

ETCS

Codifica: RFI TC.SCC SR AV 03 R02

FOGLIO
1 di 21

MODELLO DI FRENATURA PER SSB ETCS Baseline 2

A termine di legge RFI S.p.A. si riserva la proprietà di questo documento che non potrà essere copiato, riprodotto o comunicato a terzi senza specifica autorizzazione

Rev.	Data	Descrizione	Redazione	Verifica	Approvazione
A	30 giugno 2016	Prima emissione	Buonincontri Esposito Ricciardi Ridolfi	Rosini	Seriesi

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO

2 di 21

ELENCO DELLE REVISIONI

Rev.	Data	Motivo della revisione
A	30 giugno 2016	Prima emissione

ETCS

 Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO

3 di 21

INDICE

1	Introduzione	4
2	Contesto	4
3	Riferimenti	5
4	Definizioni ed acronimi	6
5	Modello di frenatura a gradino	7
6	Applicazione del modello di frenatura	9
7	Calcolo dello spazio per EBI.....	11
7.1	<i>Calcolo di t_f.....</i>	<i>12</i>
7.1.1	<i>Calcolo di t_f'.....</i>	<i>12</i>
7.2	<i>Calcolo di d_i.....</i>	<i>14</i>
7.3	<i>Calcolo di d_p.....</i>	<i>15</i>
7.3.1	<i>Calcolo di K_0.....</i>	<i>15</i>
7.3.2	<i>Calcolo di K_C.....</i>	<i>15</i>
7.3.3	<i>Calcolo di K_r.....</i>	<i>16</i>
7.3.4	<i>Calcolo di d_r.....</i>	<i>16</i>
7.4	<i>Calcolo di V_β.....</i>	<i>17</i>
8	Calcolo dello spazio per le curve SBI, W e P	18
8.1	<i>Curva SBI.....</i>	<i>18</i>
8.2	<i>Curva W.....</i>	<i>19</i>
8.3	<i>Curva P</i>	<i>19</i>
9	Tetti di velocità.....	20

1 Introduzione

Lo scopo del documento è descrivere il Modello di Frenatura per il Sotto Sistema di Bordo ERTMS/ETCS sviluppato per l'Alta Velocità ed applicabile ai SSB che implementano ETCS Baseline 2.

Il presente documento specifica il modello matematico di frenatura derivato da quello utilizzato per SCMT (rif. [R1]) e parametrizzato per la flotta ETR500.

2 Contesto

Il modello è in linea di principio applicabile ad ogni tipologia di treno e di sistema frenante rispondente alla normativa UIC (rif. [R3]).

Esso fornisce lo spazio percorso dal treno in seguito ad azionamento della frenatura di emergenza, a partire dall'istante in cui il Sotto Sistema di Bordo comanda tale azionamento, fino al raggiungimento della velocità obiettivo impostata dal SSB.

Il comando, da parte del SSB, della frenatura di emergenza è associato al controllo EBI.

Sono esclusi i tempi necessari al sistema nel suo complesso per pervenire a tale comando.

Sono esclusi gli errori introdotti dal sistema di odometria nella misura della velocità istantanea e dello spazio percorso.

Da questo momento in poi si indicherà con l'espressione "spazio di frenatura" lo spazio calcolato dal modello nelle condizioni descritte.

ETCS

 Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

 FOGLIO
 5 di 21

3 Riferimenti

Titolo	Codice	Rev.	Data	Ente emittente
[R1] Modello di frenatura per SCMT	RFI TC.PATC SR CM 03 M59	D	18/02/2010	RFI – Progetto ATC
[R2] ERTMS/ETCS – System Requirements Specification	Subset 026	3.3.0	07/03/2012 (in corso di formalizzazione da parte della Commissione Europea)	UNISIG
[R3] FS general braking model for ERTMS/ETCS	UTMR n°373279	01	09/01/2003	Trenitalia – UTMR

ETCSCodifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO

6 di 21

4 Definizioni ed acronimi

ATC	Automatic Train Control
d	decelerazione
EBI	Emergency Break Intervention
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ETCS	European Train Control System
ETR	Elettrotreno
FS	Ferrovie dello Stato
km/h	Chilometri all'ora
L	lunghezza
m	metri
MKS	Metro, Kilogrammo, Secondo (sistema di unità di misura)
rif	riferimento
RFI	Rete Ferroviaria Italiana
S	spazio o secondi
SCMT	Sistema Controllo Marcia Treno
SBI	Service Break Intervention
SSB	SottoSistema di Bordo
t	tempo
UIC	Union Internationale des Chemins de fer
UNISIG	Union Industry of Signalling
UTMR	Unità Tecnologia Materiale Rotabile
V	Velocità

ETCS

Codifica: RFI TC.SCC SR AV 03 R02

FOGLIO

7 di 21

5 Modello di frenatura a gradino

Il modello approssima lo sviluppo della frenatura reale del treno distinguendo una fase transitoria ed una fase a regime.

La fase transitoria della frenatura corrisponde alla fase iniziale, durante la quale la depressione nella condotta generale generata dall'azionamento della frenatura si propaga per tutta la lunghezza del treno, azionando i distributori in sequenza, a partire dalla testa del treno.

La fase a regime della frenatura corrisponde alla seconda fase, in cui la frenatura ha raggiunto l'efficienza a regime su tutti gli assi frenanti del treno.

Entrambe le fasi sono caratterizzate da un valore di decelerazione variabile. Durante la prima fase, la decelerazione dovuta alla frenatura è inizialmente nulla, a causa dei ritardi caratteristici del freno, e poi cresce progressivamente, man mano che gli assi iniziano a frenare. Durante la seconda fase la decelerazione varia in funzione della velocità istantanea del treno, in base alle caratteristiche specifiche degli organi frenanti. In entrambe le fasi si possono inoltre avere variazioni nella decelerazione dovute ad una serie di fattori casuali e sistematici.

Il modello adottato considera due fasi della frenatura. Durante la prima fase la decelerazione dovuta alla frenatura è considerata nulla. Durante la seconda è considerata costante per tutto lo sviluppo della frenatura, al raggiungimento della velocità obiettivo.

Il profilo di decelerazione rappresentato in funzione del tempo e prodotto dalla frenatura, secondo il modello è una funzione a gradino.

I grafici rappresentano schematicamente, a partire dall'istante di inizio frenatura, l'andamento della velocità in funzione dello spazio percorso ed, in corrispondenza, della decelerazione in funzione del tempo.

È stato rappresentato il caso di linea in discesa, con decelerazione negativa dovuta alla pendenza.

Nella prima fase la velocità può variare, a partire dal valore iniziale V , in funzione della decelerazione d_i determinata dalla pendenza della linea. Dopo un tempo t_f termina la prima fase, durante la quale la velocità si è portata al valore V_β , ed inizia la seconda fase della frenatura, caratterizzata dalla presenza della decelerazione d_p dovuta alla frenatura.

Nel grafico sono rappresentate, qualitativamente, anche il presumibile andamento della velocità reale del treno in funzione dello spazio percorso ed il presumibile andamento della decelerazione reale del treno in funzione del tempo.

