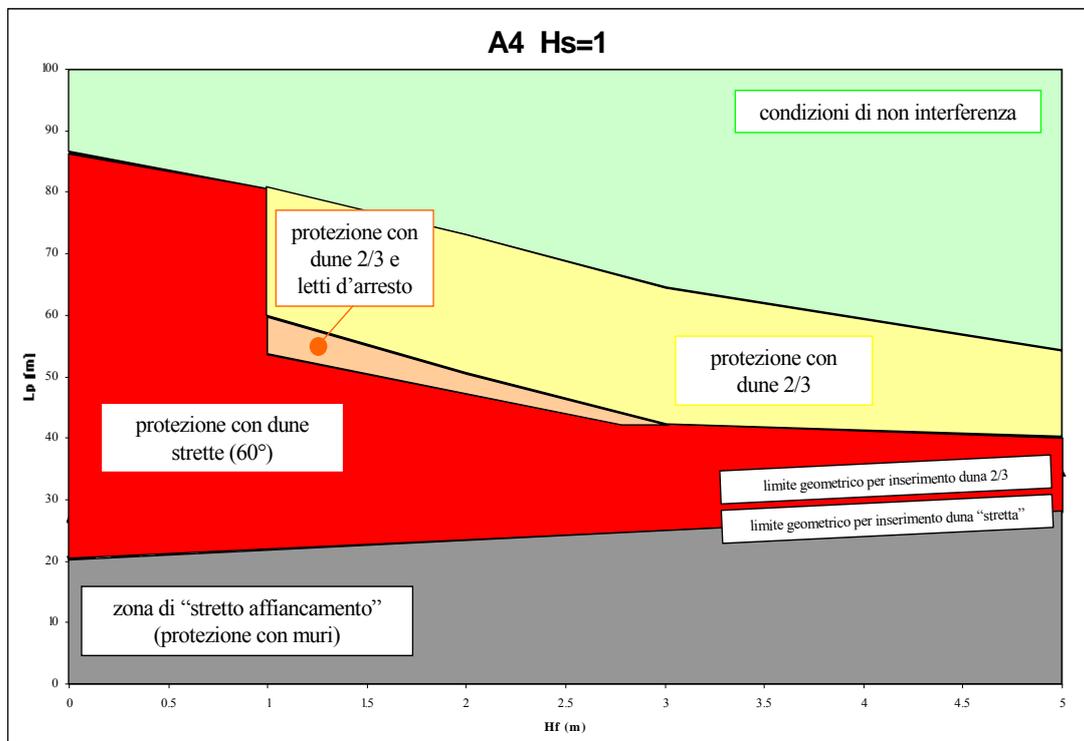


Figura 18: diagramma per la definizione delle opere di protezione per autostrada A4 Hs=1

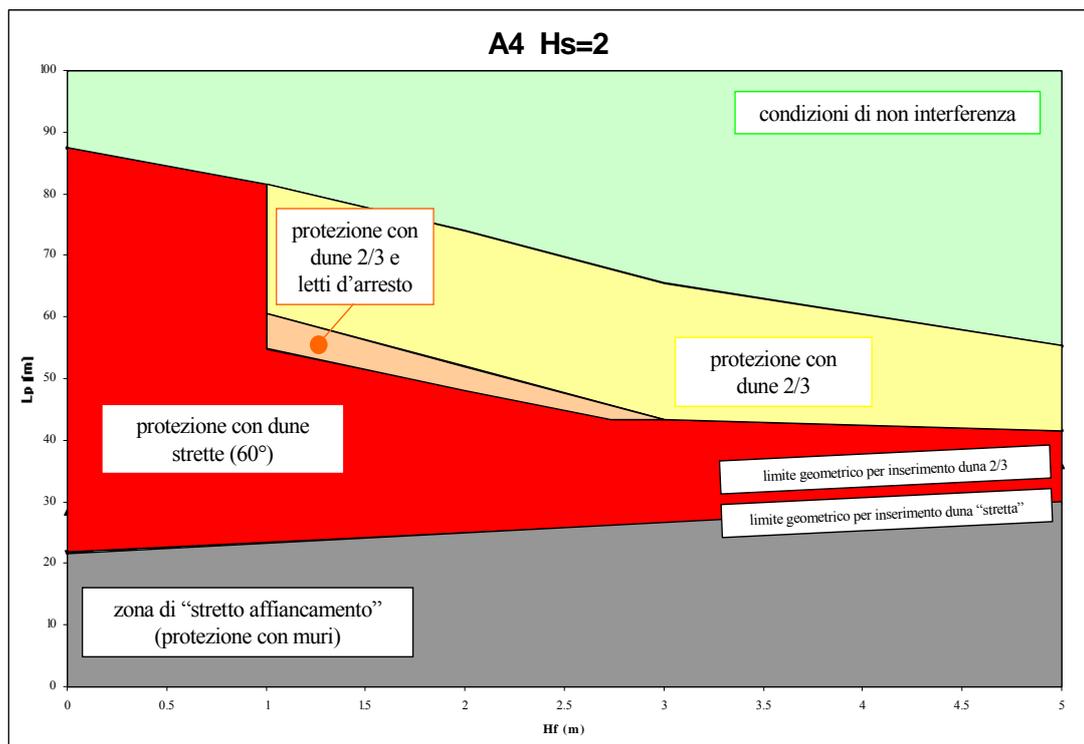


Figura 19: diagramma per la definizione delle opere di protezione per autostrada A4 Hs=2

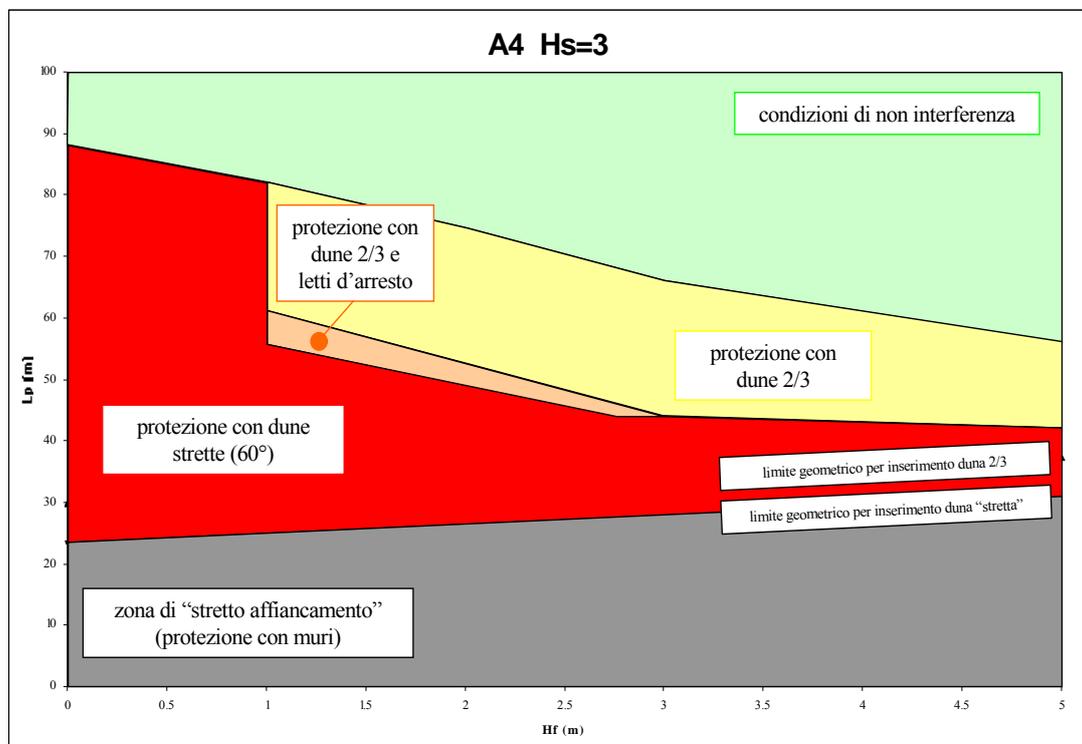


Figura 20: diagramma per la definizione delle opere di protezione per autostrada A4 Hs=3

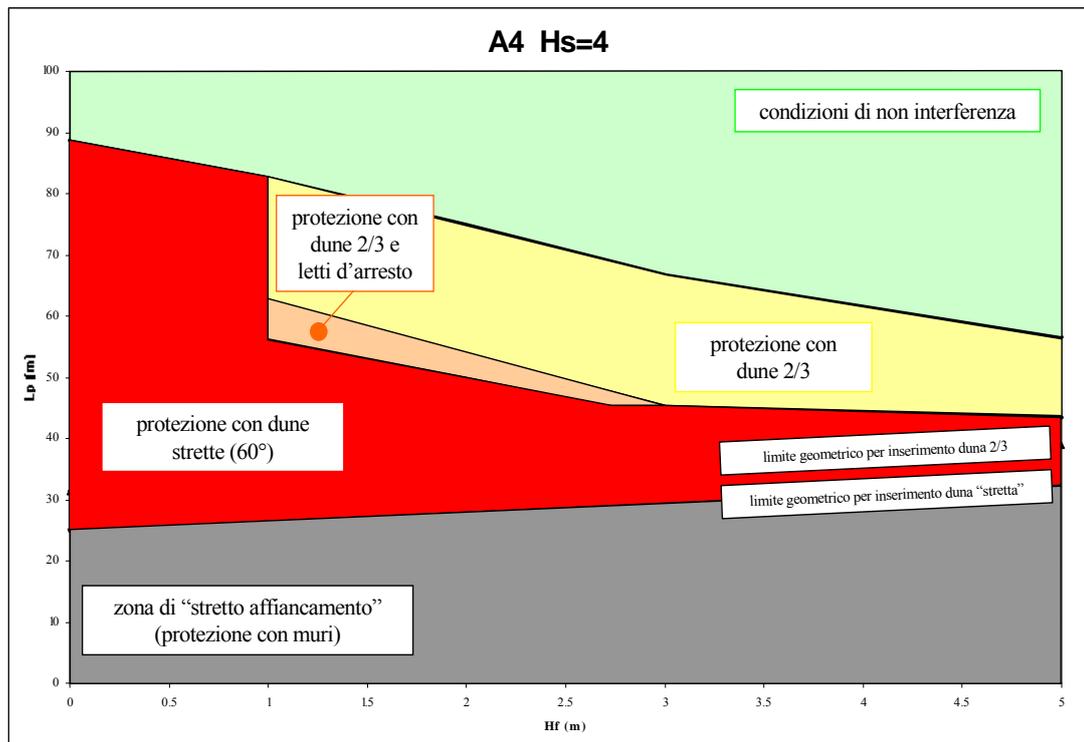


Figura 21: diagramma per la definizione delle opere di protezione per autostrada A4 Hs=4

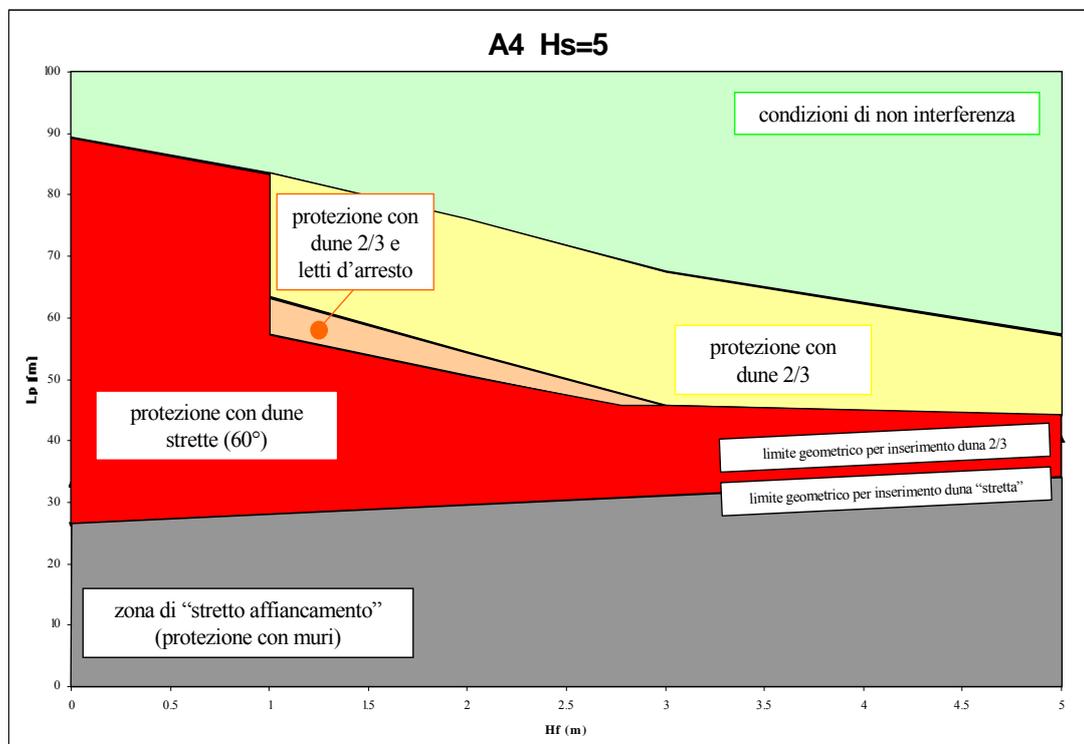


Figura 22: diagramma per la definizione delle opere di protezione per autostrada A4 Hs=5

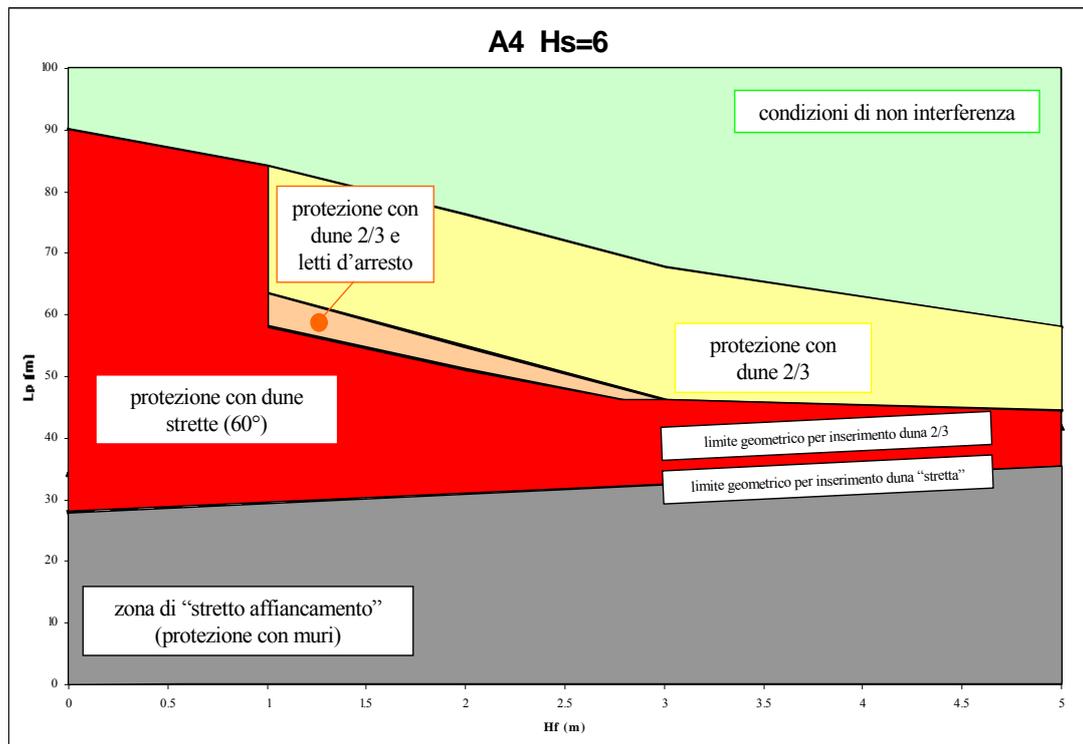


Figura 23: diagramma per la definizione delle opere di protezione per autostrada A4 Hs=6

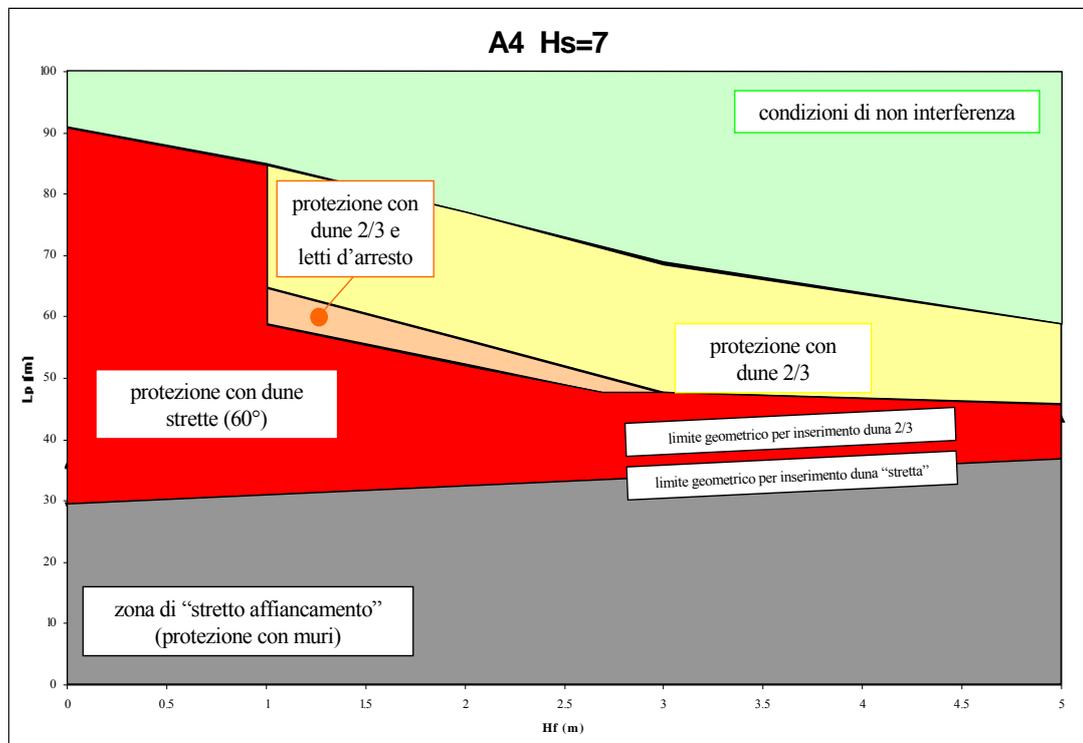


Figura 24: diagramma per la definizione delle opere di protezione per autostrada A4 Hs=7

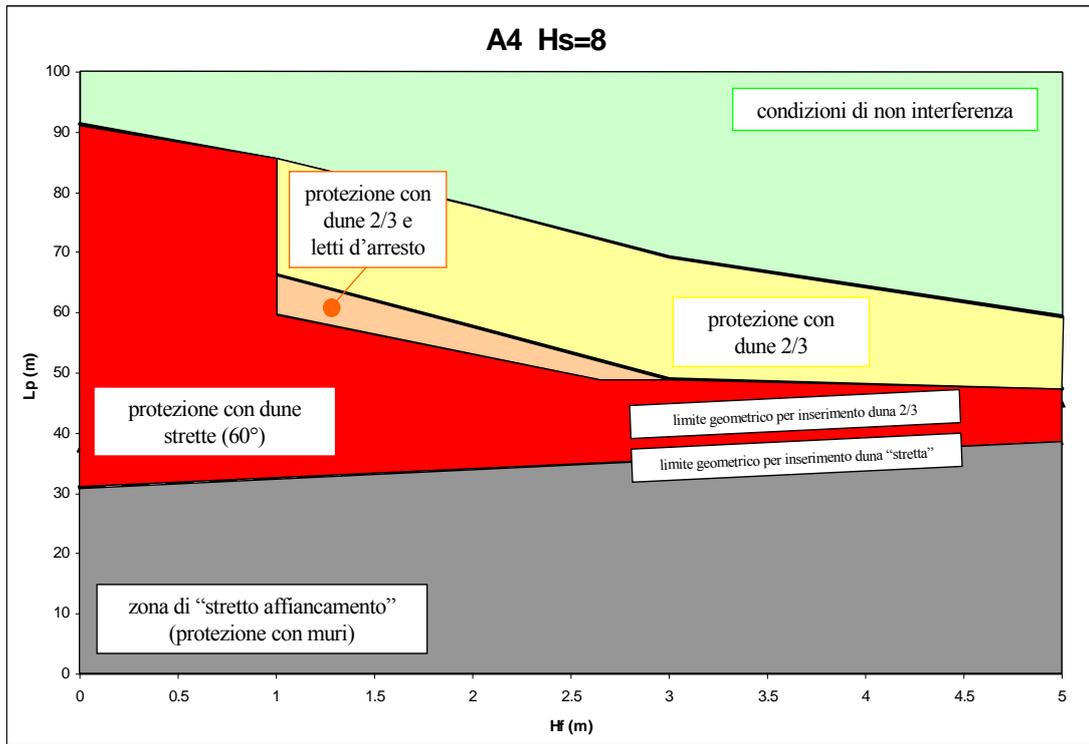


Figura 25: diagramma per la definizione delle opere di protezione per autostrada A4 Hs=8

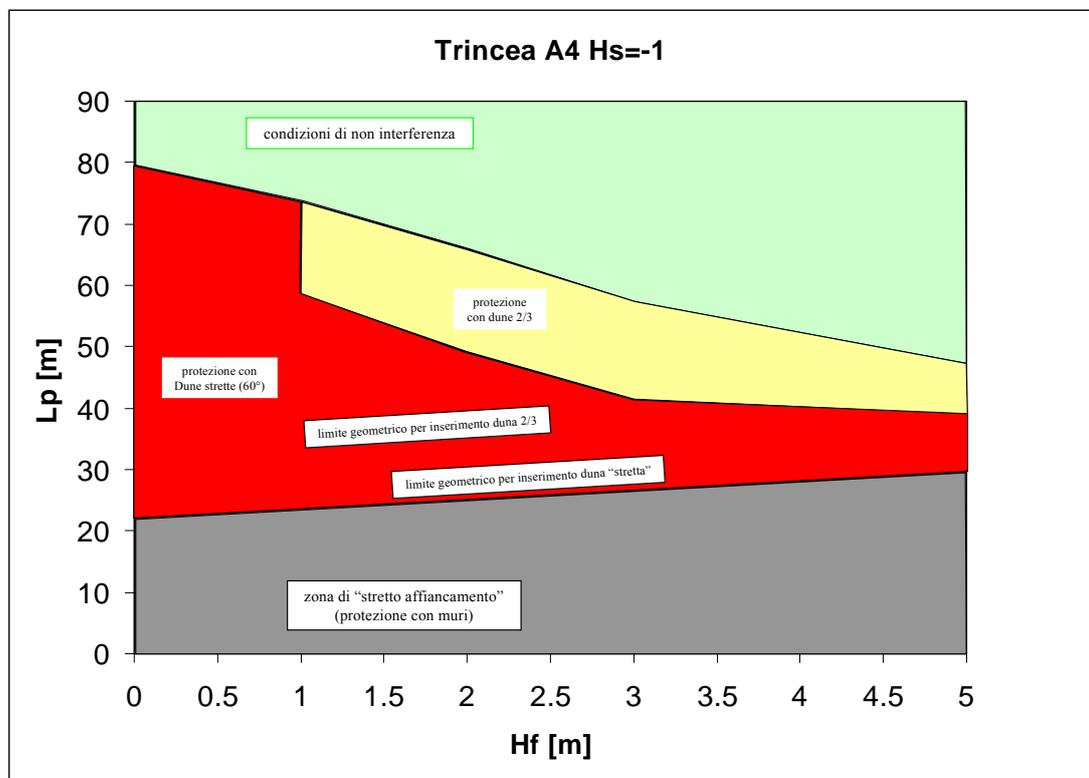


Figura 26 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea A4 con Hs=-1

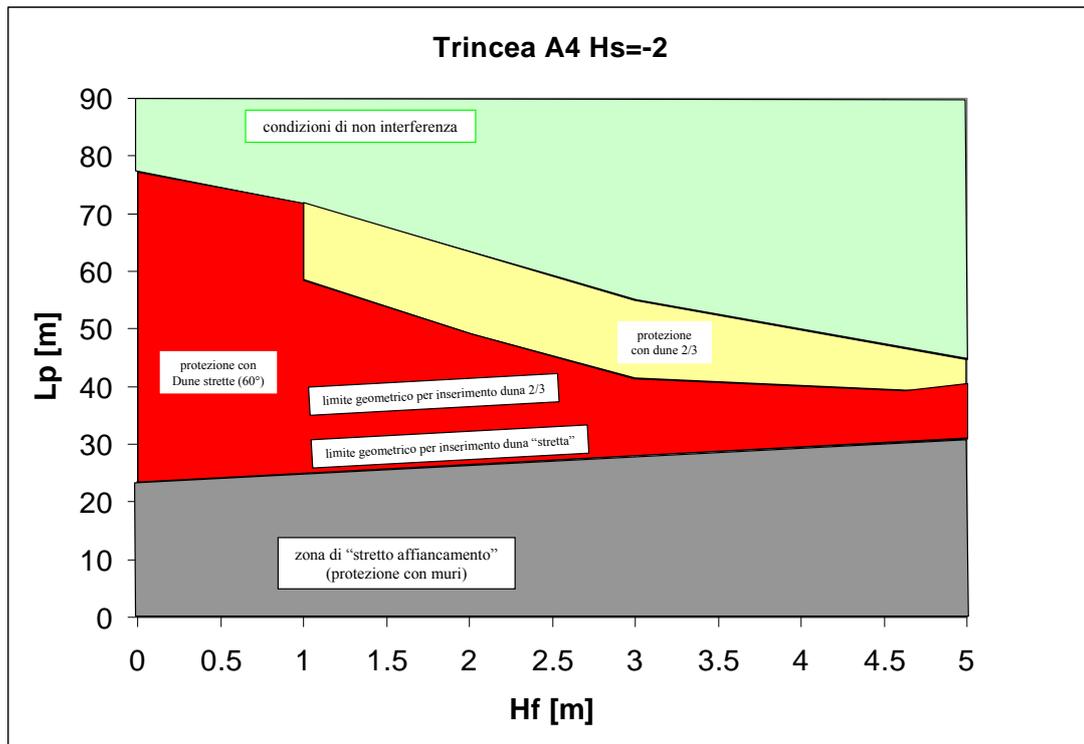


Figura 27 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea A4 con Hs=-2

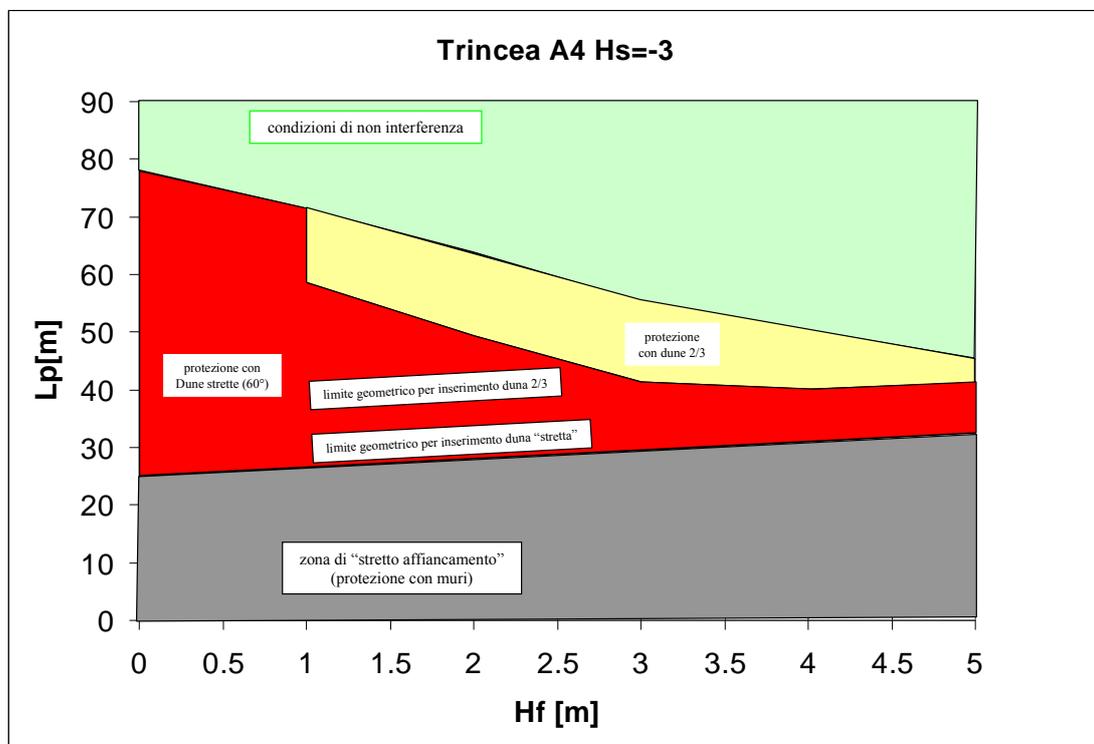


Figura 28 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea A4 con Hs=-3

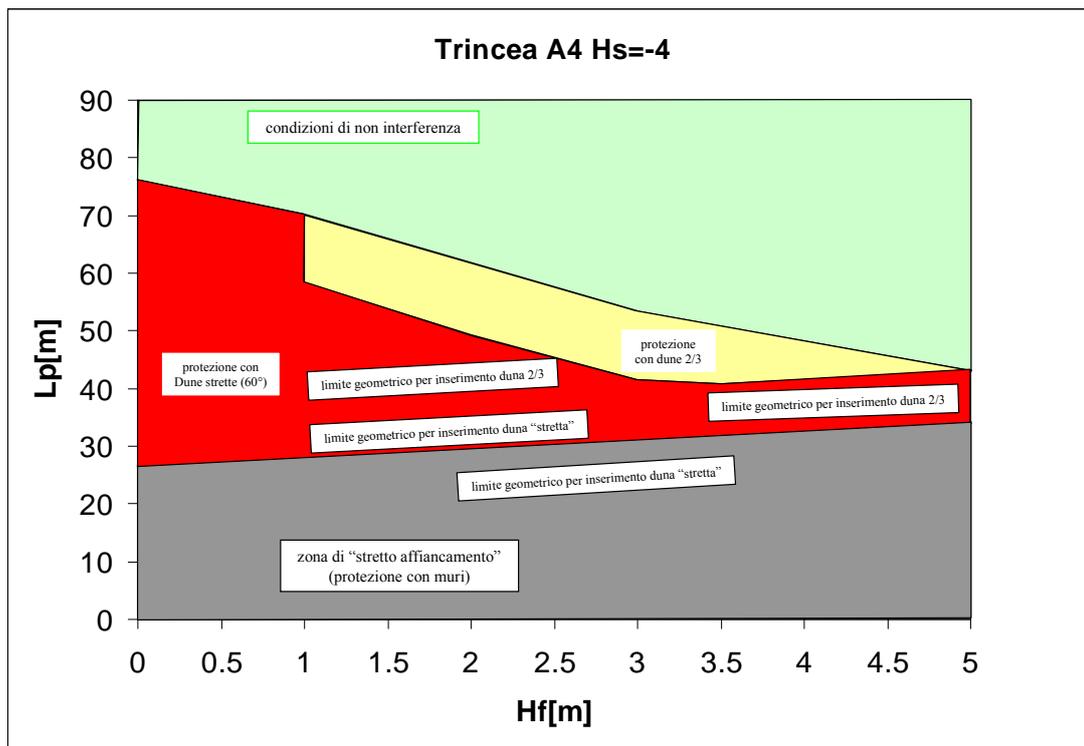


Figura 29 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea A4 con Hs=-4

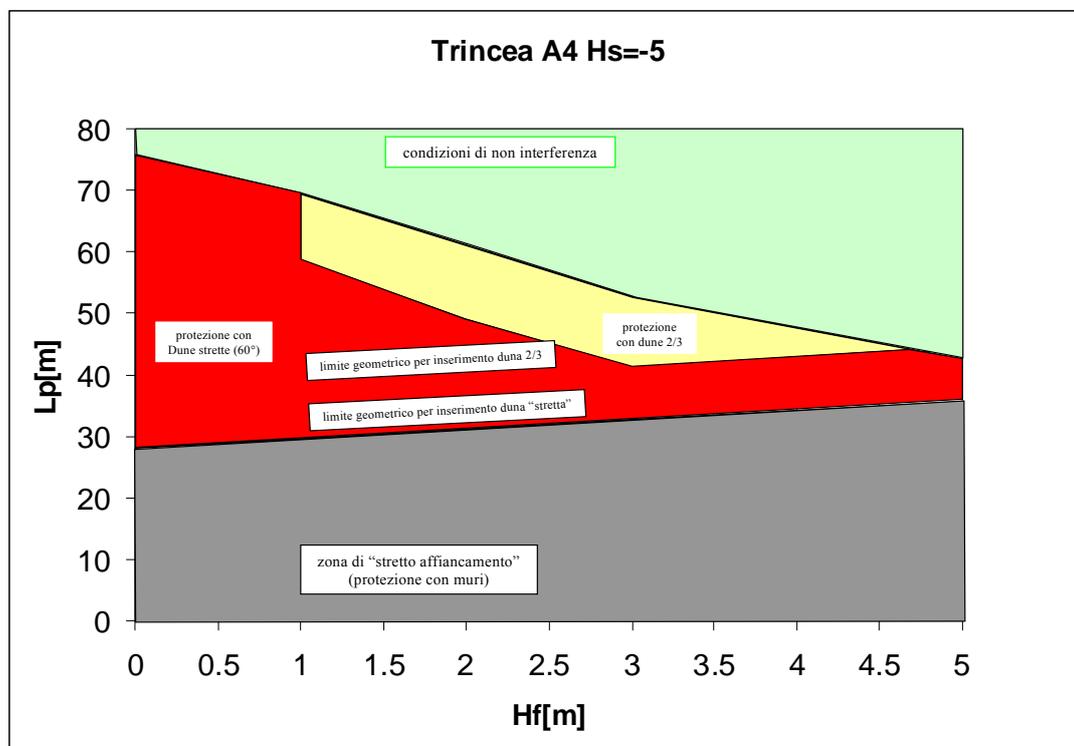


Figura 30 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea A4 con Hs=-5

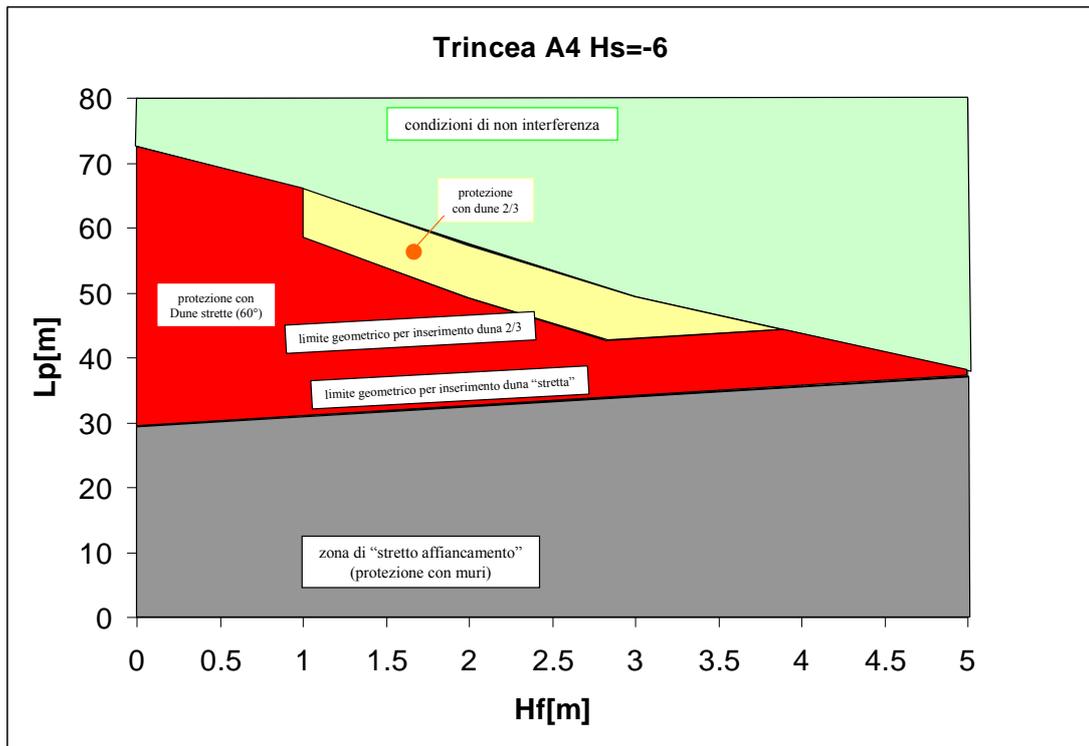


Figura 31 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea A4 con Hs=-6

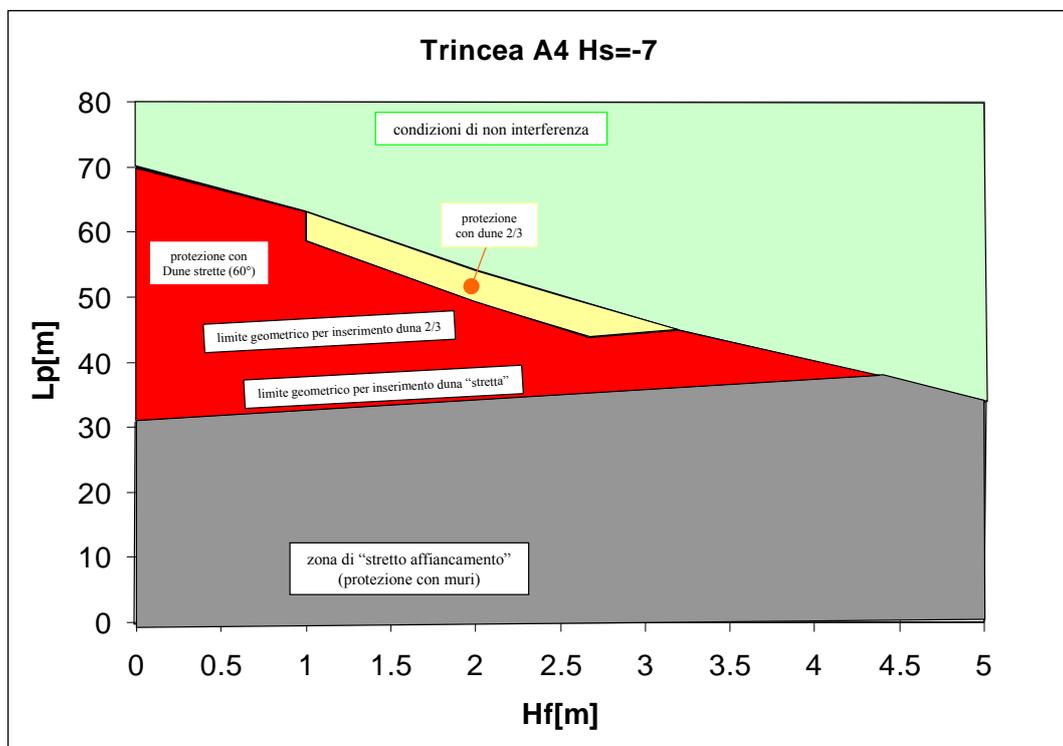


Figura 32 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea A4 con Hs=-7

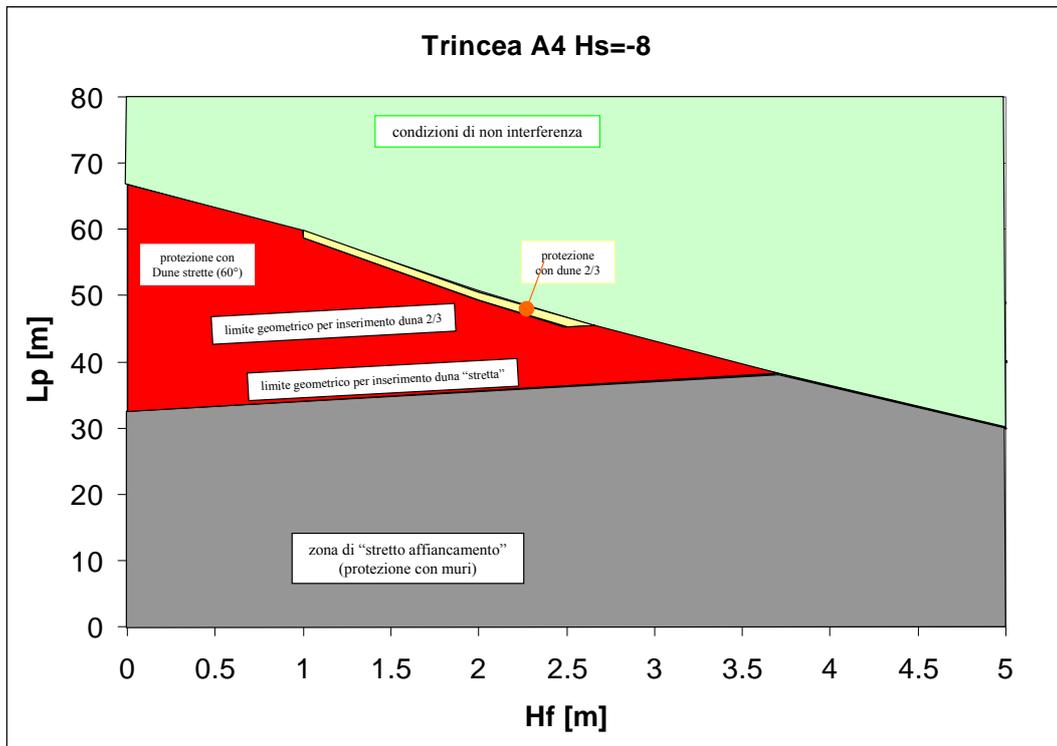


Figura 33 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea A4 con Hs=-8

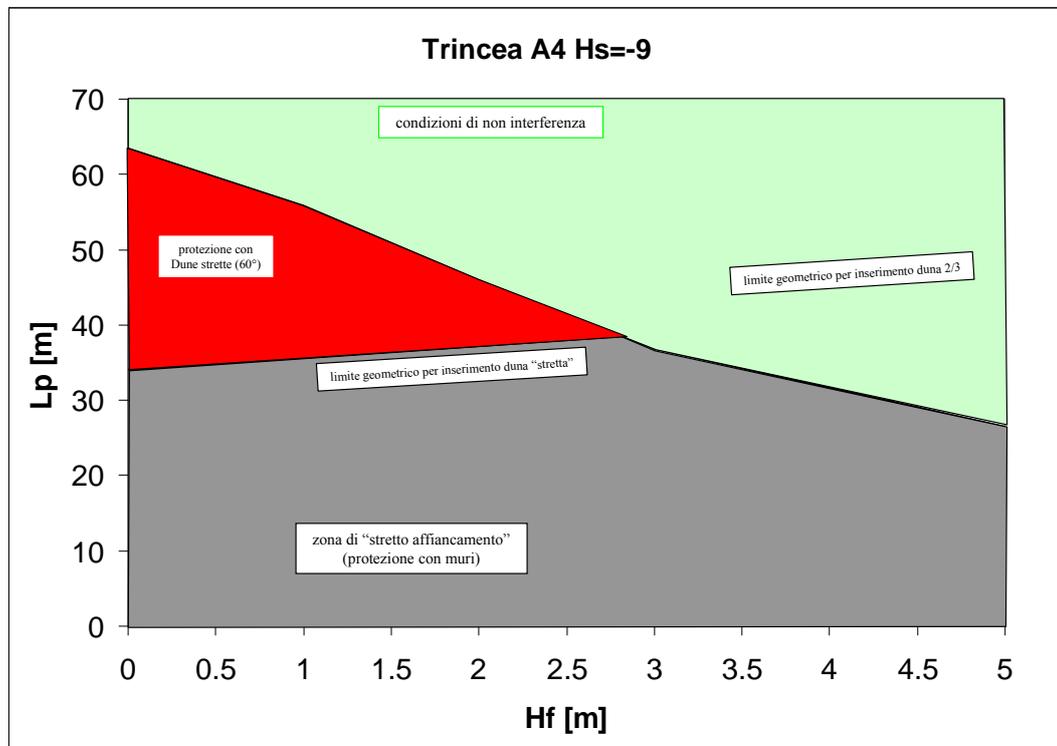


Figura 34 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea A4 con Hs=-9

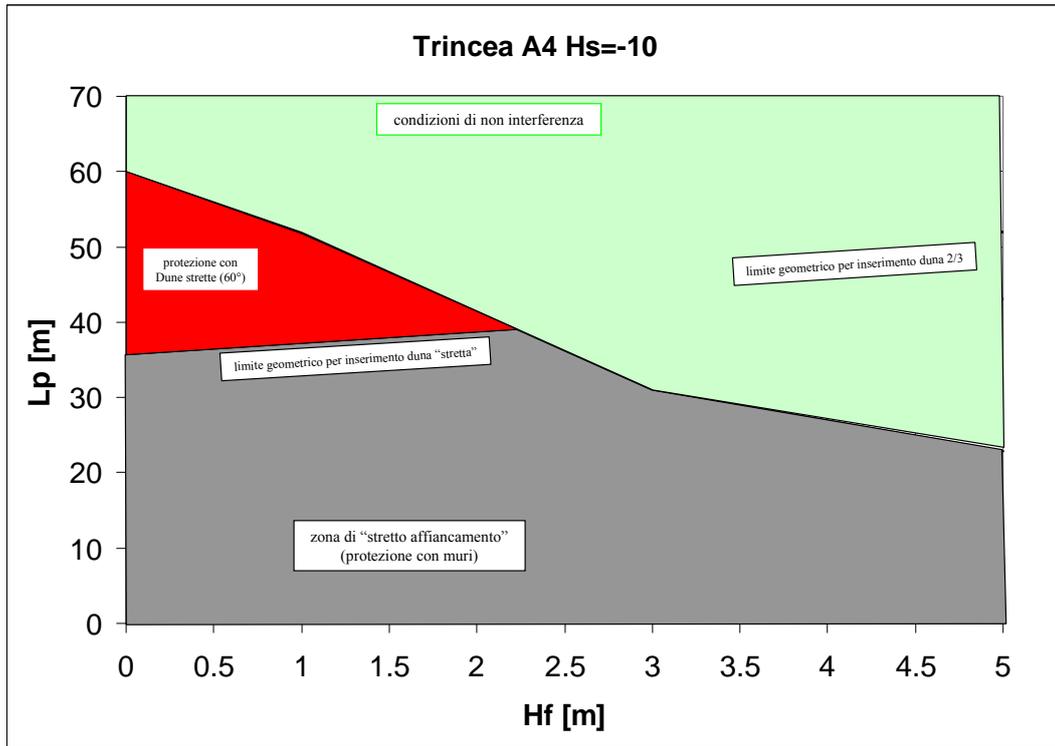


Figura 35 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea A4 con  $H_s=-10$

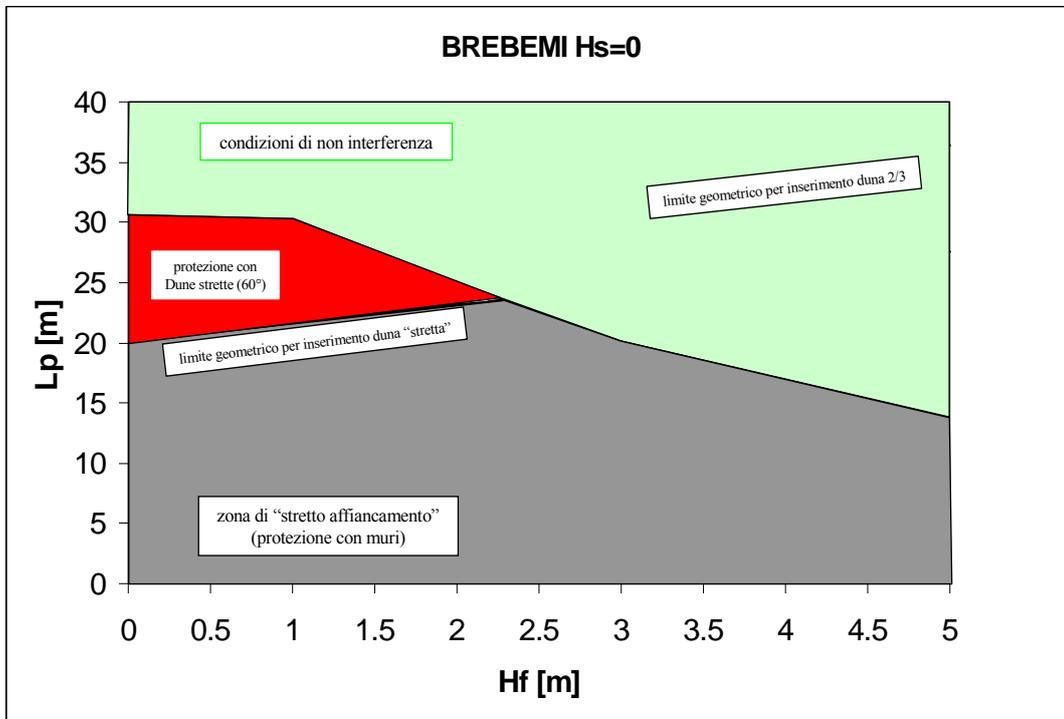


Figura 36 diagramma per la definizione delle opere di protezione BREBEMI con  $H_s=0$