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO
8 di 21

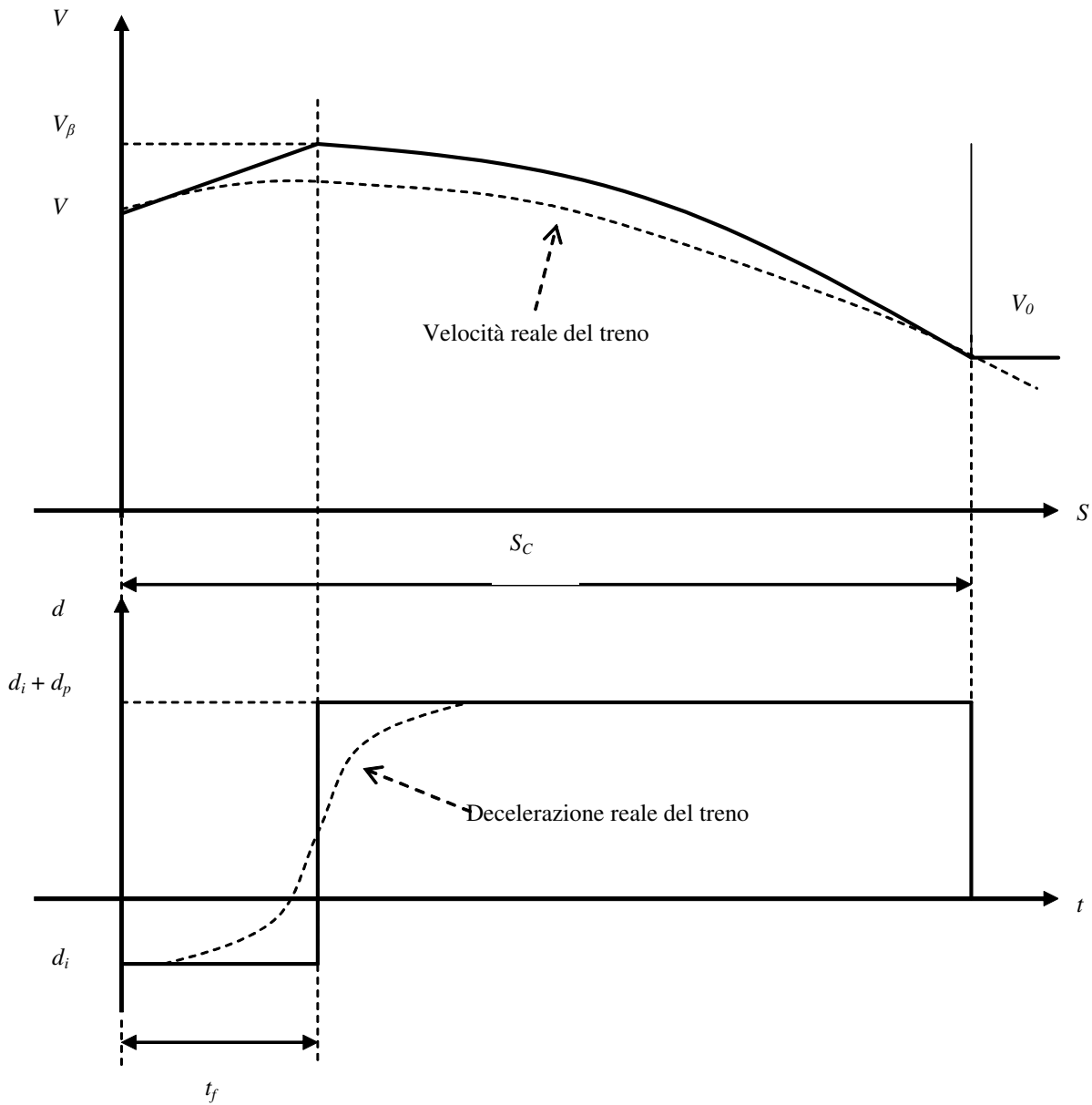


Figura 1 - Rappresentazione del modello a gradino di decelerazione su linea in discesa

ETCS

 Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO

9 di 21

6 Applicazione del modello di frenatura

Il modello matematico fornisce lo spazio di frenatura in funzione di una serie di variabili e di parametri, che sono descritti nelle apposite tabelle.

Nelle tabelle che seguono i parametri sono generalmente espressi nelle unità di misura del sistema internazionale MKS, salvo ove diversamente specificato.

Nelle formule tutte le grandezze devono essere espresse, eventualmente mediante opportuna conversione, secondo il sistema internazionale MKS.

Ad esempio i tempi sono espressi in s (secondi), gli spazi in m (metri) e le decelerazioni in m/s^2 ; ma le velocità sono espresse in km/h, e devono ovviamente essere convertite in m/s per essere utilizzate nei calcoli.

Le principali variabili di ingresso del modello sono le velocità iniziale ed obiettivo, la percentuale di peso frenato, la lunghezza del treno e la pendenza della linea, i cui campi di variabilità sono riassunti in tabella.