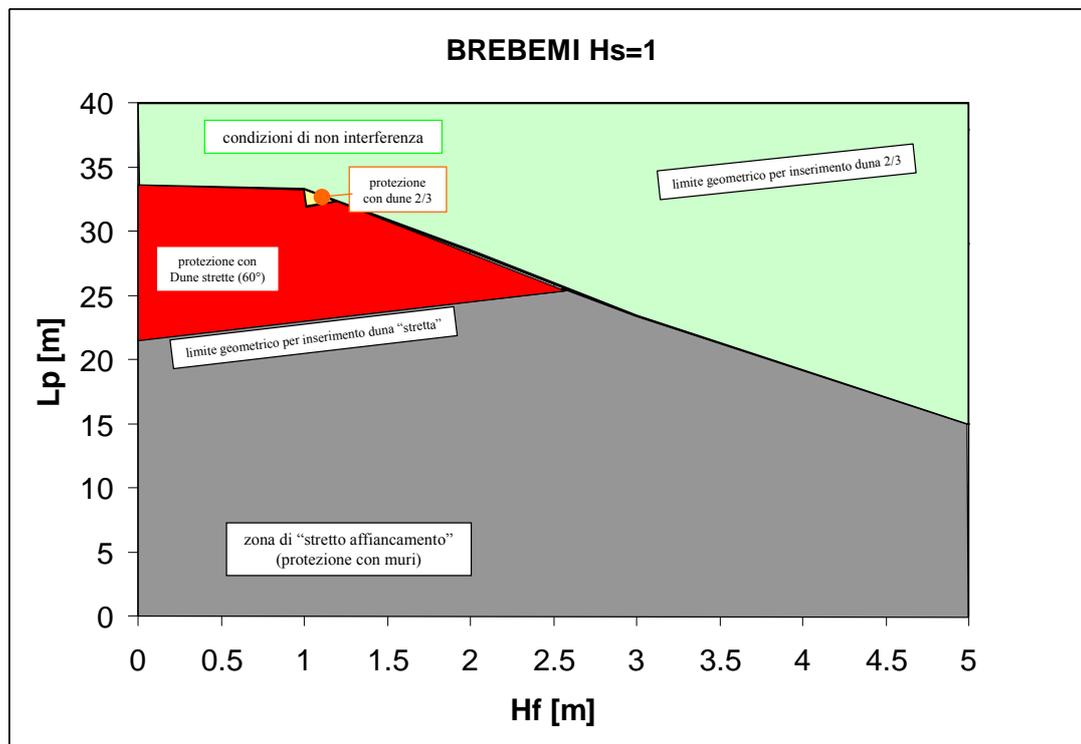


Figura 37 diagramma per la definizione delle opere di protezione BREBEMI con Hs=1

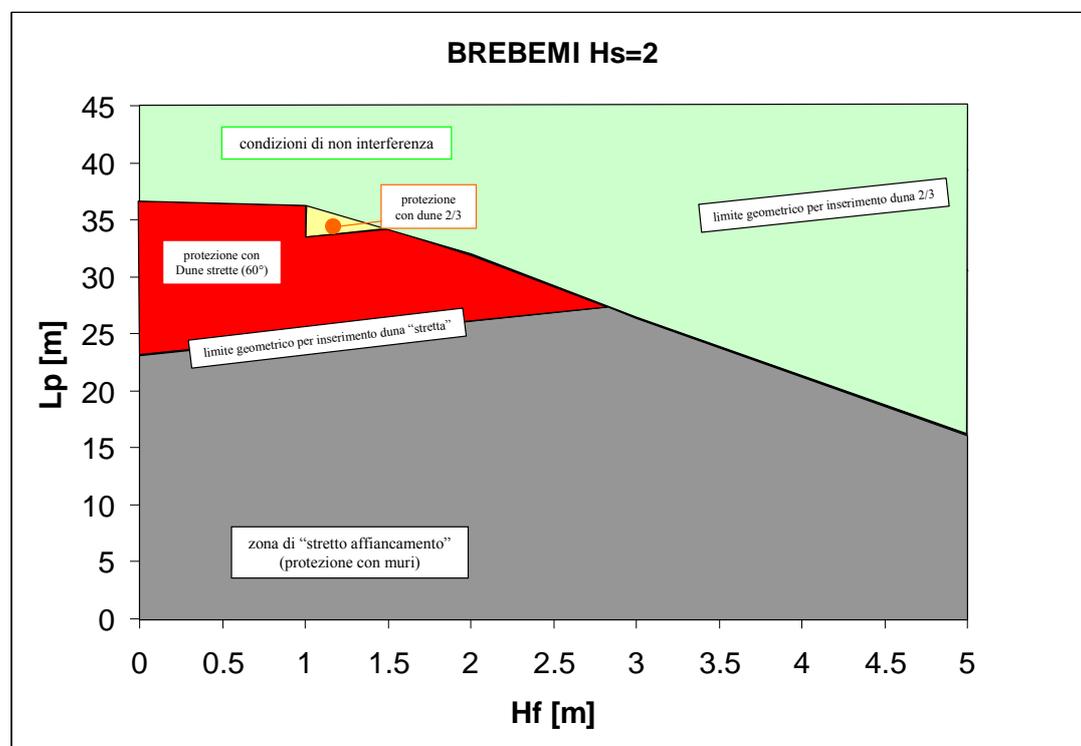


Figura 38 diagramma per la definizione delle opere di protezione BREBEMI con Hs=2

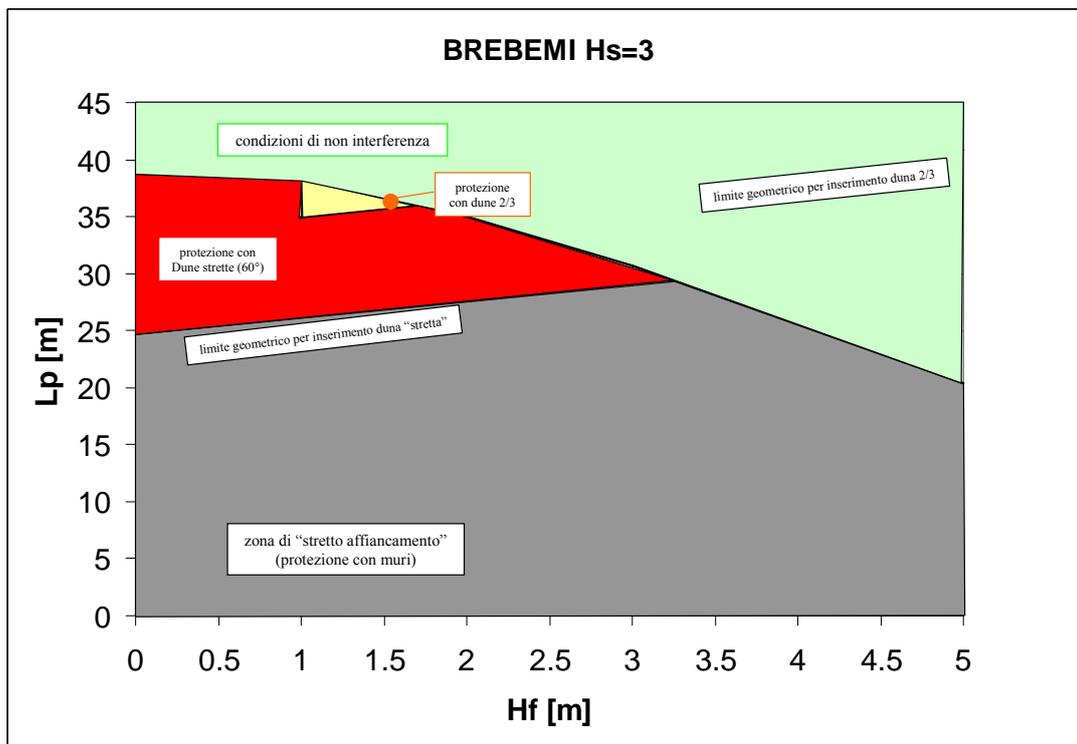


Figura 39 diagramma per la definizione delle opere di protezione BREBEMI con Hs=3

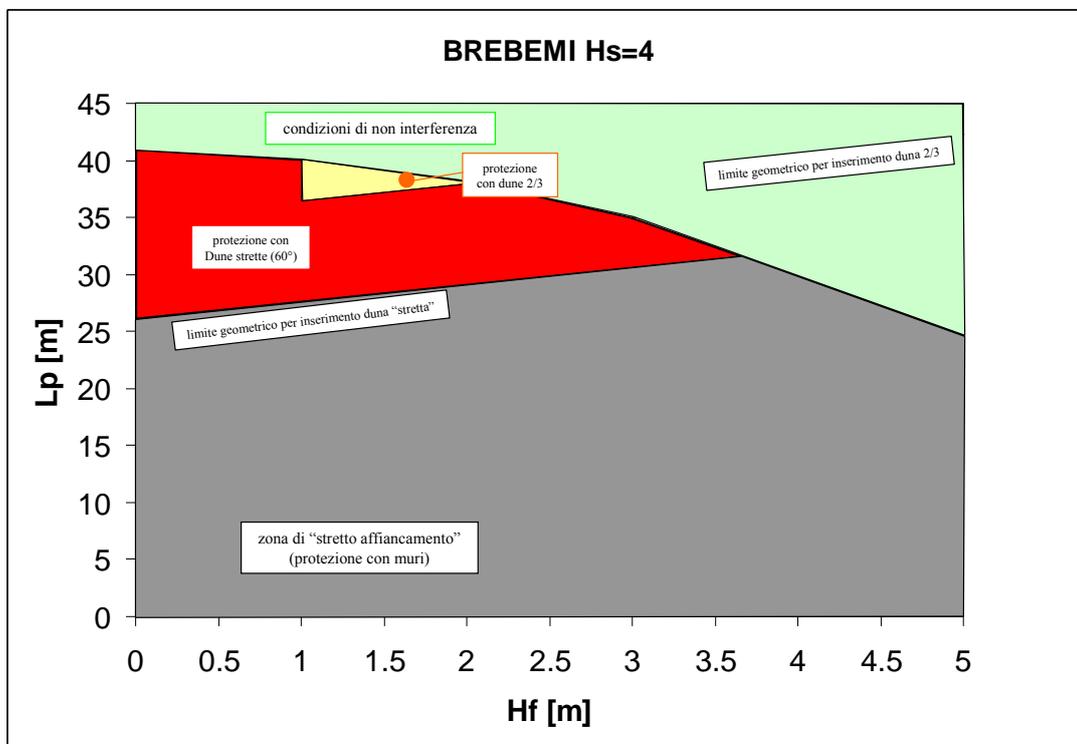


Figura 40 diagramma per la definizione delle opere di protezione BREBEMI con Hs=4

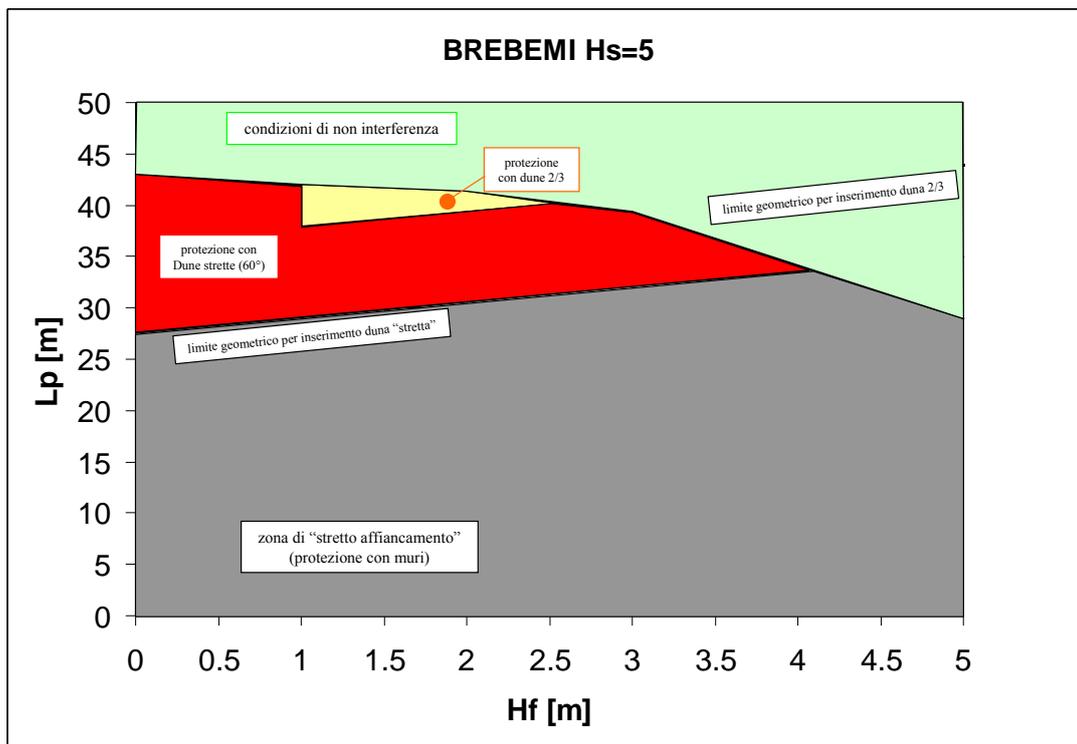


Figura 41 diagramma per la definizione delle opere di protezione BREBEMI con Hs=5

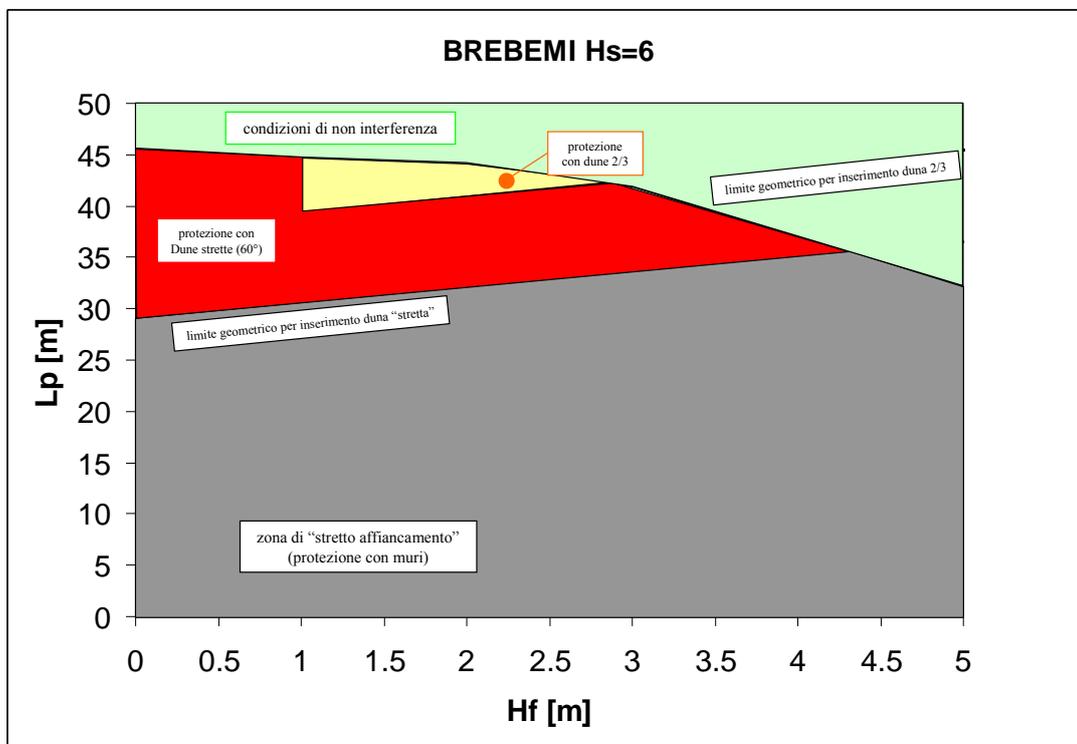


Figura 42 diagramma per la definizione delle opere di protezione BREBEMI con Hs=6

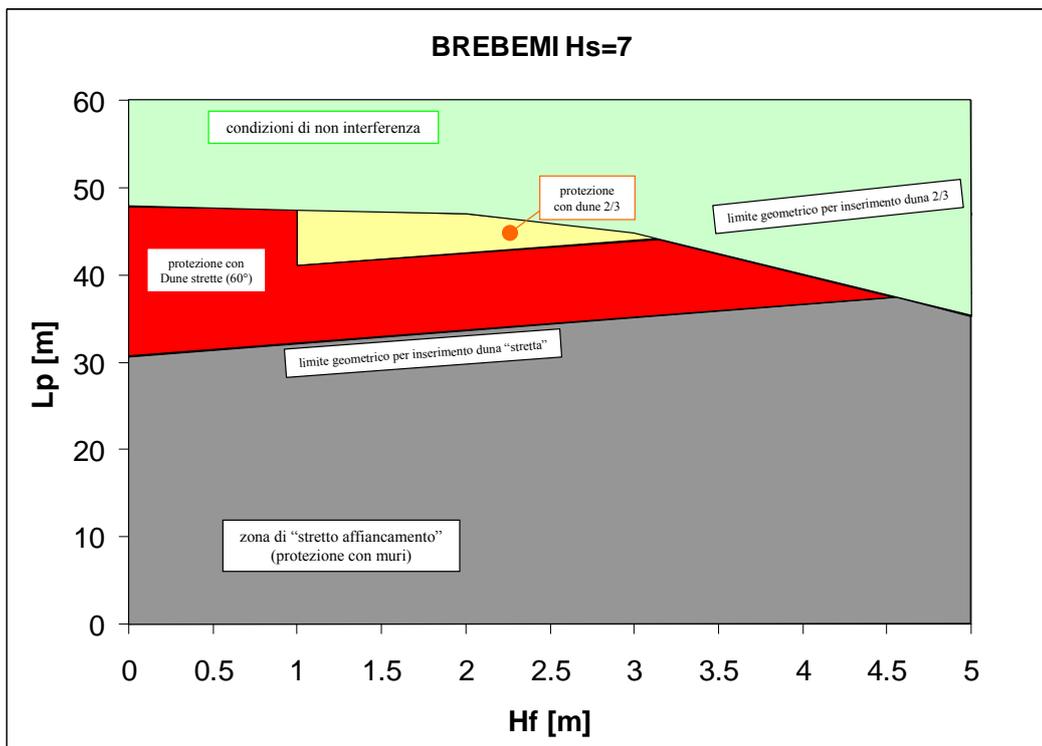


Figura 43 diagramma per la definizione delle opere di protezione BREBEMI con Hs=7

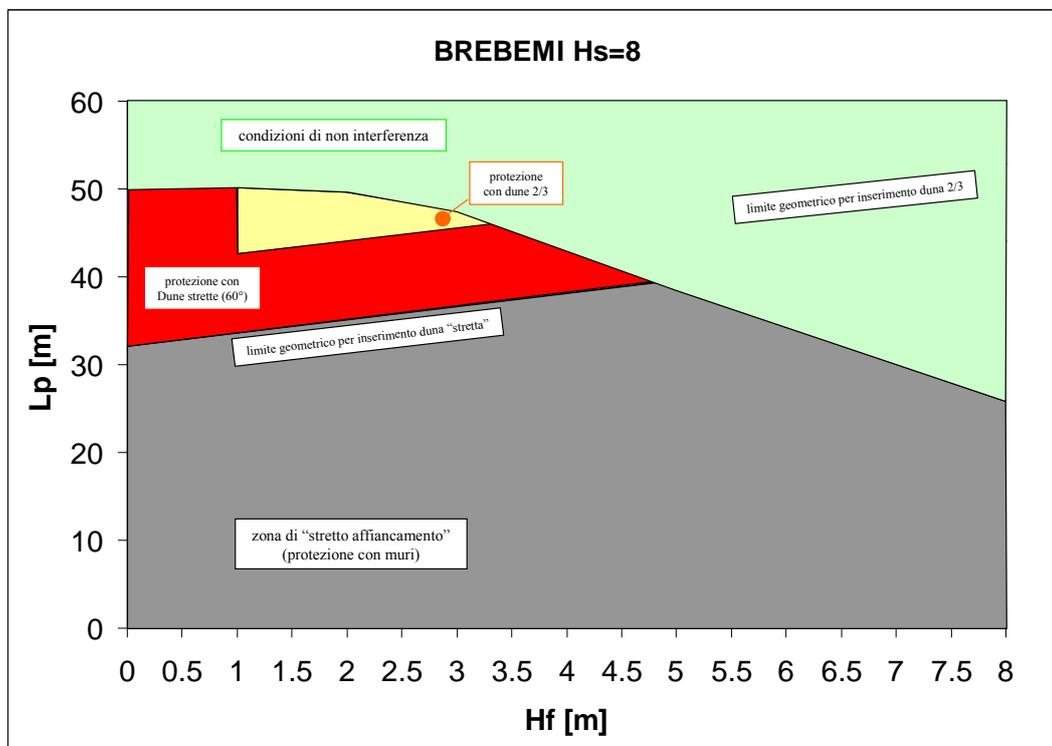


Figura 44 diagramma per la definizione delle opere di protezione BREBEMI con Hs=8

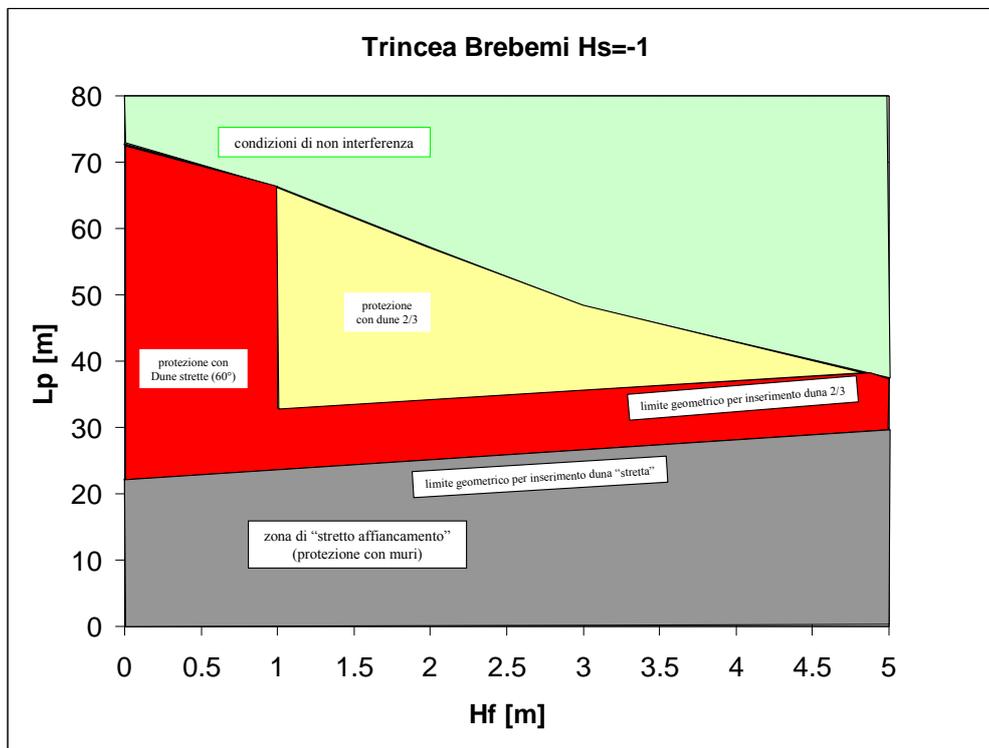


Figura 45 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea BREBEMI Hs=-1

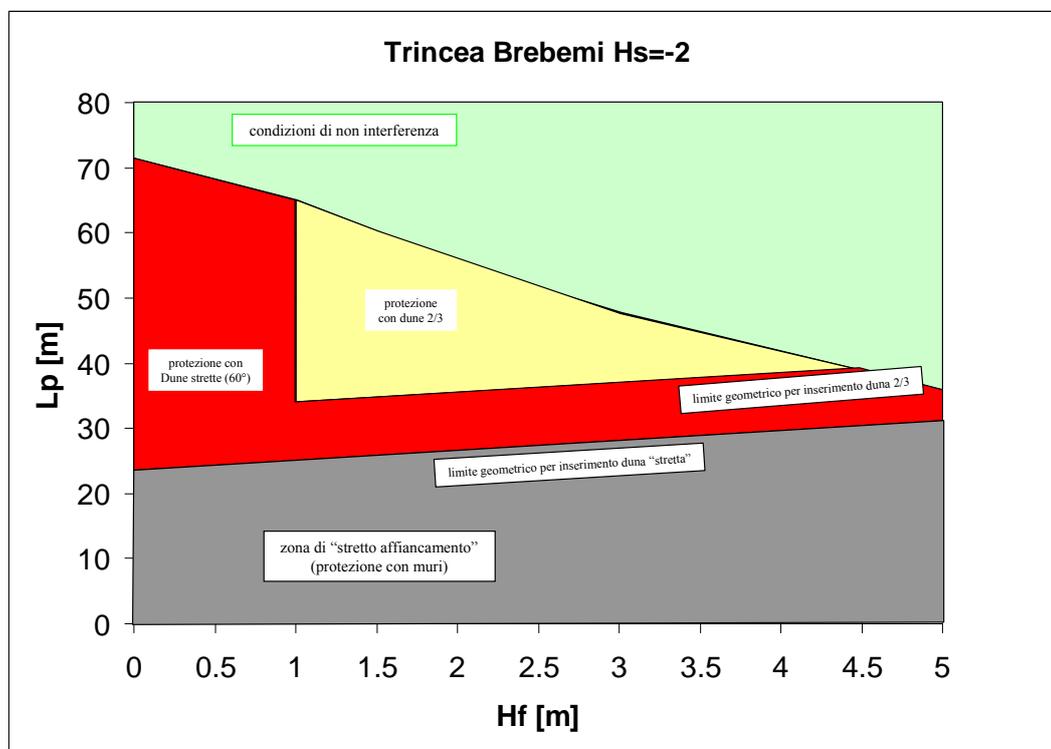


Figura 46 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea BREBEMI Hs=-2

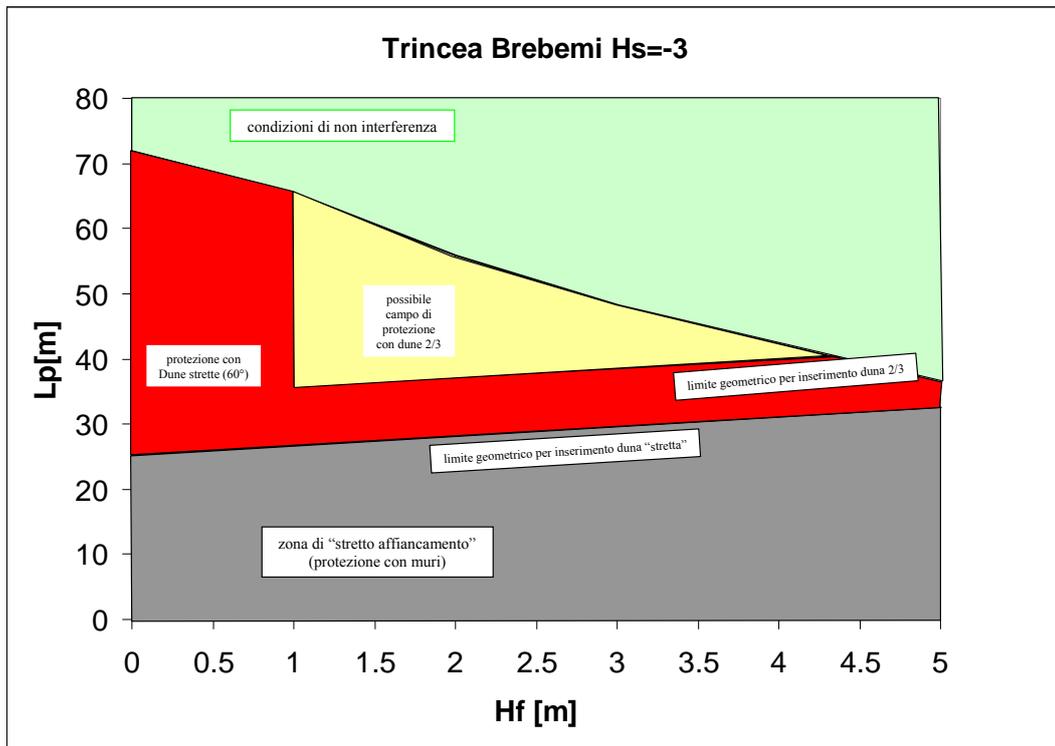


Figura 47 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea BREBEMI Hs=-3

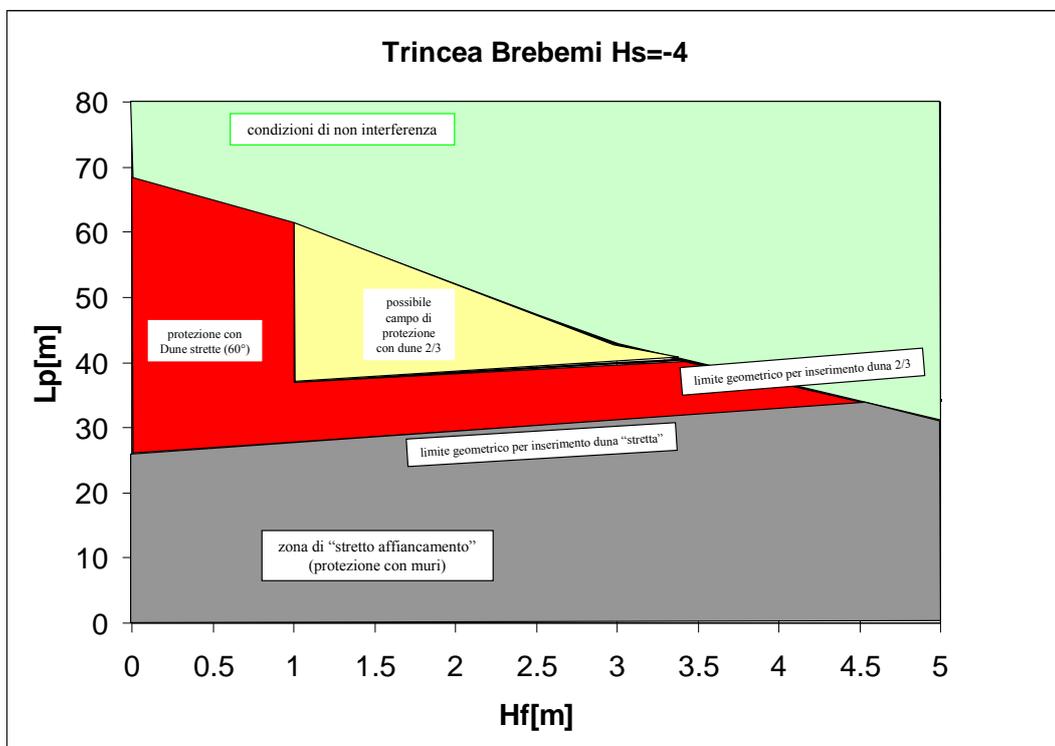


Figura 48 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea BREBEMI Hs=-4

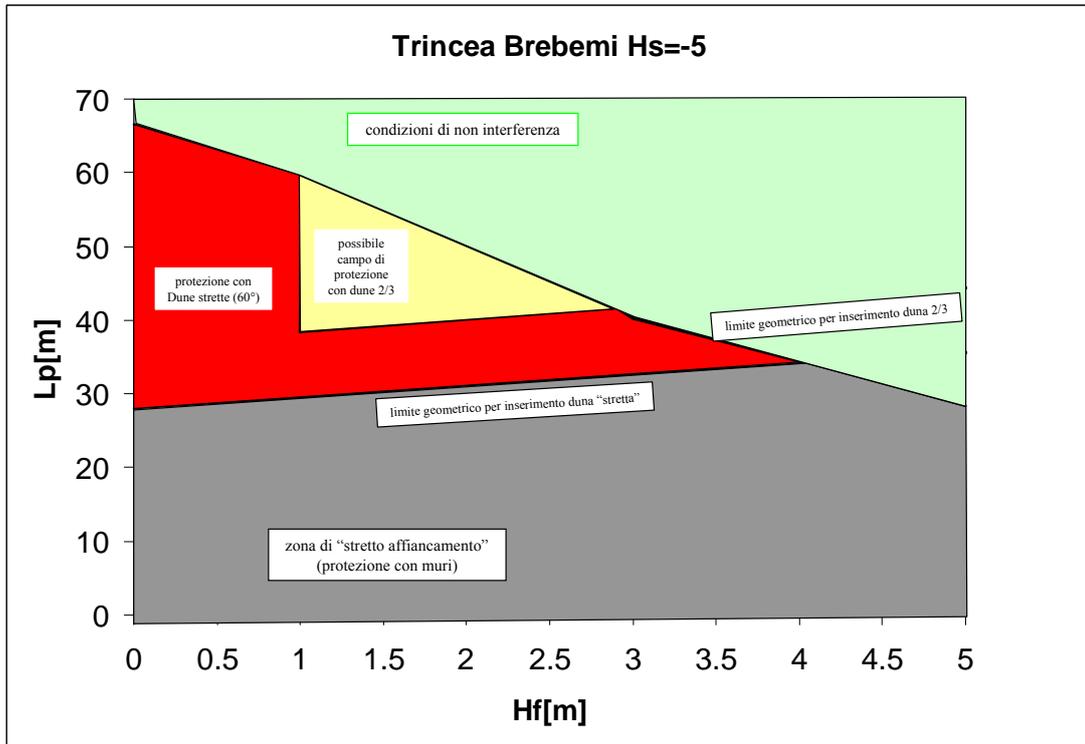


Figura 49 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea BREBEMI Hs=-5

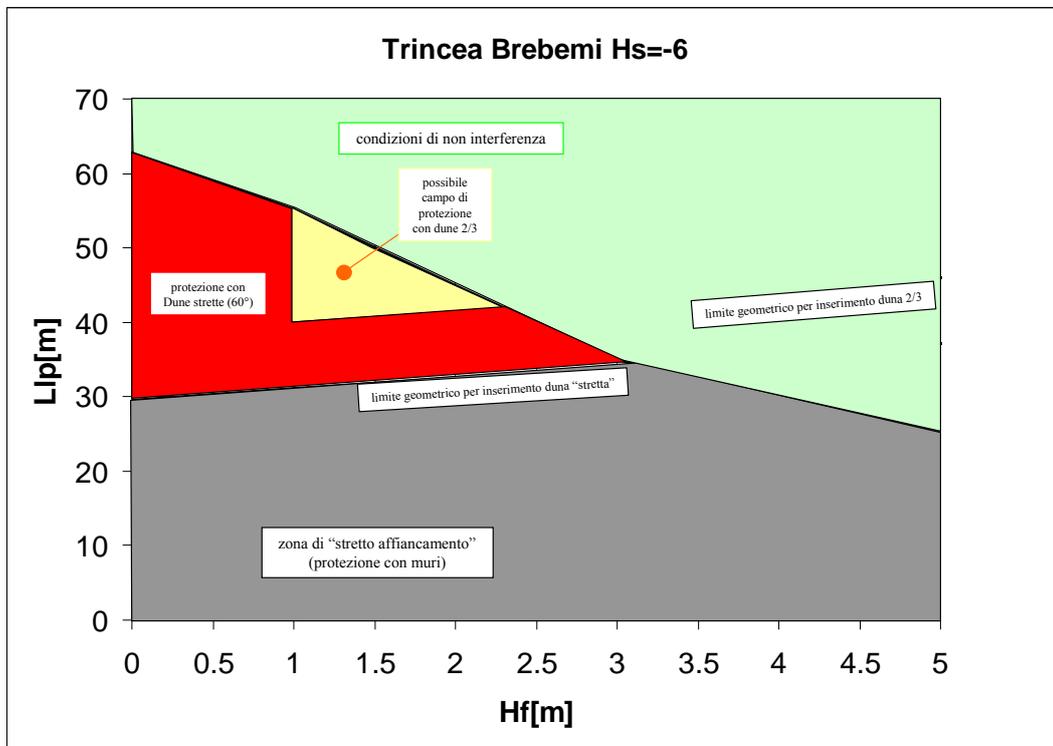


Figura 50 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea BREBEMI Hs=-6

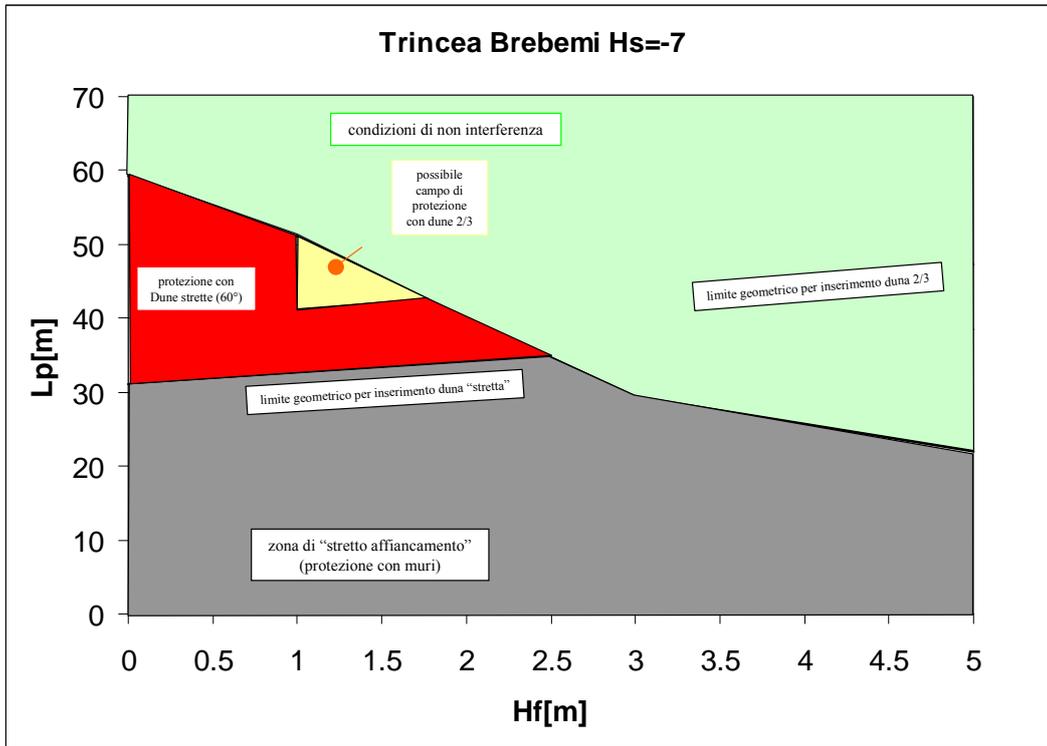


Figura 51 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea BREBEMI Hs=-7

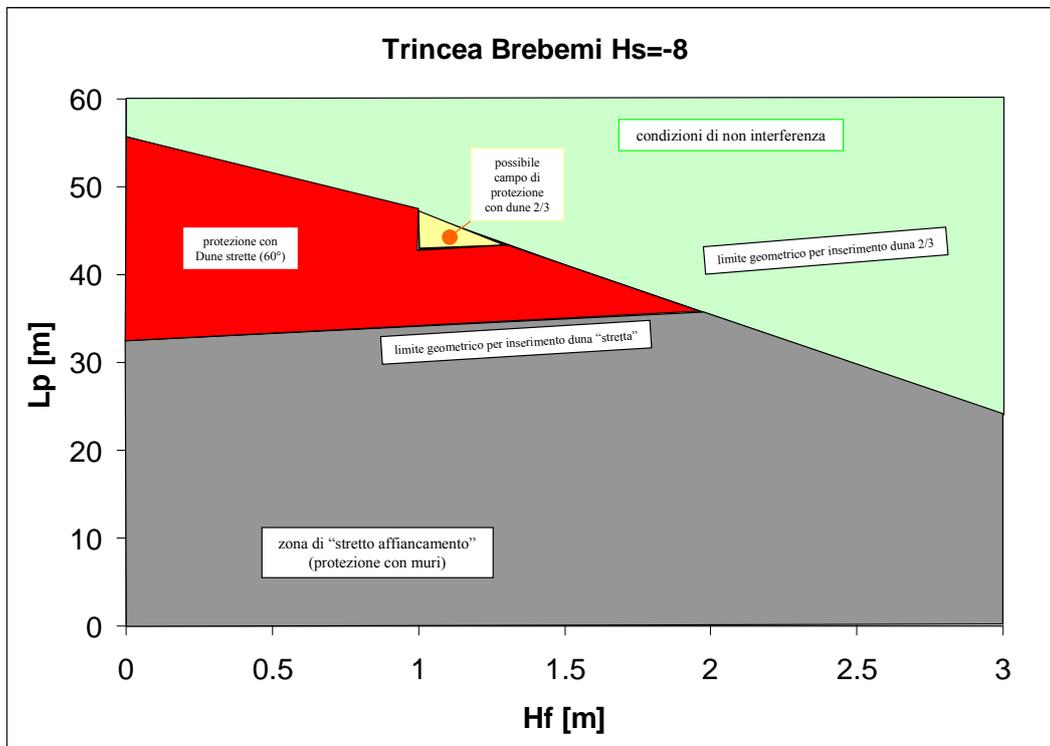


Figura 52 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea BREBEMI Hs=-8

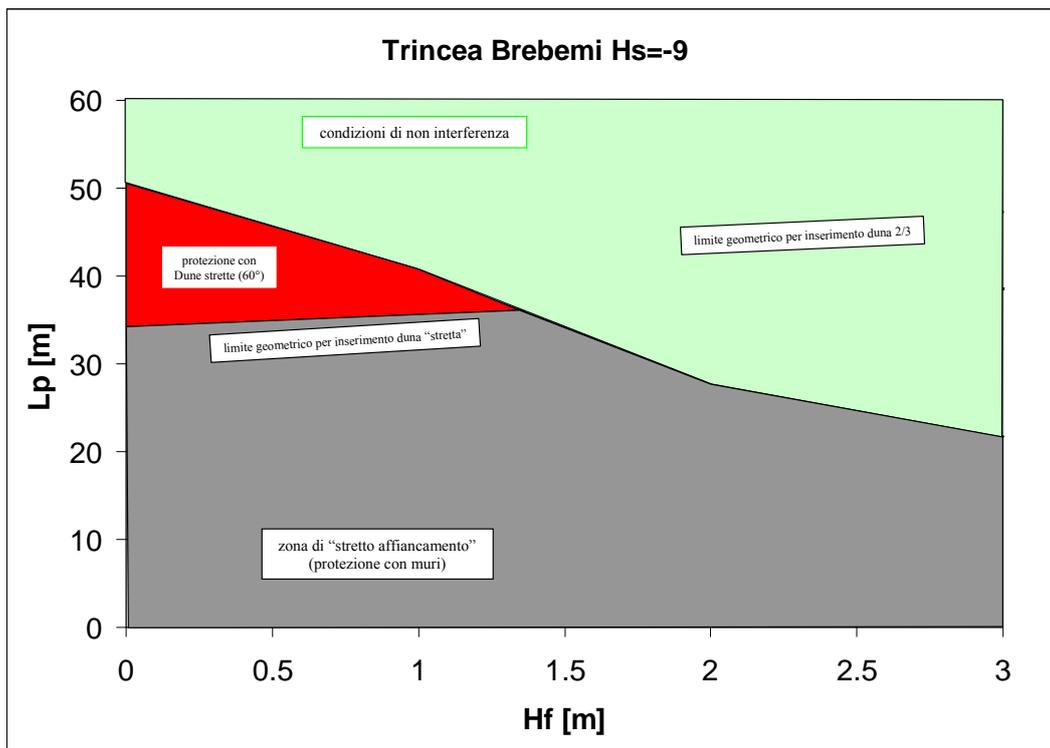


Figura 53 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea BREBEMI Hs=-9

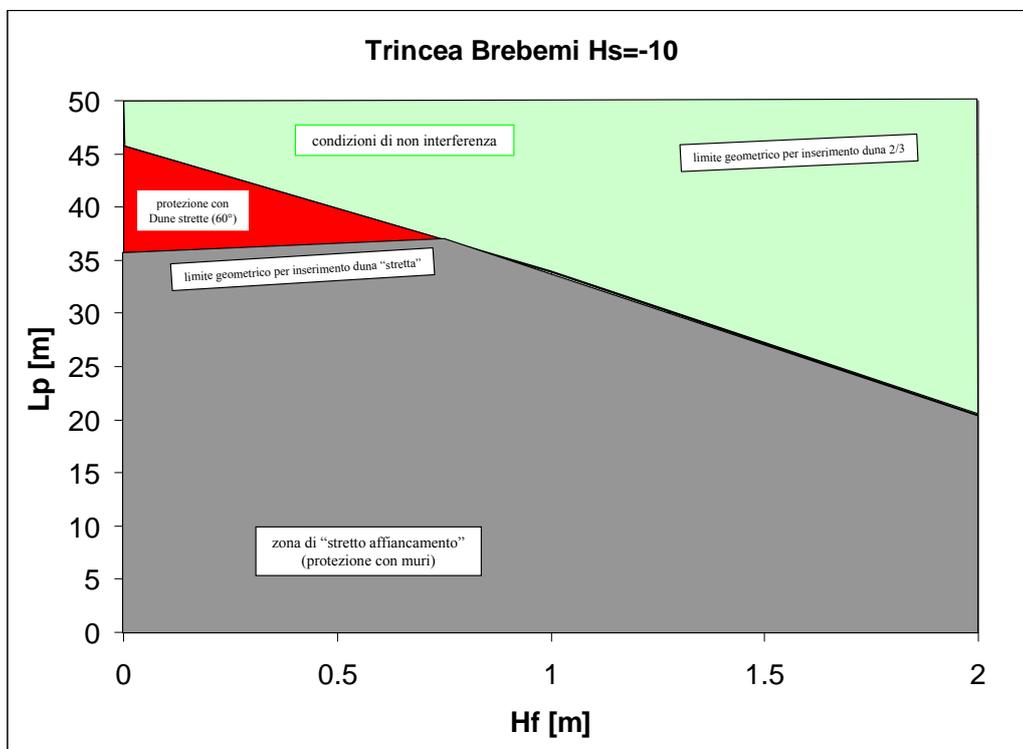


Figura 54 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea BREBEMI Hs=-10

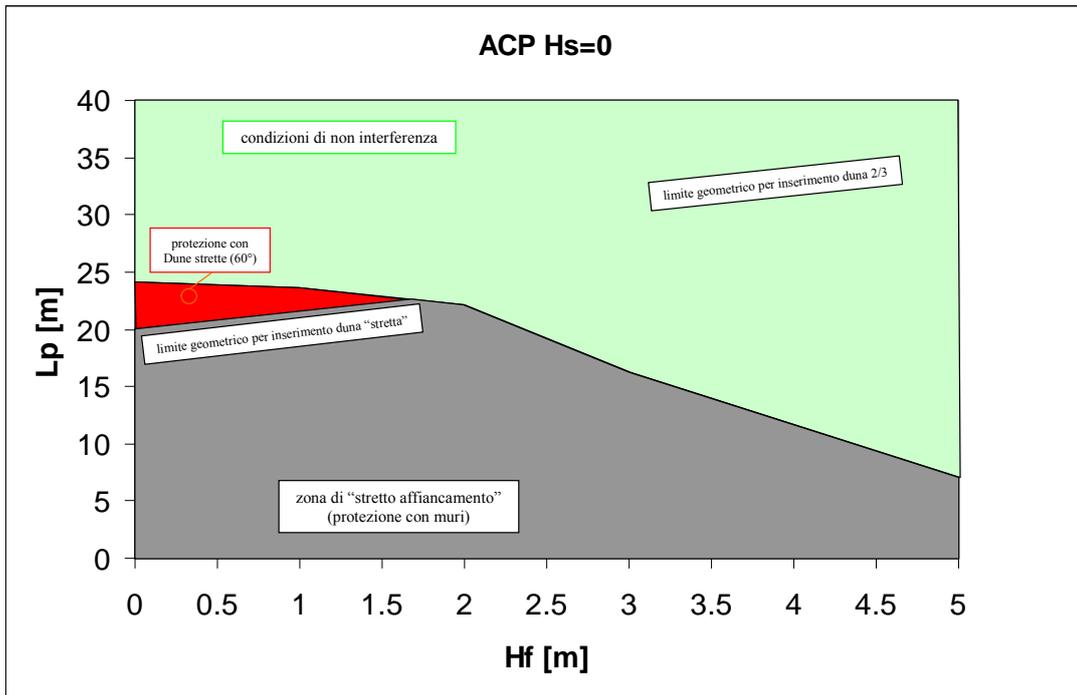


Figura 55 diagramma per la definizione delle opere di protezione Autostrada ACP con Hs=0