Variabile	Simbolo	Intervallo di definizione	Passo
Velocità iniziale	V	$[0 ; V_{R\max}]$ km/h	1
Velocità obiettivo	V_0	$[0 ; V_{R\max}]$ km/h	1
Percentuale di peso frenato	λ	$[45 ; 160]$	5
Lunghezza del treno	L	$[0 ; 1000]$	1
Pendenza della linea	i	$[-0,035 ; 0,035]$	0,001

Il campo di variazione per il valore di velocità iniziale V del treno è funzione del parametro di configurazione Regime R , che può assumere i valori E (Esercizio) o P (Prova), e non deve superare il valore $V_{R\max}$ così definito:

$$V_{R\max} = \begin{cases} V_{RE} & \text{se } R = E \\ V_{RP} & \text{se } R = P \end{cases}$$

con

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
V_{RE}	330 km/h	$[0 ; 400]$	1
V_{RP}	400 km/h	$[0 ; 400]$	1

I campi di variabilità degli altri parametri del modello sono definiti volta per volta nelle ta-

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO
10 di 21

belle.

L'intervallo di validità relativamente alla velocità istantanea del treno è definito in base al regime di circolazione nel seguente modo:

Parametro	Simbolo	Intervallo di validità	Unità di misura
Velocità	V	$0 \leq V \leq V_{Rmax}$	km/h

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO
11 di 21

7 Calcolo dello spazio per EBI

Lo spazio di frenatura S_{EBI} , espresso in m, è dato da:

$$S_{EBI} = (h + t_f) \cdot V_{\beta} + \frac{V_{\beta}^2 - V_0^2}{2 \cdot (d_p + d_i)}$$

dove:

t_f è il tempo durante il quale il modello assume che la decelerazione dovuta alla frenatura sia nulla;

V_{β} è una velocità calcolata a partire dalla velocità V che il treno ha nell'istante in cui il SSB comanda l'azionamento della frenatura;

V_0 è la velocità obiettivo (se richiesto dalla logica di gestione delle curve di frenatura, questo valore deve comprendere il margine operativo necessario);

d_p è la decelerazione a regime prodotta dalla frenatura;

d_i è la decelerazione prodotta dalla pendenza della linea (positiva in salita);

h è il tempo di ritardo proprio del SSB SCMT, definito nella seguente tabella:

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
h	1,0	[0,0 ; 5,0]	0,1

ETCS

 Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

 FOGLIO
 12 di 21

7.1 Calcolo di t_f

Il tempo t_f durante il quale il modello assume che nessuna forza sia applicata ai freni è dato da:

$$t_f = D_t \cdot t_f'$$

dove:

D_t è un coefficiente di sicurezza;

t_f' è il tempo di ritardo da associare alla propagazione della depressione in condotta generale.

Risulta:

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
D_t	1,30	[0,00 ; 2,00]	0,01

7.1.1 Calcolo di t_f'

Risulta:

$$t_f' = \begin{cases} t_{fV} & \text{se } TipoFreno = Viaggiatori \\ \text{MAX}(t_{fV}, t_{fM}) & \text{se } TipoFreno = Merci \end{cases}$$

con

$$t_{fV} = a_V + b_V \cdot \frac{L \cdot (1 - EP)}{100} + c_V \cdot \left[\frac{L \cdot (1 - EP)}{100} \right]^2$$

$$t_{fM} = a_M + b_M \cdot \frac{L}{100} + c_M \cdot \left(\frac{L}{100} \right)^2$$

$$EP = \begin{cases} 1 & \text{se } FrenoElettroPneumatico = efficiente \\ 0 & \text{se } FrenoElettroPneumatico = inefficiente \end{cases}$$

dove:

EP vale **1** in presenza di freno elettropneumatico inserito ed efficiente; **0** in caso di freno elettropneumatico assente, disinserito o inefficiente.

I parametri a_V , b_V , c_V , a_M , b_M , c_M sono definiti nella seguente tabella.

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO
13 di 21

Parametri	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
a_V	3,50	[0,00 ; 20,00]	0,01
b_V	0,00	[-2,00 ; 2,00]	0,01
c_V	0,15	[-1,00 ; 1,00]	0,01
a_M	13,50	[0,00 ; 20,00]	0,01
b_M	0,00	[-2,00 ; 2,00]	0,01
c_M	0,04	[-1,00 ; 1,00]	0,01

L è la lunghezza del treno da considerare ai fini della frenatura e deve poter assumere i valori specificati nella seguente tabella:

Parametro	Valore di prima ipotesi	Valori ammissibili
L	LD	LD, LT

dove:

LT è la lunghezza reale del treno inserita dal PdC nei dati treno.

$$LD = \begin{cases} L_V & \text{se } TipoFreno = Viaggiatori \\ L_M & \text{se } TipoFreno = Merci \end{cases}$$

Dunque, a seconda dei dati di configurazione del rotabile, il valore di lunghezza del treno da utilizzare nel modello di frenatura può essere pari al valore di lunghezza reale inserito dal PdM (LT) o ad un valore di default legato al tipo di freno (LD).