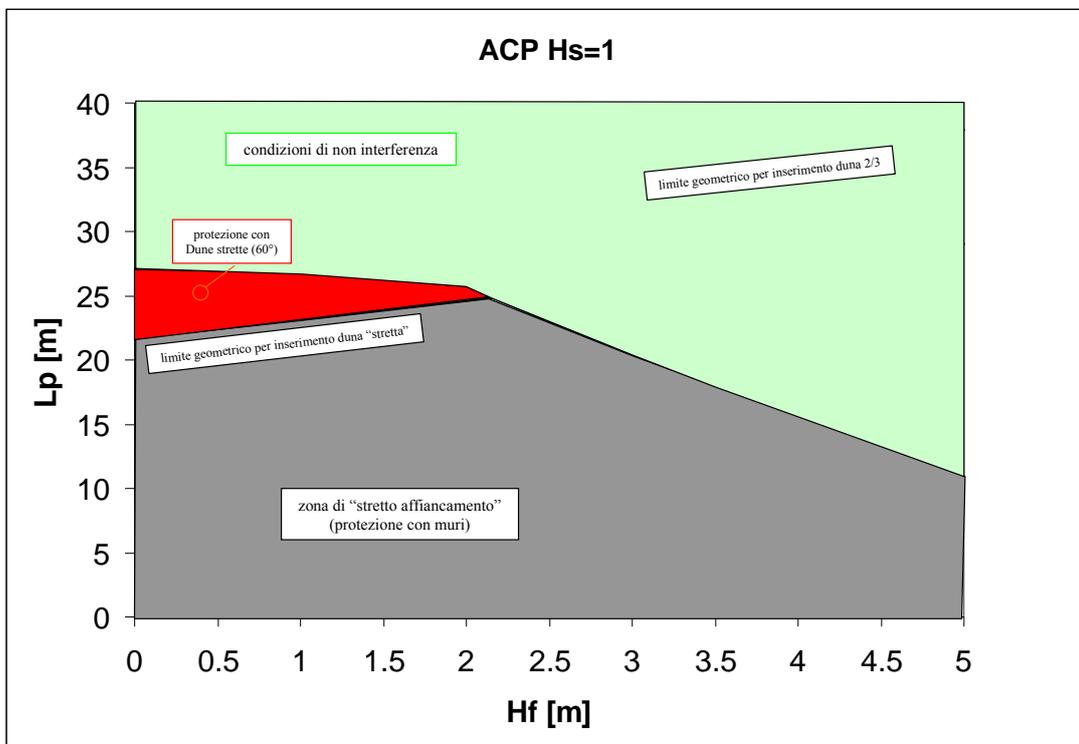


Figura 56 diagramma per la definizione delle opere di protezione Autostrada ACP con Hs=1

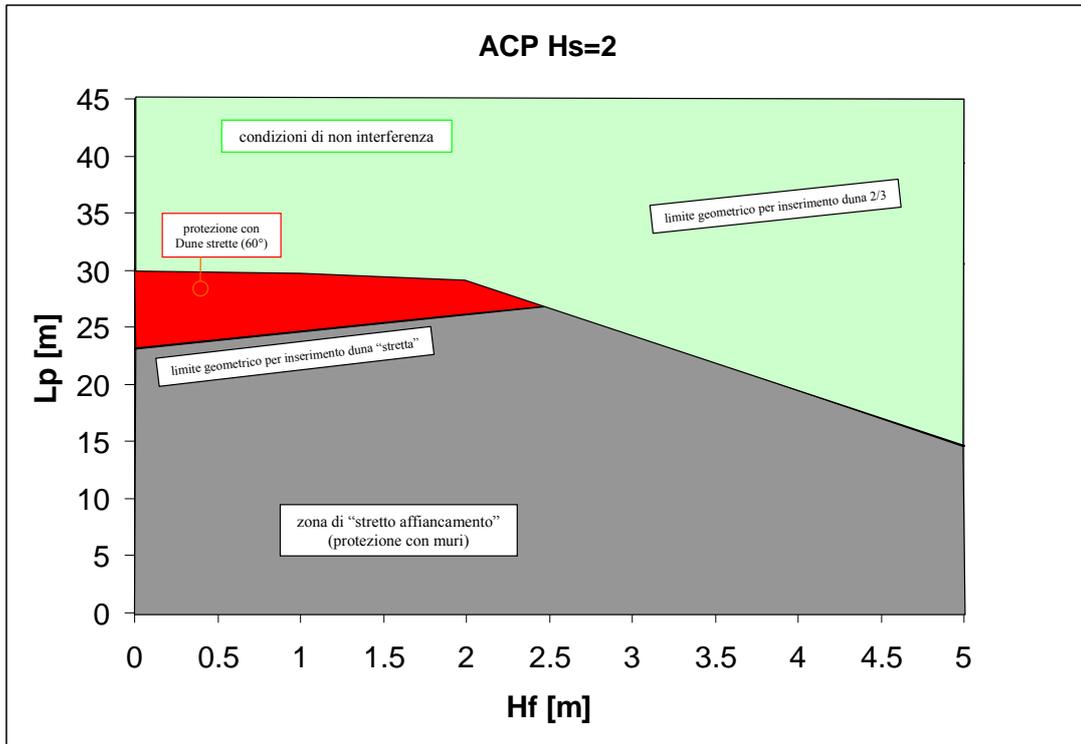


Figura 57 diagramma per la definizione delle opere di protezione Autostrada ACP con Hs=2

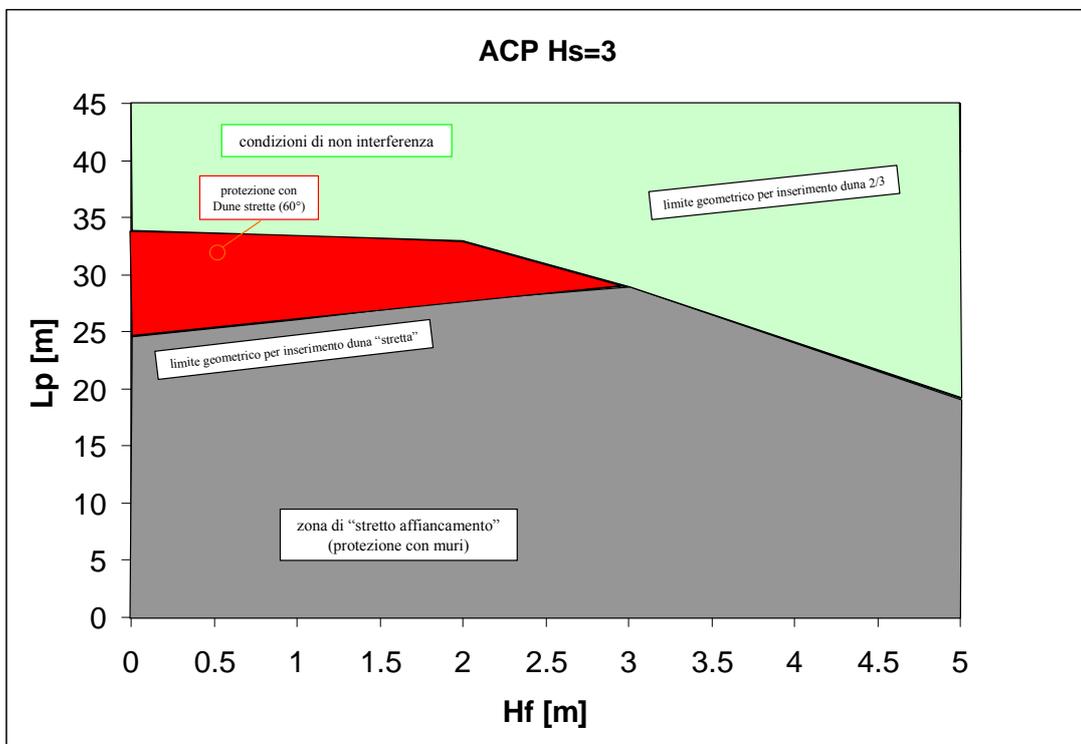


Figura 58 diagramma per la definizione delle opere di protezione Autostrada ACP con Hs=3

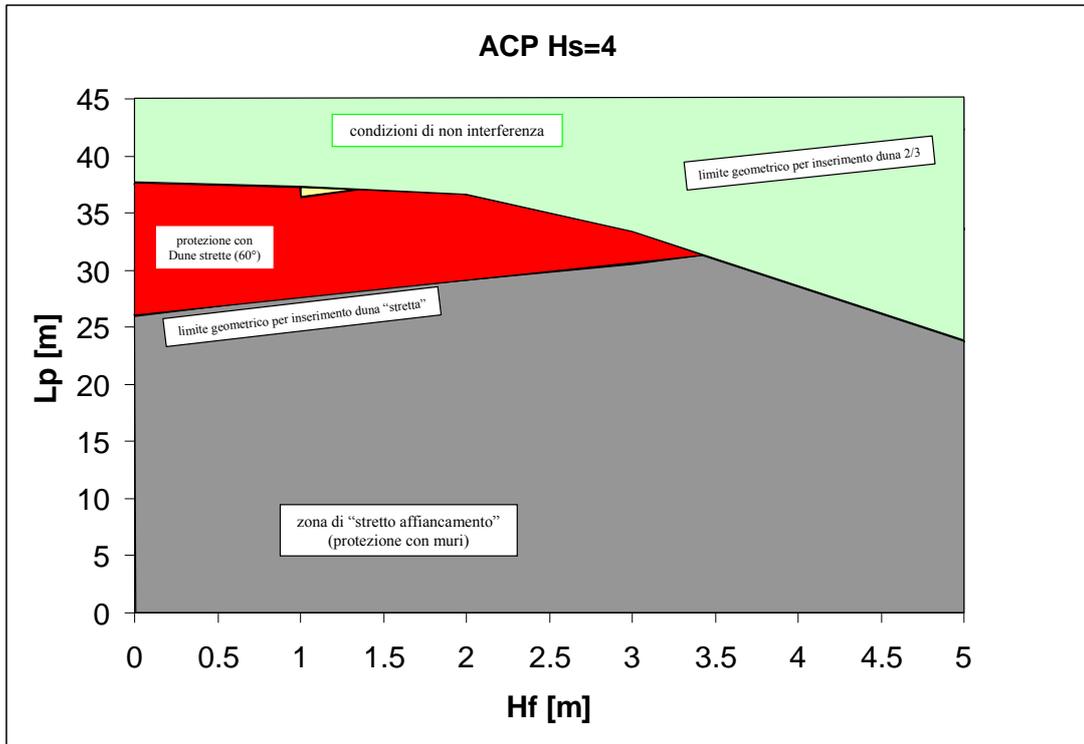


Figura 59 diagramma per la definizione delle opere di protezione Autostrada ACP con Hs=4

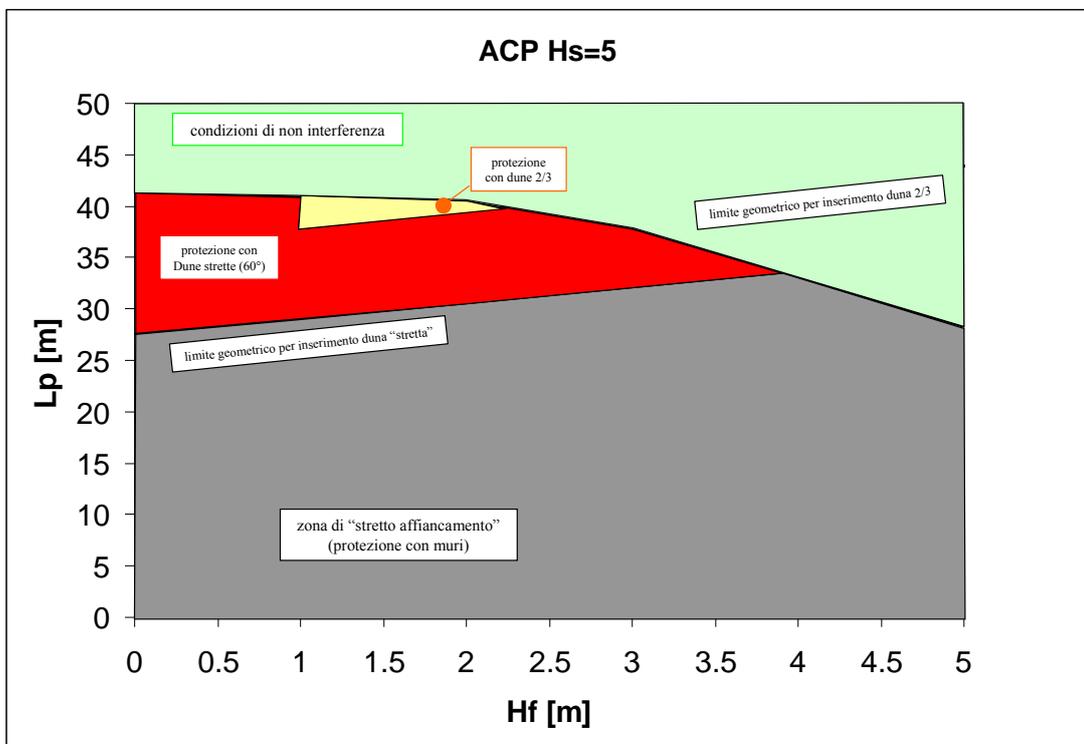


Figura 60 diagramma per la definizione delle opere di protezione Autostrada ACP con Hs=5

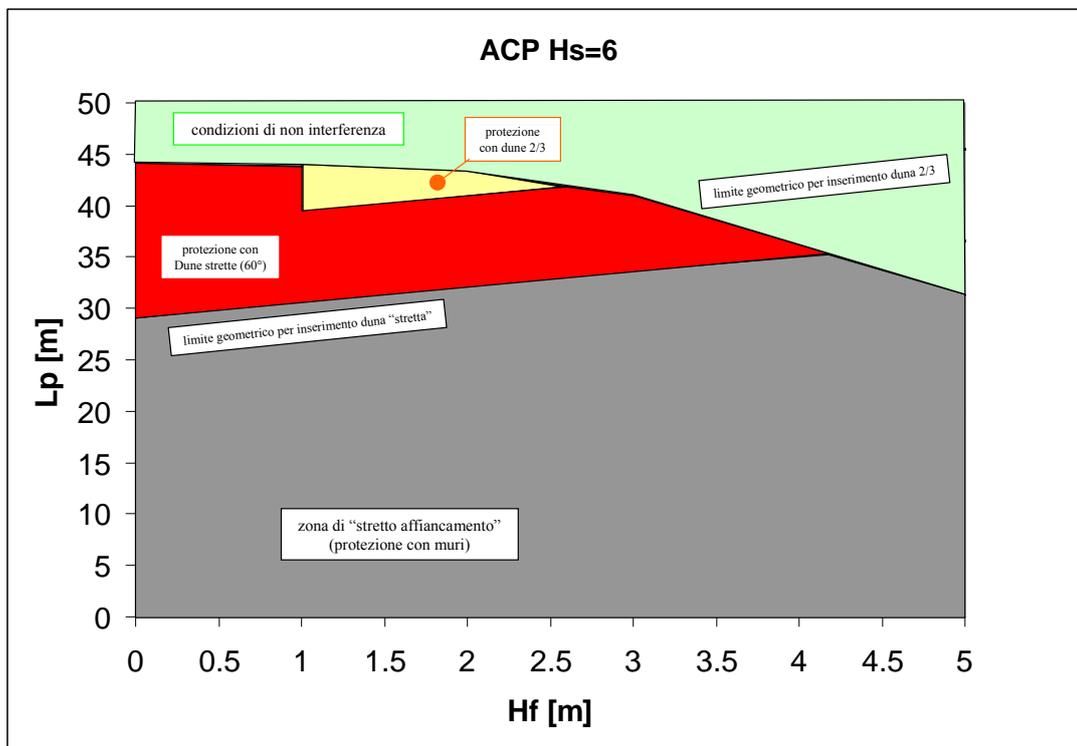


Figura 61 diagramma per la definizione delle opere di protezione Autostrada ACP con Hs=6

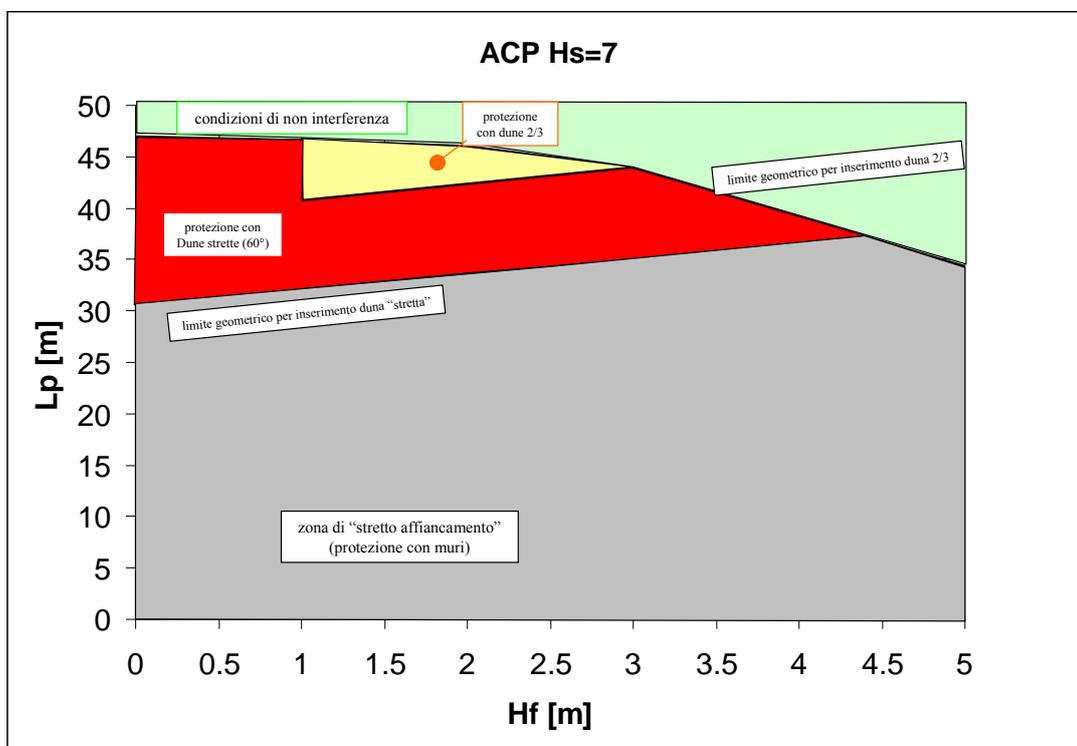


Figura 62 diagramma per la definizione delle opere di protezione Autostrada ACP con Hs=7

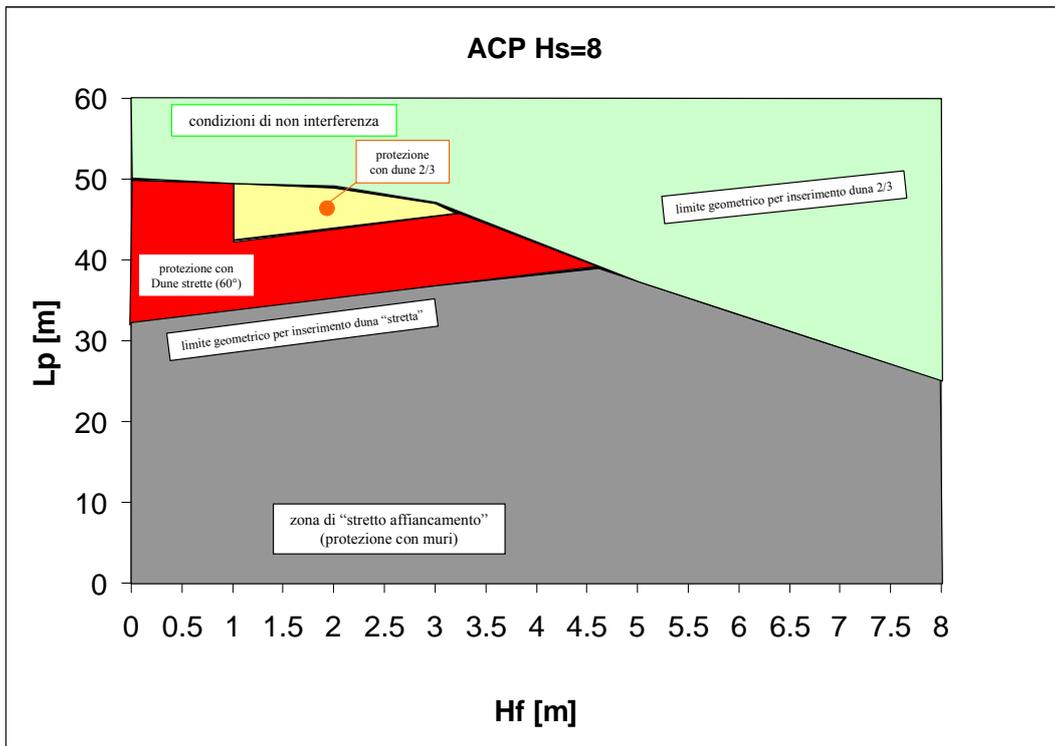


Figura 63 diagramma per la definizione delle opere di protezione Autostrada ACP con Hs=8

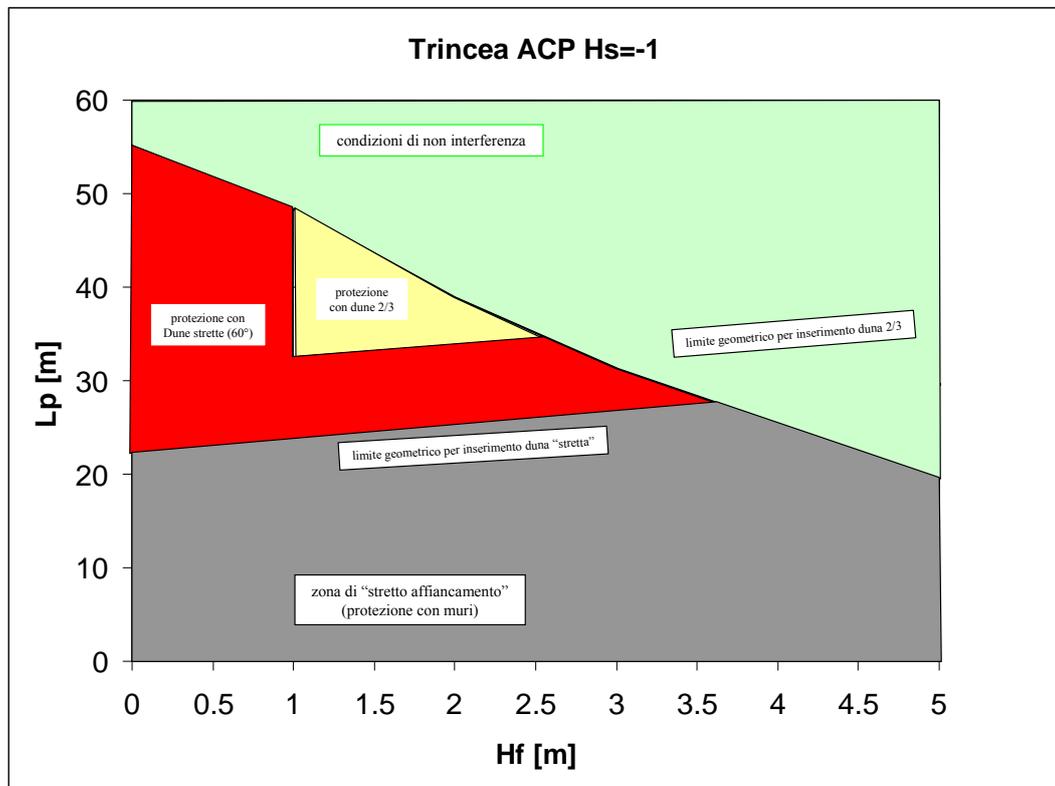


Figura 64 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea ACP Hs=-1

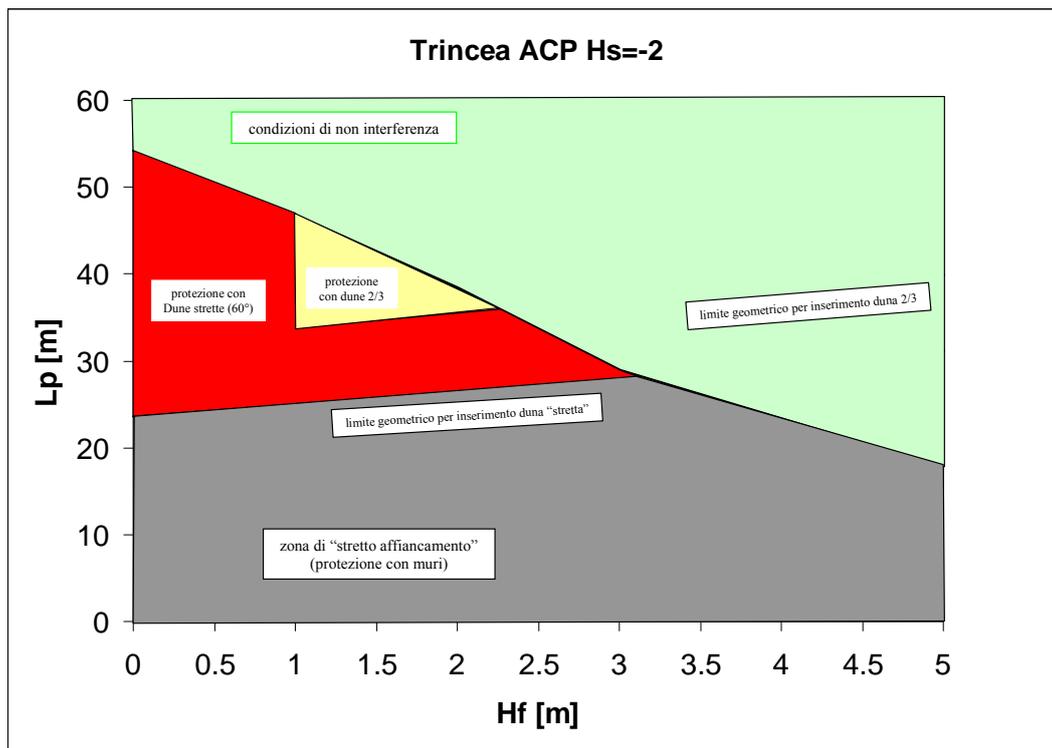


Figura 65 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea ACP Hs=-2

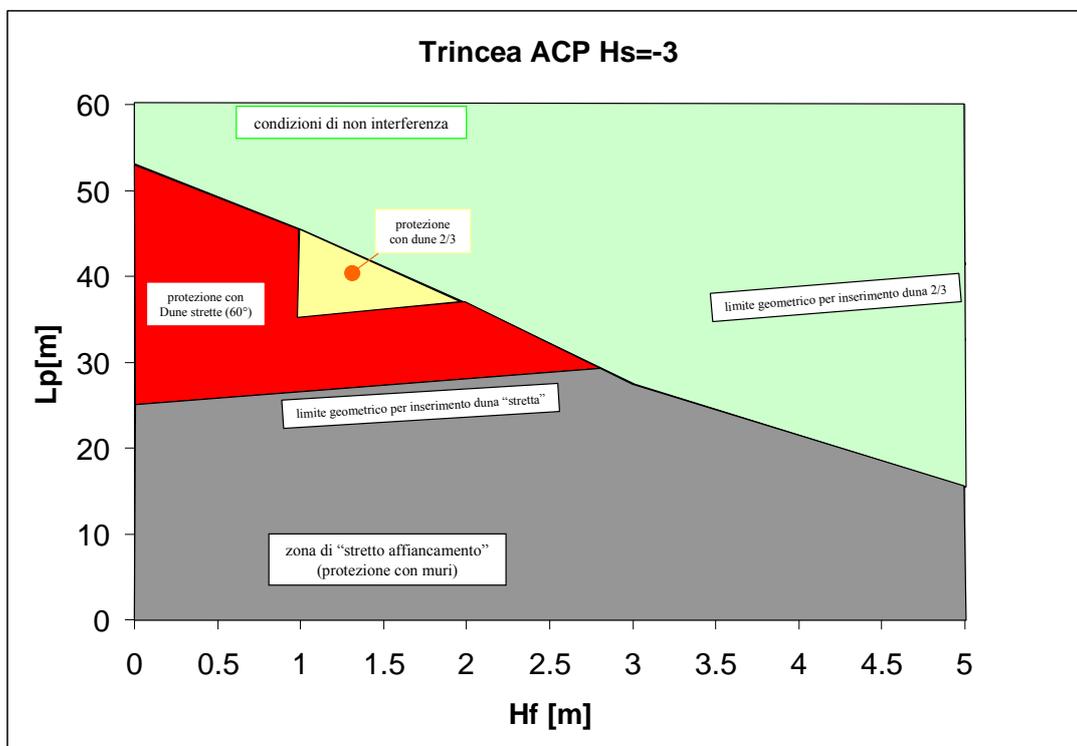


Figura 66 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea ACP Hs=-3

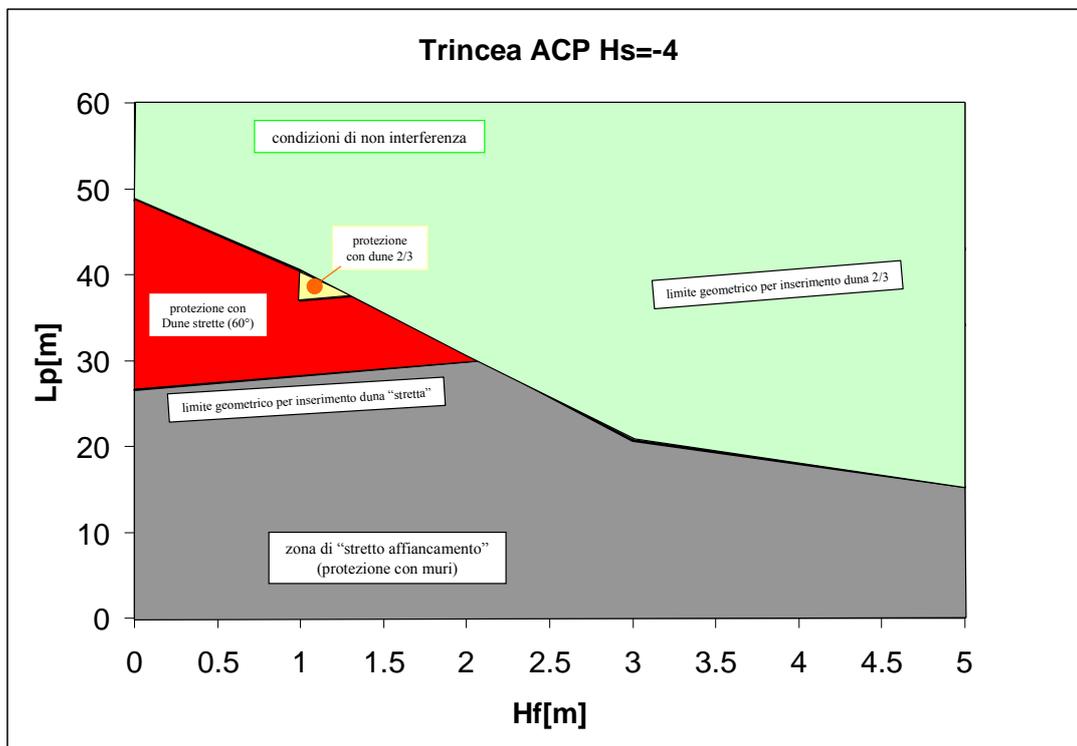


Figura 67 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea ACP con Hs=-4

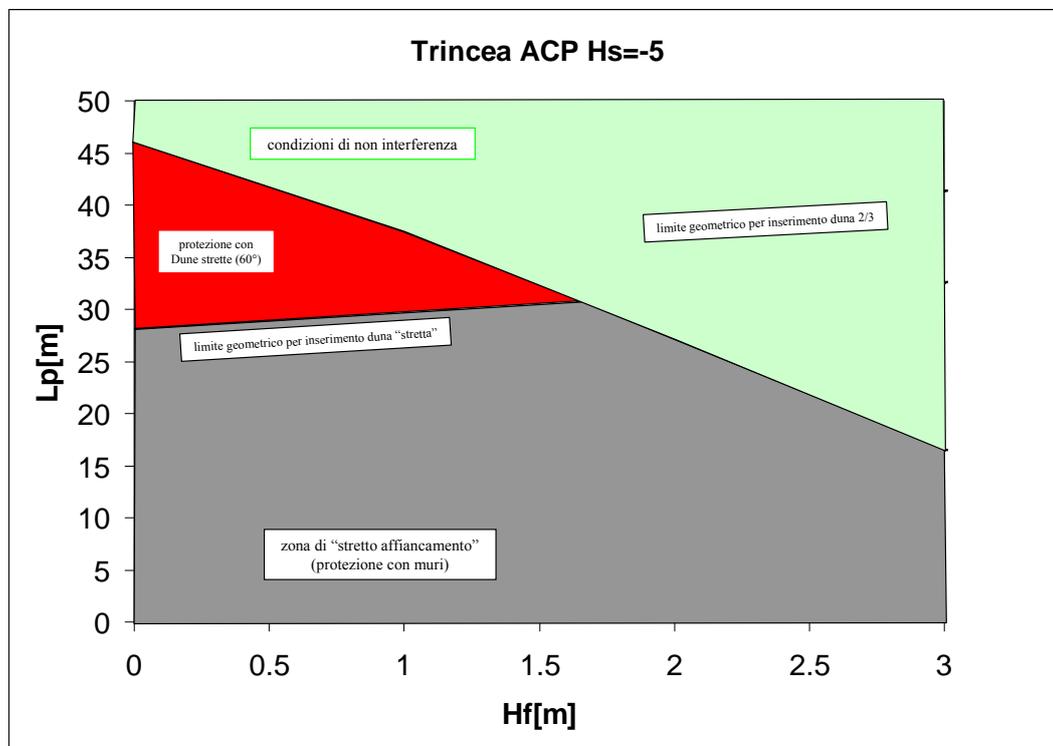


Figura 68 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea ACP Hs=-5

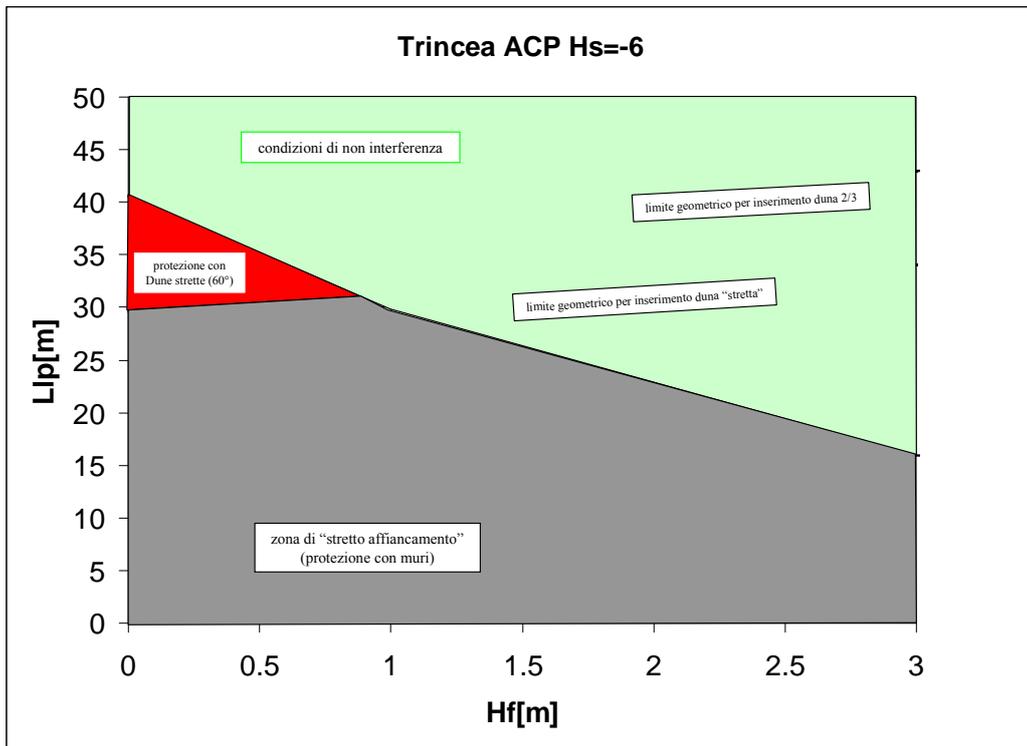


Figura 69 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea ACP Hs=-6

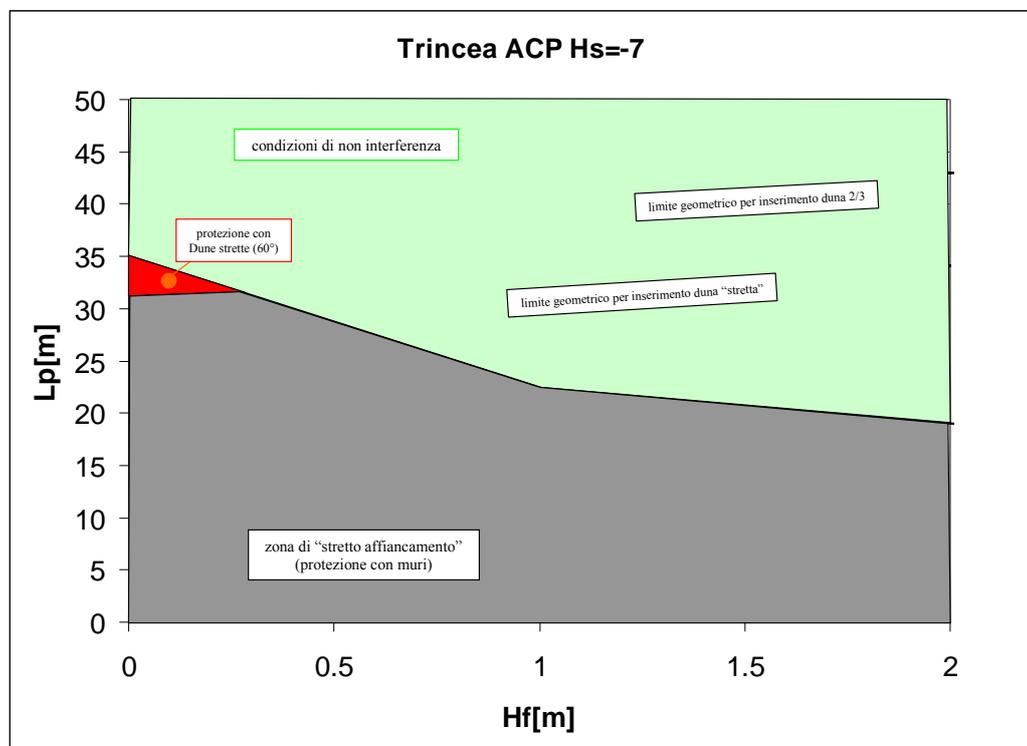


Figura 70 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea ACP Hs=-7

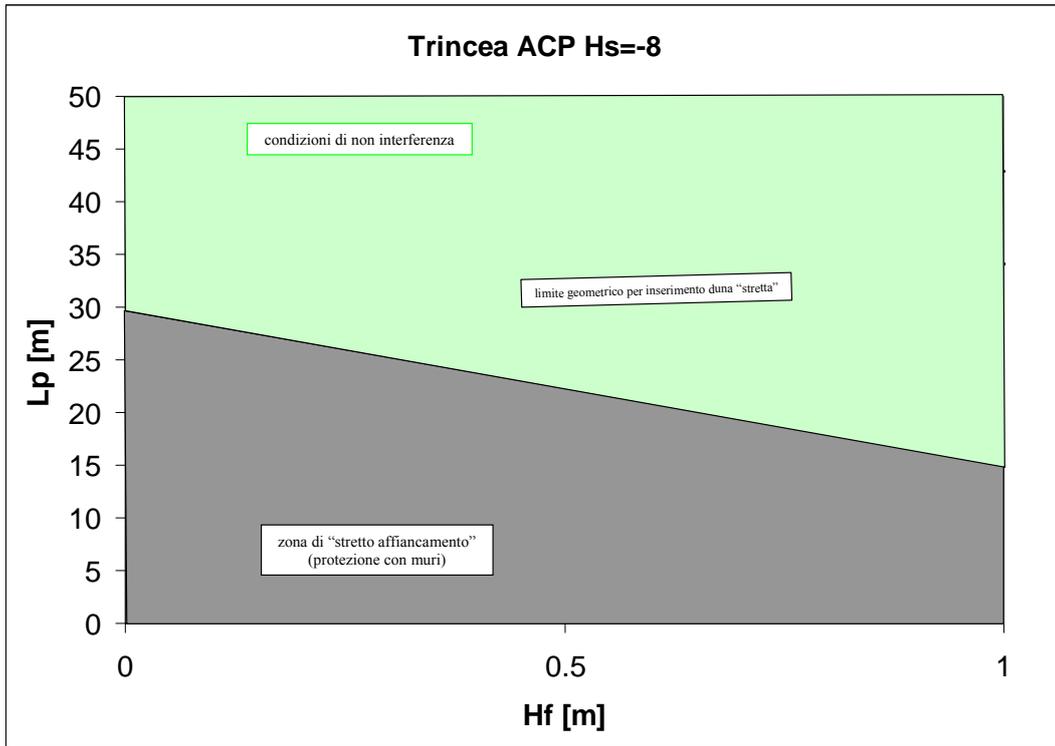


Figura 71 diagramma per la definizione delle opere di protezione in trincea ACP Hs=-8

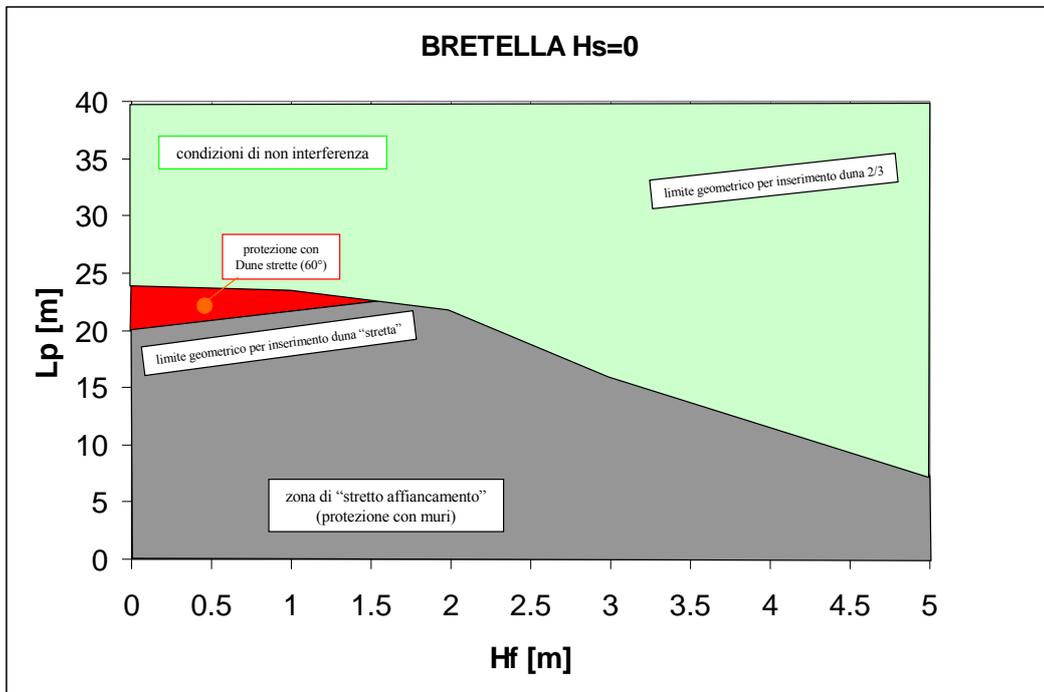


Figura 72 diagramma per la definizione delle opere di protezione BRETELLA Hs=0

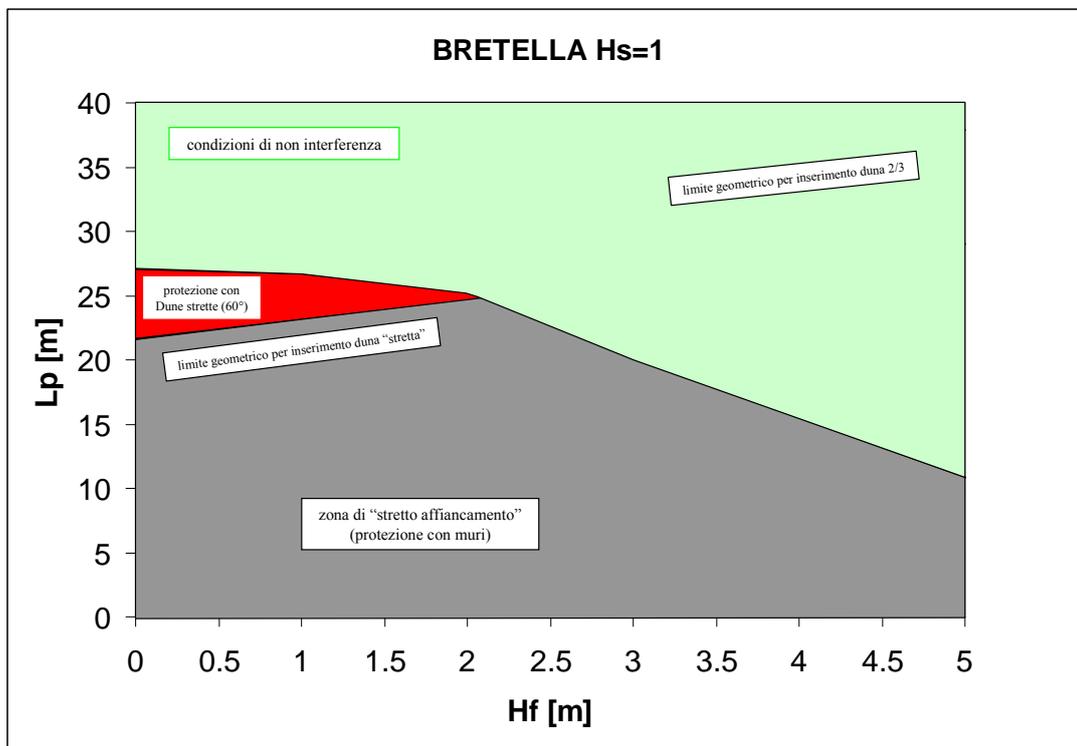


Figura 73 diagramma per la definizione delle opere di protezione BRETELLA Hs=1

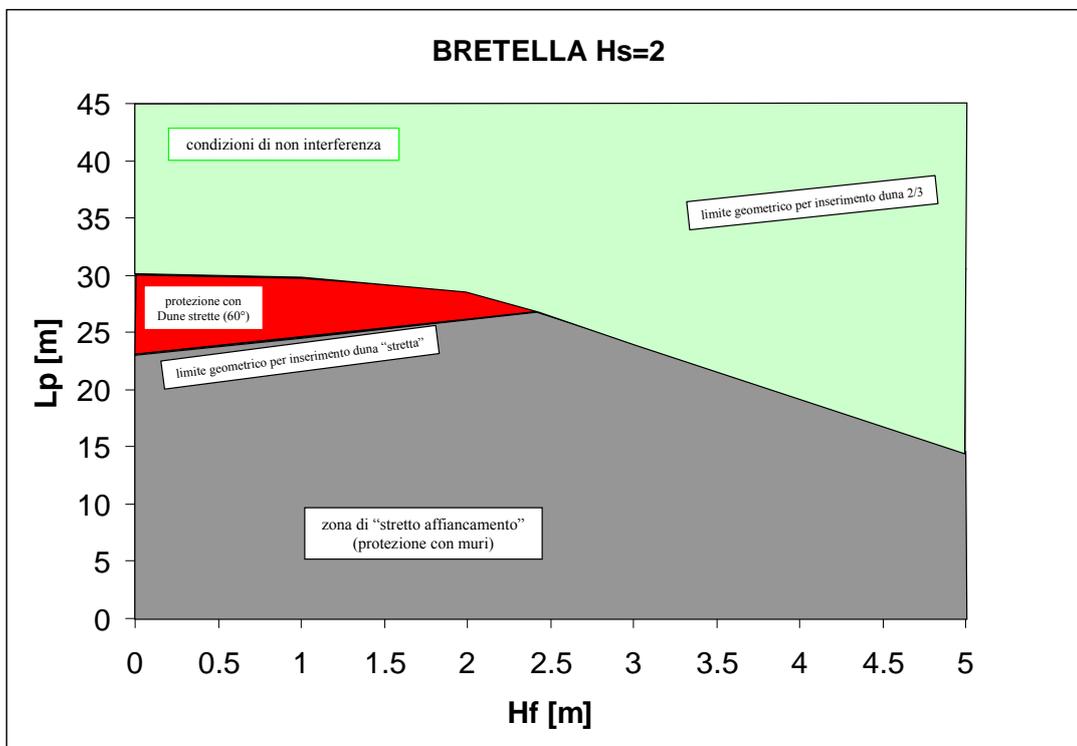


Figura 74 diagramma per la definizione delle opere di protezione BRETELLA Hs=2

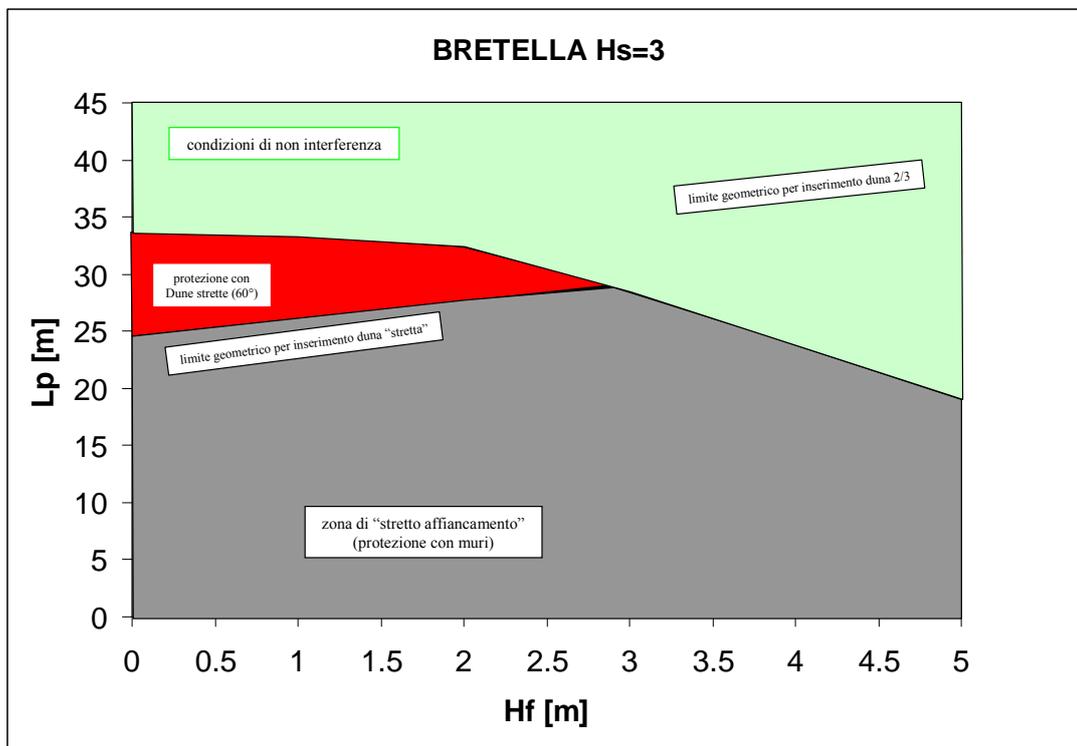


Figura 75 diagramma per la definizione delle opere di protezione BRETELLA Hs=3

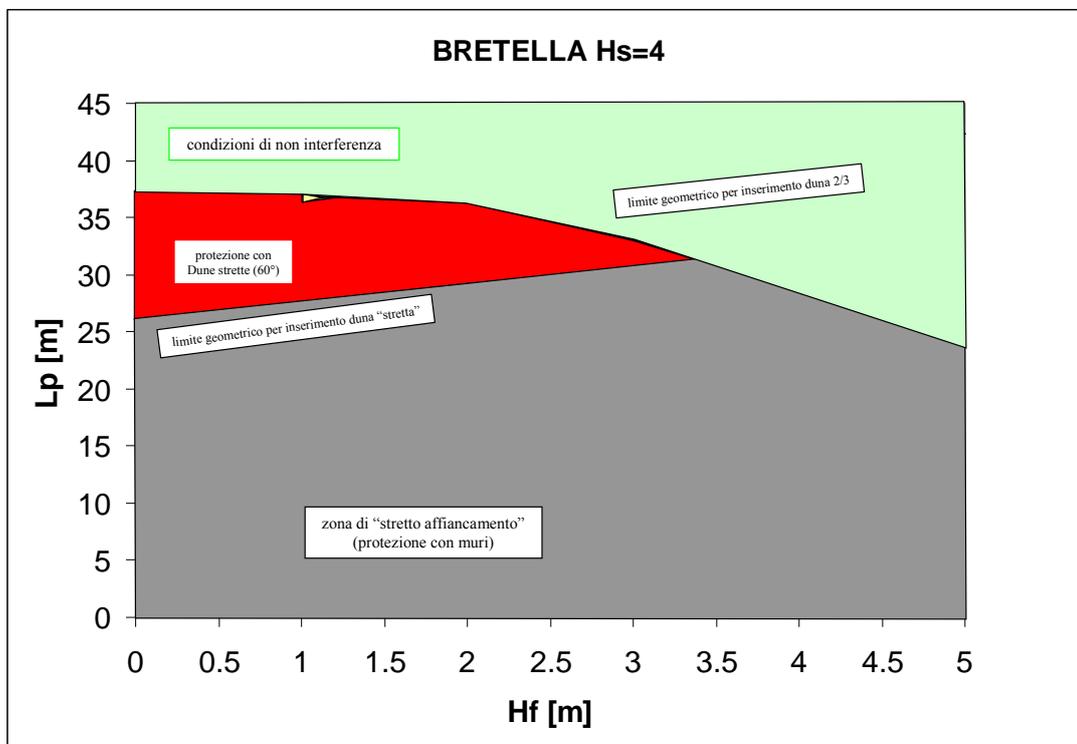


Figura 76 diagramma per la definizione delle opere di protezione BRETELLA Hs=4

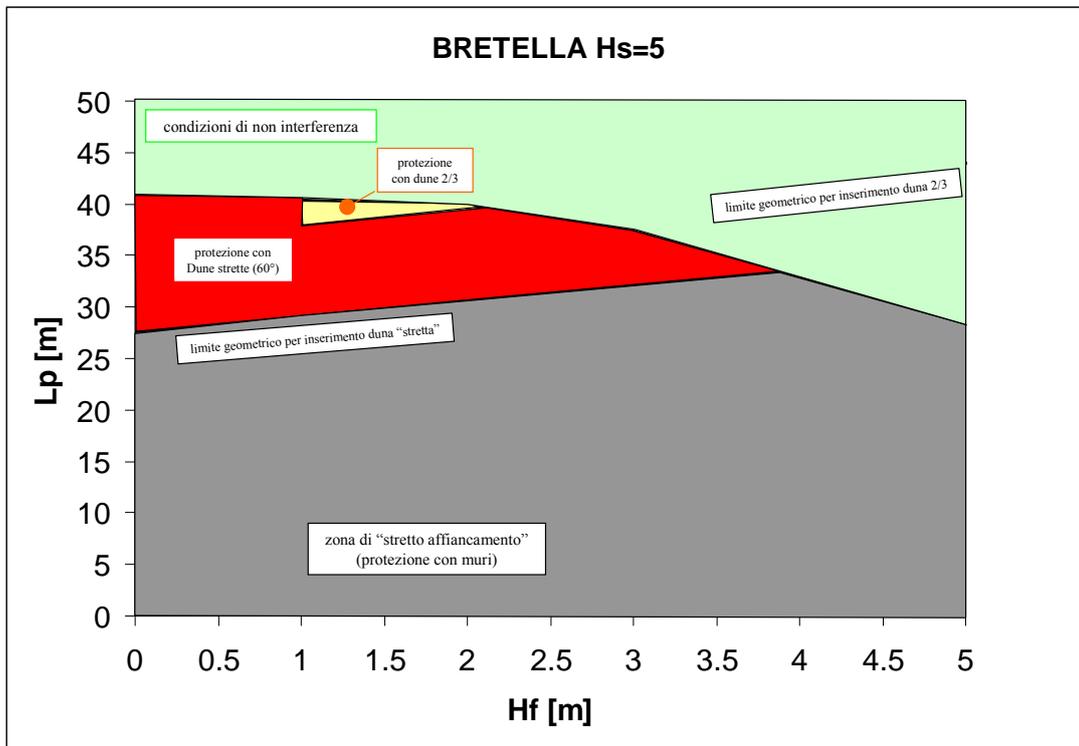


Figura 77 diagramma per la definizione delle opere di protezione BRETELLA Hs=5

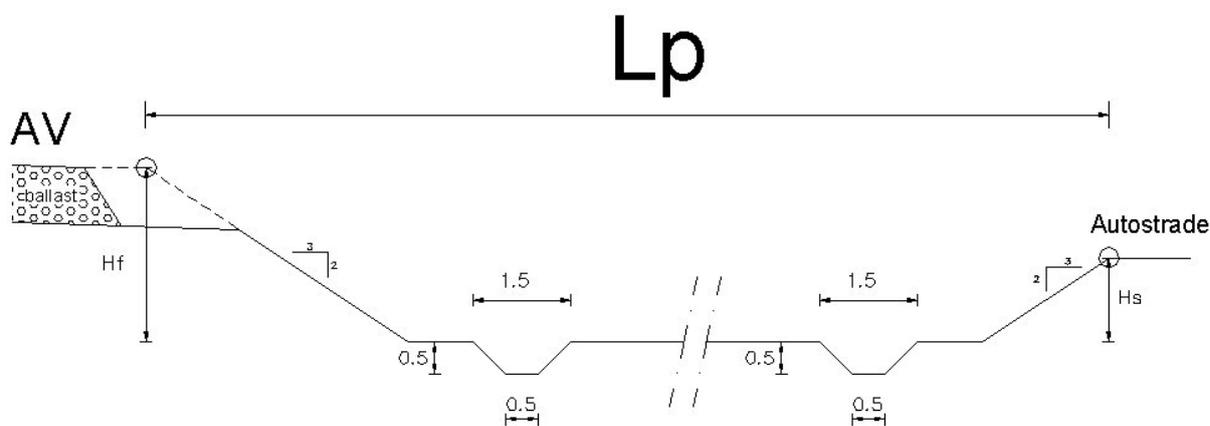


Figura 78: rappresentazione schematica della sezione trasversale dell'area interclusa nelle zone di non interferenza

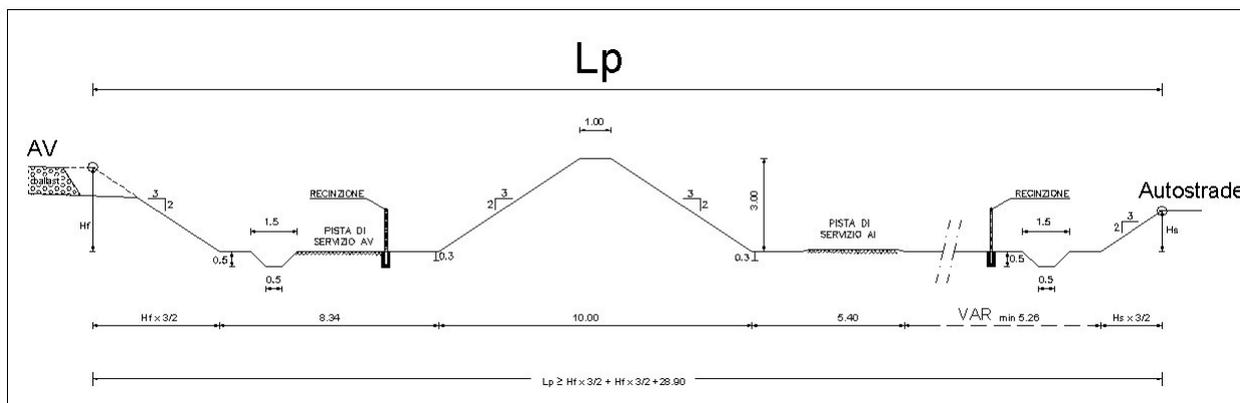


Figura 79: rappresentazione schematica della sezione trasversale dell'area interclusa nelle zone di affiancamento con protezione realizzata mediante duna in terra con scarpate 2/3

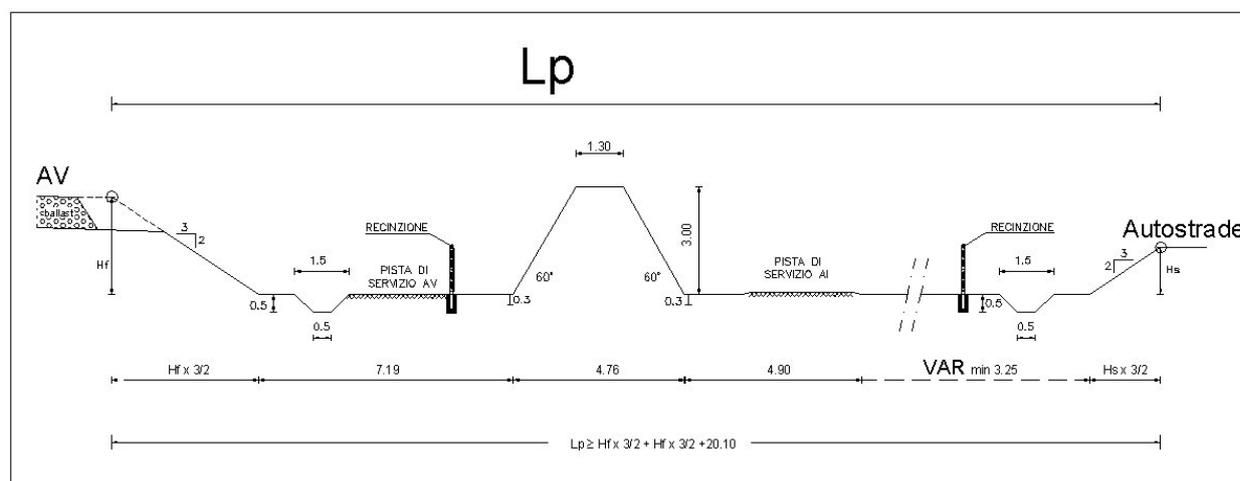


Figura 80: rappresentazione schematica della sezione trasversale dell'area interclusa nelle zone di affiancamento con protezione realizzata mediante duna invalicabile in terra con angolo di scarpa pari a 60°

### 7.3 Definizione del tipo di protezione richiesta nella zona di stretto affiancamento

Nelle zone dove lo spazio non è sufficiente per inserire una duna "stretta" di tipo invalicabile la protezione dovrà essere garantita mediante la realizzazione di opere in c.a. poste sul corpo del rilevato della linea AV o all'interno dell'area interclusa.

Questa situazione, definita di "stretto affiancamento", può essere risolta mediante le seguenti modalità di protezione:

- tipologia 1. muro in c.a. di sostegno del rilevato ferroviario;
- tipologia 2. muro in c.a. di protezione posto alla sommità del rilevato ferroviario;
- tipologia 3. muro in c.a. di protezione posto all'interno dell'area interclusa;

Per la definizione della soluzione di protezione da adottare si può far riferimento al seguente schema:

Configurazione geometrica dell'area interclusa	Tipologia di protezione	Sezione schematica di riferimento
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hf qualunque</li> <li>• Distanza tra autostrada e AV tale da dover realizzare:</li> <li>➤ rilevato autostrada con muro di sostegno</li> <li>➤ rilevato AV con muro di sostegno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ tipologia 1</li> <li>✓ Hmuro di sostegno della AV definito in base al diagramma di Figura 87</li> </ul>	Figura 81
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hf qualunque</li> <li>• distanza tra autostrada e AV tale da poter realizzare la scarpata della A1 ma non quella del rilevato AV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ tipologia 1</li> <li>✓ Hmuro di sostegno<sup>3,3</sup> della AV = 4m</li> </ul>	Figura 82
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hf qualunque</li> <li>• distanza tra autostrada e AV tale da poter realizzare la scarpata di entrambi i rilevati</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ tipologia 1</li> <li>✓ Hmuro di sostegno<sup>4</sup> della AV = 4m</li> <li>oppure</li> <li>✓ tipologia 3</li> <li>✓ Hmuro in c.a. all'interno dell'AI = 3.00 m</li> </ul>	Figura 83  Figura 85
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hf ≥ di 1.5 m</li> <li>• distanza tra autostrada e AV tale da poter realizzare la scarpata di entrambi i rilevati</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ tipologia 2</li> <li>✓ Hmuro in c.a. sulla sommità del rilevato della AV = 3 m</li> <li>oppure<sup>5</sup></li> <li>✓ tipologia 3</li> <li>✓ Hmuro in c.a. all'interno dell'AI = 1.9 m</li> </ul>	Figura 84  Figura 86

Si noti che, nelle zone di “stretto affiancamento”, non è stato possibile far riferimento al parametro Lp per la definizione delle configurazioni geometriche in quanto questo è definito, nel documento A20200DE2EXSC0000076 sulla determinazione delle condizioni di interferenza, considerando il cosiddetto “punto virtuale” sul rilevato della linea AV. Questo è identificato, per ciascuna sezione, come ideale intersezione tra il piano costituito dalla scarpata del rilevato ed il piano orizzontale passante per il piano d'appoggio delle rotaie.

<sup>3</sup> nel caso in cui il ciglio del rilevato ferroviario (quota del piano del ferro - altezza del ballast) si trovi ad una quota non inferiore a 4 m sul piano campagna il muro di sostegno può essere sostituito da un muro di sottoscarpa di altezza non inferiore ad 1.50 m. La quota a cui si trova la testa del muro può essere, qualora lo spazio lo consenta, raccordata alla sommità del rilevato con una scarpata con pendenza 2/3.

<sup>4</sup> Per le configurazioni dove l'altezza del muro è superiore alla altezza del rilevato ferroviario potranno essere analizzate soluzioni con tipologia di opera di protezione differenziata tra la parte bassa del rilevato, fino ad una altezza dal piano campagna di 1.90 m (zona colpita dal veicolo in svio) e la parte superiore che deve proteggere solo l'invasione della sede ferroviaria da parte del carico trasportato.

<sup>5</sup> Soluzione da limitare alla risoluzione di problemi localizzati.

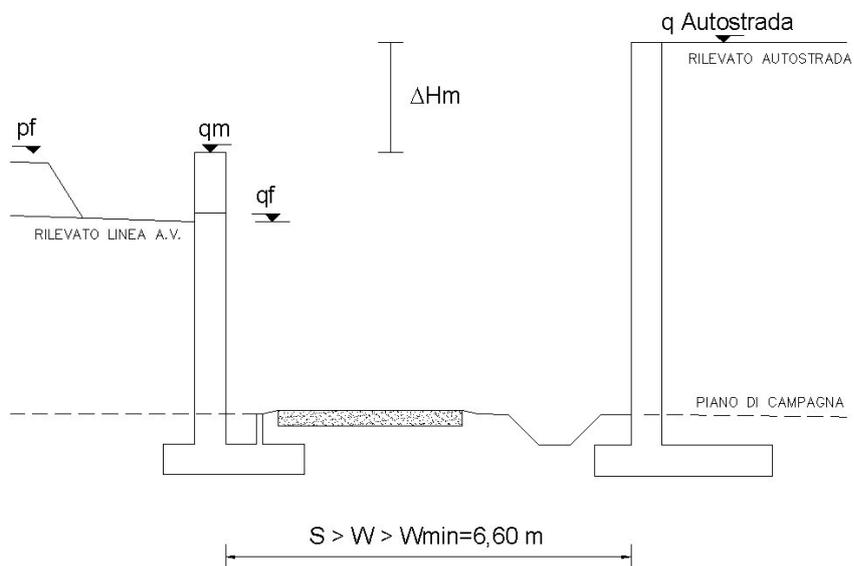


Figura 81: rappresentazione schematica della sezione trasversale con muri di sostegno sul rilevato dell'autostrada e sul rilevato della AV (tipologia di protezione 1, sezione tipologica 1)

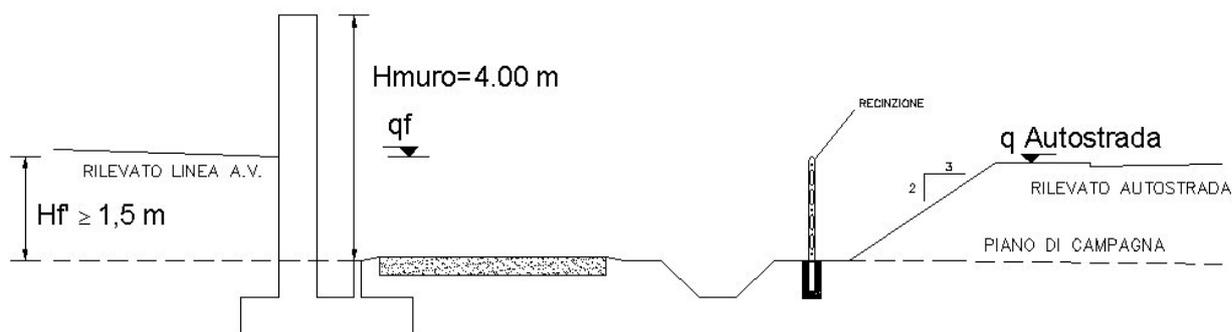


Figura 82: rappresentazione schematica della sezione trasversale con scarpata sul rilevato dell'autostrada e muro a sostegno del rilevato della AV (tipologia di protezione 1, sezione tipologica 1')

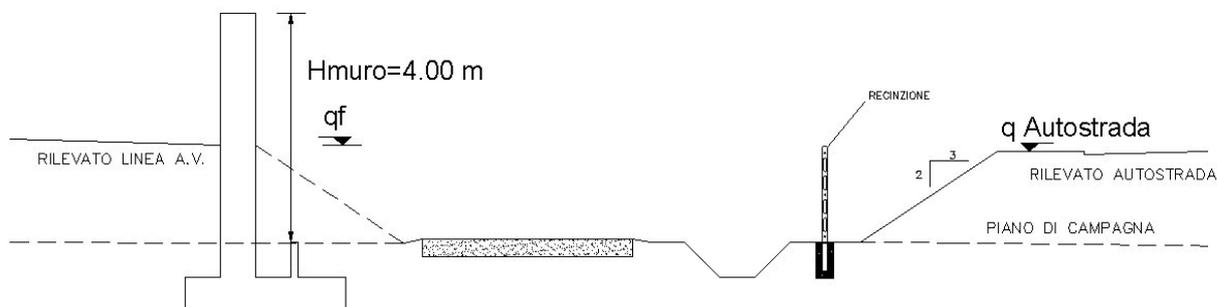


Figura 83: rappresentazione schematica della sezione trasversale con scarpata sul rilevato dell'autostrada e muro a protezione del rilevato della AV, per  $H_f < 1.5\text{ m}$  (tipologia di protezione 1, sezione tipologica 1'')

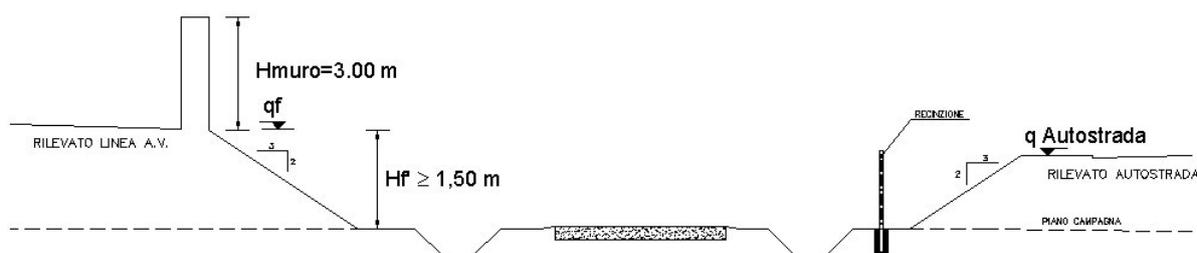


Figura 84: rappresentazione schematica della sezione trasversale con scarpata sul rilevato dell'autostrada e muro in c.a. sulla sommità della scarpata del rilevato della AV (tipologia di protezione 2, sezione tipologica 2)

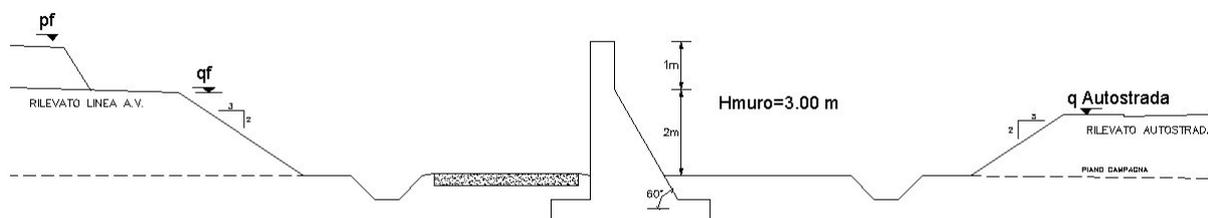


Figura 85: rappresentazione schematica della sezione trasversale con scarpata sul rilevato dell'autostrada e muro in c.a. all'interno dell'area interclusa di altezza pari a 3 m (tipologia di protezione 3, sezione tipologica 3).

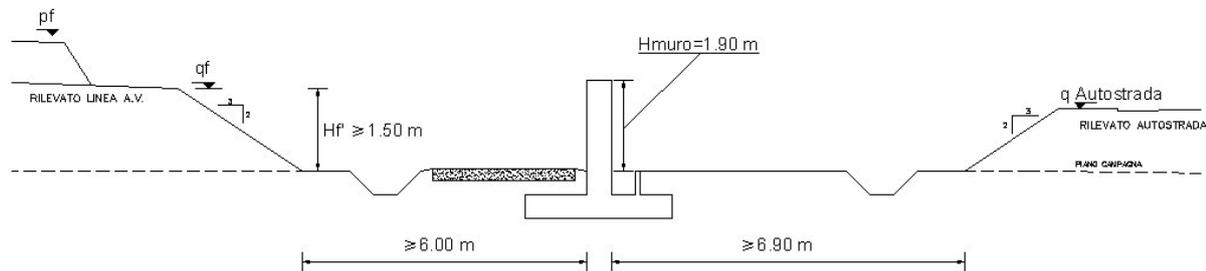


Figura 86: rappresentazione schematica della sezione trasversale con scarpata sul rilevato dell'autostrada e muro in c.a. all'interno dell'area interclusa di altezza ridotta pari ad 1.90 m (tipologia di protezione 3, sezione tipologica 3').

Poiché nelle zone di stretto affiancamento le condizioni di vincolo geometrico sono poste a partire dal piede dei muri di sostegno il passaggio da questo parametro al parametro  $L_p$  richiede di passare attraverso la larghezza del muro, non nota a priori. Si è quindi ritenuto più opportuno trattare le zone di stretto affiancamento definendo le condizioni di vincolo geometrico in modo indipendente rispetto al parametro  $L_p$  adottato per le zone di affiancamento.

Per la definizione dell'altezza minima del muro in corrispondenza del rilevato AV da realizzare nella configurazione con muri di sostegno su entrambi i rilevati si deve far riferimento al diagramma di Figura 87 per la A4, al diagramma di Figura 88 per la BRE-BE-MI ed al diagramma Figura 89 per ACP e BRETELLA. In questo diagramma è riportato il minimo valore di dislivello che si deve avere tra la quota della testa del muro di sostegno dalla AV ( $q_m$ ) e quella del bordo esterno della banchina della autostrada ( $q_A$ ) affinché un mezzo in svio non invada la sede ferroviaria, per una data distanza  $W$  tra il piede dei due muri, cioè  $\Delta H_m = q_m - q_A$ .

Quando  $\Delta H_m$  risulta  $< 0$  significa che la testa del muro della AV si può trovare a quota minore della testa del muro dell'autostrada ma il dislivello non deve essere superiore al valore assoluto del valore di  $\Delta H_m$  letto dal diagramma.

Nel diagramma è campita la zona di non applicabilità dove la distanza tra il piede dei muri è inferiore al minimo necessario per realizzare questa soluzione.

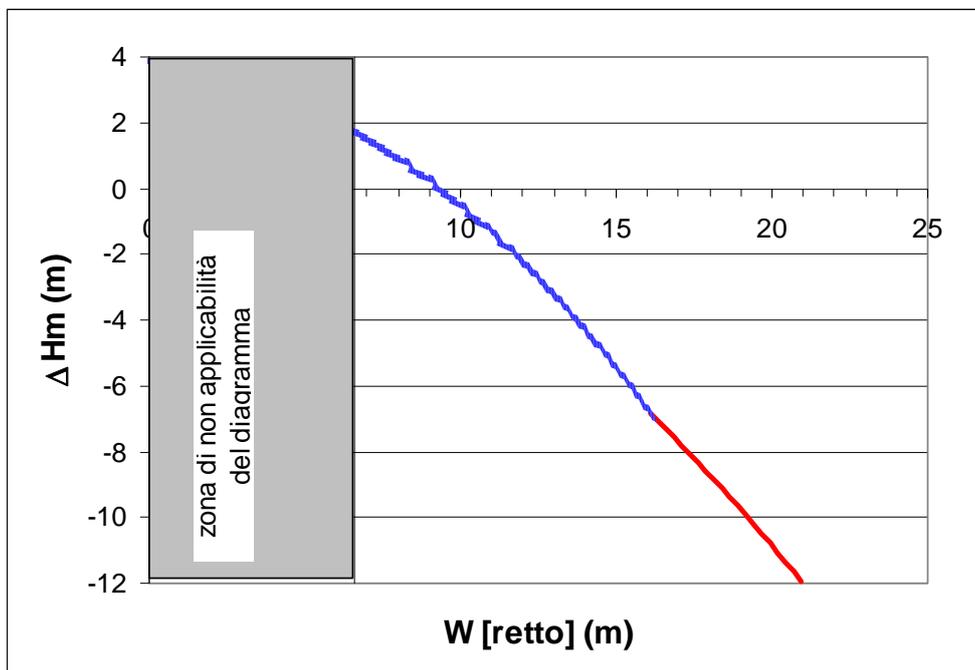


Figura 87: diagramma per il calcolo dell'altezza minima dei muri di sostegno della linea AV per la protezione della linea ferroviaria – A4

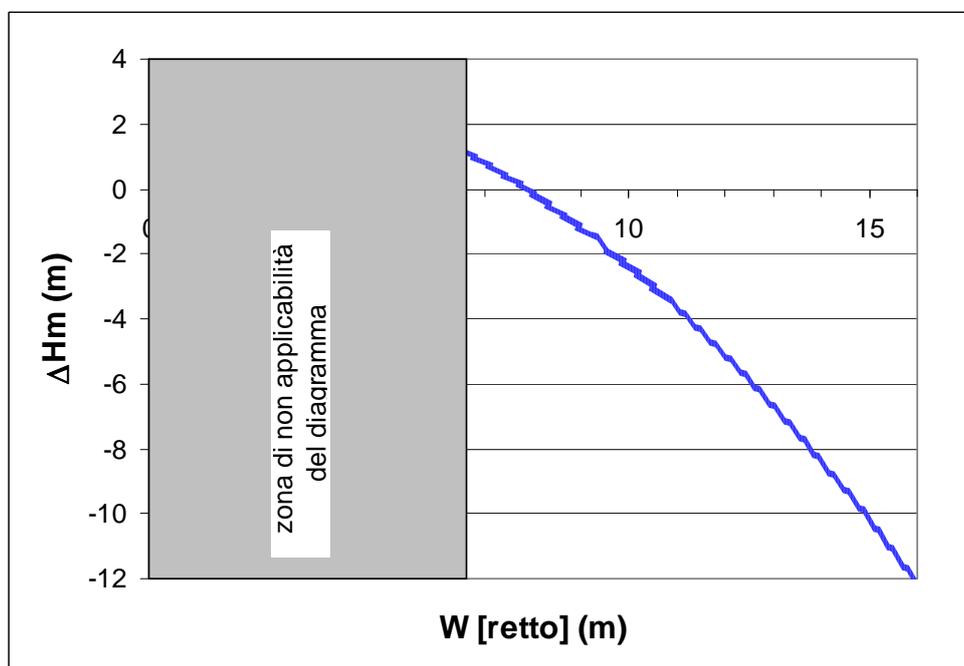


Figura 88: diagramma per il calcolo dell'altezza minima dei muri di sostegno della linea AV per la protezione della linea ferroviaria – BRE-BE-MI

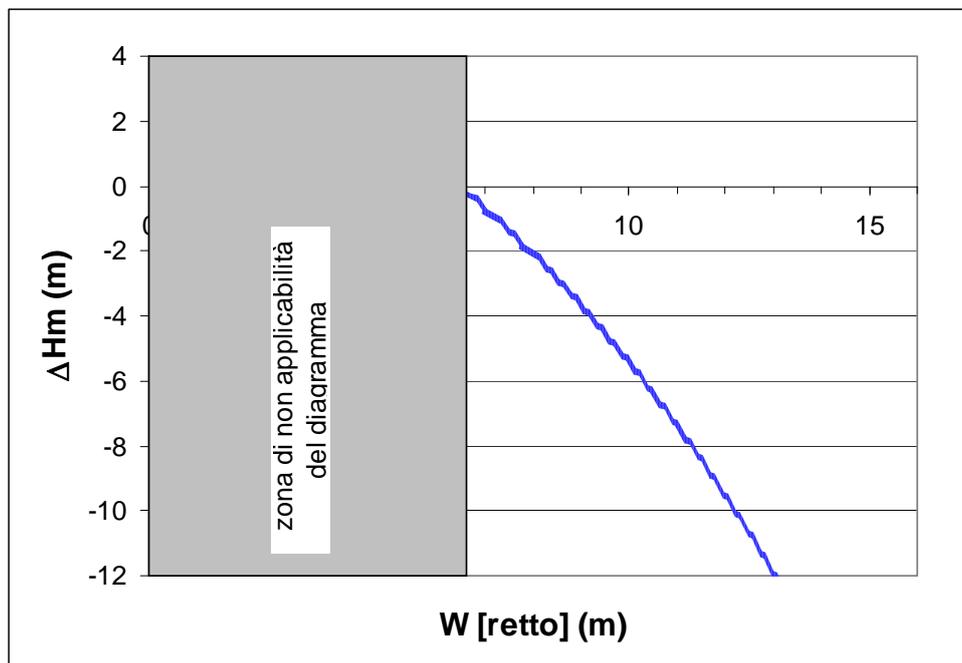


Figura 89: diagramma per il calcolo dell'altezza minima dei muri di sostegno della linea AV per la protezione della linea ferroviaria – ACP e BRETELLA

Per l'utilizzazione del diagramma si può procedere come segue:

I. definire i seguenti parametri:

$q_A$  = quota del bordo esterno della banchina dell'autostrada

$q_F$  = quota del ciglio del rilevato ferroviario

( $q_F = p_F - H_{ballast}$ )

$q_m$  = quota della testa del muro di sostegno del rilevato

$\Delta H_m = q_m - q_A$

$W$  = distanza al piede tra il muro di sostegno dell'autostrada ed il muro di sostegno della AV

II. leggere dal diagramma relativo alla autostrada che si sta analizzando il dislivello minimo  $\Delta H_m$

III. per  $\Delta H_m < 0$  si ha

III.a - se  $q_F - q_A \geq 0 \Rightarrow q_m = q_F$

il ciglio del rilevato ferroviario si trova a quota superiore al ciglio dell'autostrada e quindi anche al limite massimo di impatto del mezzo in caduta dal muro dell'autostrada. **È quindi sufficiente che la quota della testa del muro sia pari alla quota del ciglio del rilevato ferroviario**

Se invece  $q_F - q_A < 0$  si ricade in uno dei due casi III.b o III.c a seconda del rapporto tra  $|q_F - q_A|$  e  $|\Delta H_m|$  ovvero:

III.b - se  $|q_F - q_A| \leq |\Delta H_m| \Rightarrow q_m = q_F$

il ciglio del rilevato ferroviario si trova a quota inferiore rispetto al ciglio stradale ma superiore al limite massimo di impatto del mezzo in caduta dal muro dell'autostrada. **È quindi sufficiente che la quota della testa del muro sia pari alla quota del ciglio del rilevato ferroviario**

III.c - se  $|q_F - q_A| > |\Delta H_m| \Rightarrow q_m = q_A - |\Delta H_m|$

il ciglio del rilevato ferroviario si trova a quota inferiore rispetto al ciglio stradale e più bassa del limite massimo di impatto del mezzo in caduta dal muro dell'autostrada. **In questo caso la testa del muro deve essere rialzata rispetto alla quota del ciglio del rilevato ferroviario di una quantità tale da portarsi al di sotto della quota dell'autostrada di una quantità non superiore al valore assoluto di  $\Delta H_m$**

IV. per  $\Delta H_m \geq 0$  si ha

IV.a - se  $q_F - q_A \geq \Delta H_m \Rightarrow q_m = q_F$

il ciglio del rilevato ferroviario si trova a quota superiore al limite massimo di impatto del mezzo in caduta dal muro dell'autostrada. **È quindi sufficiente che il muro la quota della testa del muro sia pari alla quota del ciglio del rilevato ferroviario**

IV.b - se  $q_F - q_A < \Delta H_m \Rightarrow q_m = q_A + \Delta H_m$

il ciglio del rilevato ferroviario si trova ad una quota più bassa del limite massimo di impatto del mezzo in caduta dal muro dell'autostrada. **In questo caso la testa del muro deve essere rialzata rispetto alla quota del ciglio del rilevato ferroviario di una quantità tale da portarsi al di sopra del limite massimo di impatto del veicolo in svio dall'autostrada**

Nei casi in cui la quota del ciglio del rilevato ferroviario sia sufficiente per evitare l'invasione da parte del mezzo che esce dall'autostrada (casi III.a, III.b, IV.a) il muro di sostegno a tutta altezza può essere sostituito da un muro di sottoscarna di altezza non inferiore ad 1.00 m.

Nei casi in cui la protezione sia garantita anche per  $q_F < 1$  m è opportuno realizzare comunque un cordolo al piede del rilevato ferroviario di altezza pari ad 1.00 m.

## 8 CRITERI PER LA DEFINIZIONE DELLE ENERGIE E DELLE FORZE IN FUNZIONE DELLE CLASSI VEICOLARI

### 8.1 Principi per la definizione delle energie

Per valutare, in funzione della distanza, l'energia associata all'urto di un mezzo pesante contro l'opera di protezione, si può utilizzare il diagramma di Figura 90 dove sono riportati i risultati relativi alle condizioni più critiche identificate nell'affiancamento con la Autostrada A1 (cfr. doc. "Sicurezza Linea AV - Area Interclusa - Autostrada A1 - Tipologie di protezione: Relazione illustrativa simulazioni numeriche" - cod. A10100VE1SDIA000001). Questi consentono di definire, punto per punto, la condizione da considerare nelle verifiche, per una data altezza del rilevato stradale.

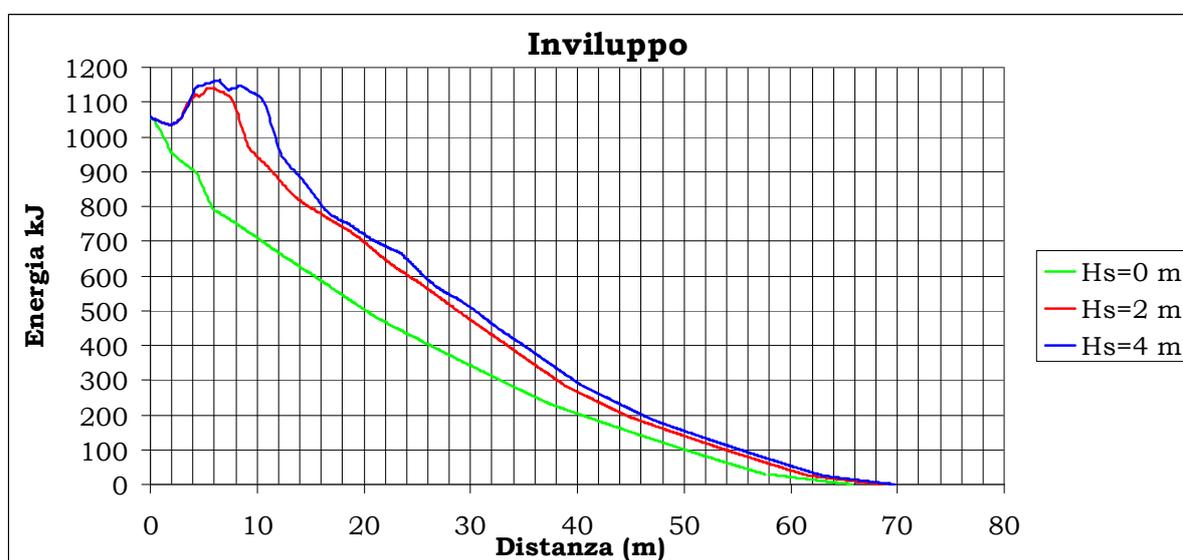


Figura 90: Inviluppo delle energie in funzione dell'altezza del rilevato autostradale.

Per trovare l'energia necessaria al dimensionamento di eventuali protezioni occorre, data la distanza dal ciglio destro autostradale della presunta protezione, entrare nel grafico con questa, avendo definito la geometria della scarpata e leggere direttamente il valore dell'energia sulle ordinate.

### 8.2 Principi per la definizione delle forze

Per il calcolo, in funzione della distanza, delle forze applicate trasversalmente sono stati elaborati, nello studio all'affiancamento con la A1, i diagrammi di Figura 91, Figura 92 e Figura 93. Negli stessi diagrammi sono anche riportati i valori delle forze medie applicate durante l'urto alle opere.

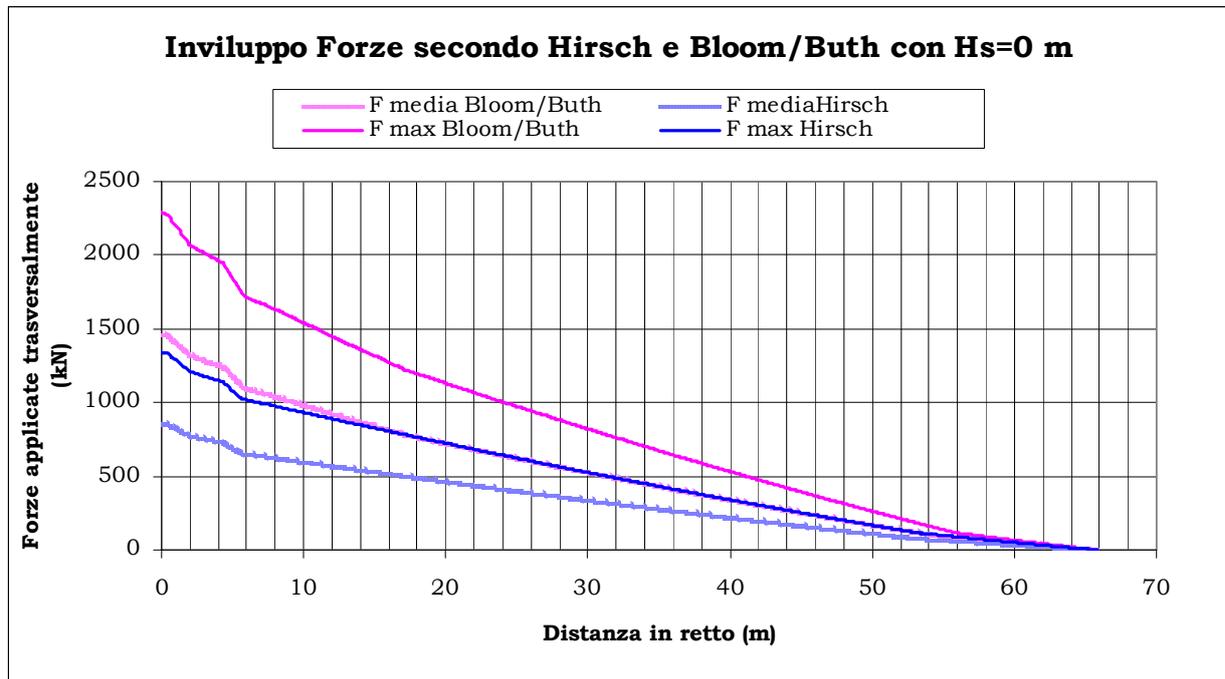


Figura 91: Inviluppo delle forze massime e medie con Hs=0 m secondo lo studio di Hirsch e lo studio di Bloom/Buth.

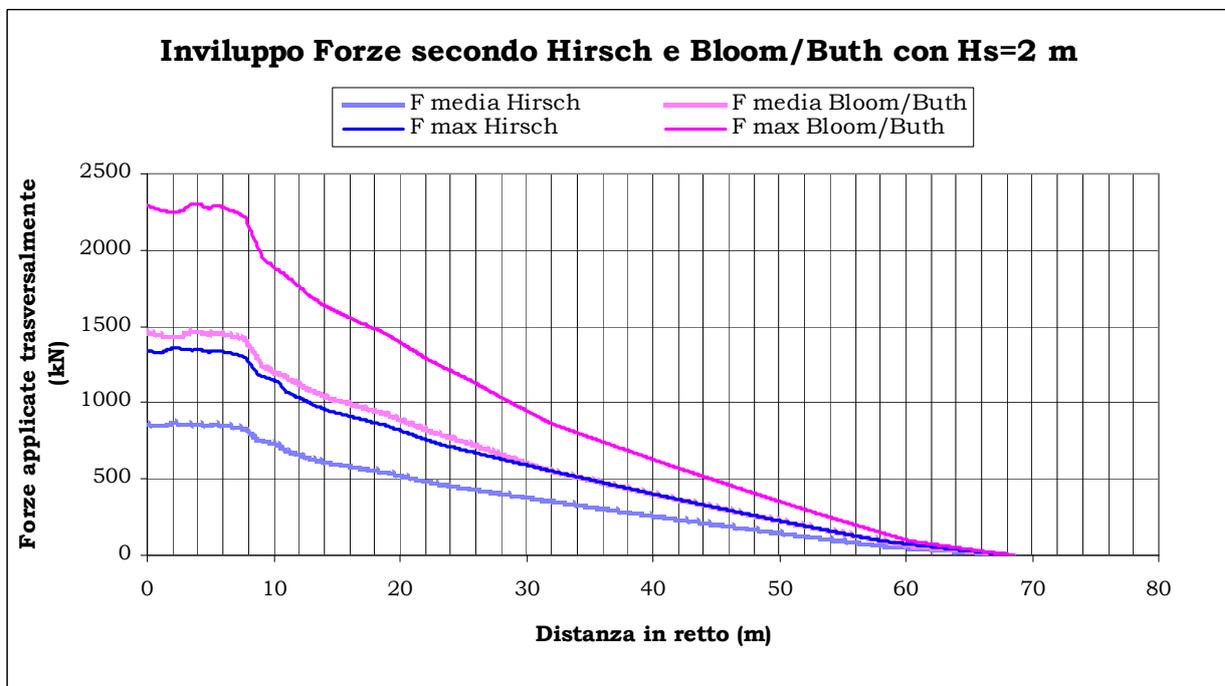


Figura 92: Inviluppo delle forze massime e medie con Hs=2 m secondo lo studio di Hirsch e lo studio di Bloom/Buth.

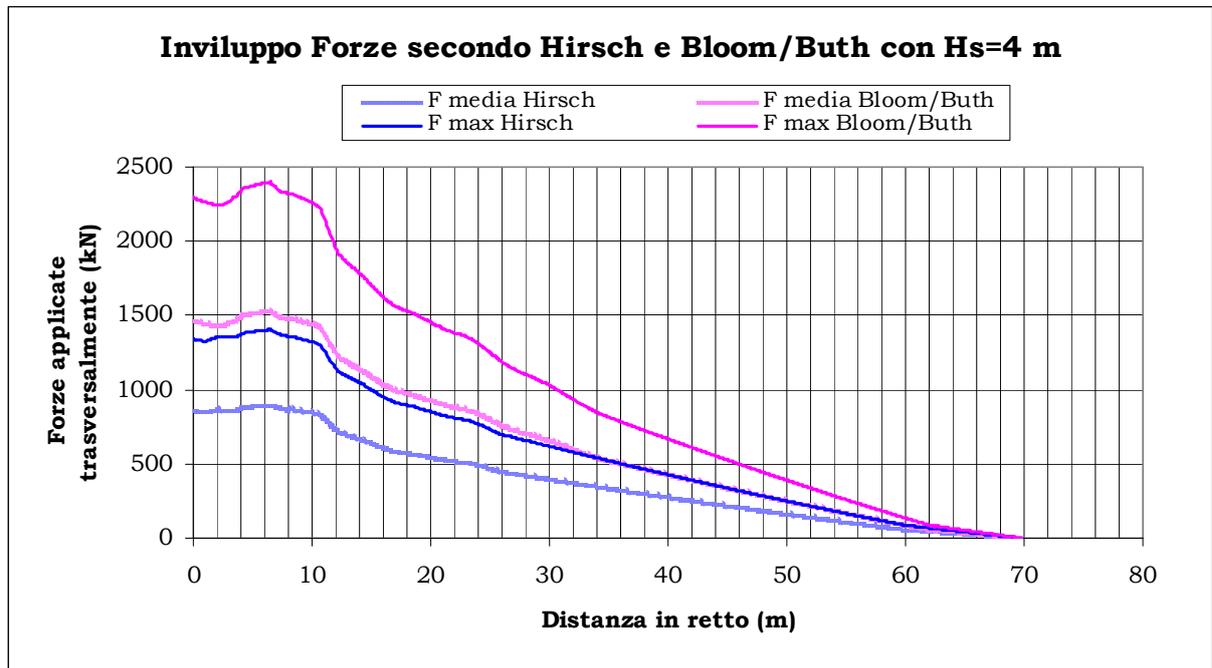


Figura 93: Inviluppo delle forze massime e medie con Hs=4 m secondo lo studio di Hirsch e lo studio di Bloom/Buth.