I parametri L_V e L_M sono definiti nella seguente tabella:

Parametri	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
L_V	650	[0,2000]	1
L_M	1000	[0,2000]	1

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO
14 di 21

7.2 Calcolo di d_i

Il valore di decelerazione dovuta alla pendenza della linea è data da:

$$d_i = \begin{cases} K_{i1} \cdot g \cdot i & \text{se } i > i_1 \\ K_{i2} \cdot g \cdot i & \text{se } i_2 < i \leq i_1 \\ K_{i3} \cdot g \cdot i & \text{se } i \leq i_2 \end{cases}$$

dove:

g è l'accelerazione di gravità, pari a 9,81 m/s²;

i è la pendenza della linea, espressa come numero puro, positiva in salita;

I coefficienti K_{i1} , K_{i2} e K_{i3} e le soglie i_1 e i_2 sono utilizzate per contemplare il contributo delle inerzie dovute alle masse rotanti.

I valori sono definiti nella seguente tabella.

Parametri	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
K_{i1}	0,90	[0,80 ; 1,20]	0,01
K_{i2}	1,00	[0,80 ; 1,20]	0,01
K_{i3}	1,1	[0,80 ; 1,20]	0,01
i_1	0,000	[0,000 ; 0,035]	0,001
i_2	-0,021	[-0,035 ; 0,000]	0,001

Il valore i della pendenza sicura della linea deve essere calcolato dal SSB in base ai valori di pendenza delle n livellette comprese tra la posizione della coda del treno ed il punto obiettivo come segue:

$$i = \min\{i_n\}_{i=1,\dots,n}$$

Le n livellette da considerare nel calcolo vanno aggiornate dinamicamente all'avanzare del treno lungo la linea.

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO
15 di 21

7.3 Calcolo di d_p

Il valore di decelerazione costante, dovuto alla frenatura, utilizzato dal modello nella fase di frenatura a regime è:

$$d_p = K_0 \cdot K_C \cdot K_r \cdot d_r$$

dove:

K_0 è un coefficiente di protezione rispetto alle velocità obiettivo non nulle;

K_C è un coefficiente di protezione per le velocità elevate;

K_r è un coefficiente di protezione che tiene conto della dispersione delle prestazioni frenanti intorno al valore medio ed è legato alle prestazioni garantite dal materiale rotabile;

d_r è il valore di decelerazione nominale legato alla percentuale di peso frenato del treno.

7.3.1 Calcolo di K_0

Risulta:

$$K_0 = 1 - c_r \cdot \frac{V_0}{V}$$

dove:

V è la velocità iniziale;

V_0 è la velocità obiettivo come specificato in § 7;

c_r è definito nella seguente tabella:

Parametri	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
c_r	0,05	[0,00 , 0,10]	0,01

7.3.2 Calcolo di K_C

Risulta:

$$K_C = \begin{cases} 1 & \text{se } V \leq V_C \\ 1 + n_C \cdot (V - V_C) & \text{se } V > V_C \end{cases}$$

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO
16 di 21

I valori dei parametri n_c e V_c sono definiti nella seguente tabella:

Parametri	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
n_c	0,000 (km/h) ⁻¹ 0,0,000 * 3,6 (m/s) ⁻¹	[- 0,010 ; 0,010]	0,001
V_c	150 km/h	[0 ; 400]	5

7.3.3 Calcolo di K_r

Risulta:

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
K_r	0,57	[0,30 ; 1,50]	0,01

7.3.4 Calcolo di d_r

Risulta:

$$d_r = \begin{cases} A \cdot \lambda + B & \text{se } V \leq V_L \\ (A \cdot \lambda + B) \cdot [1 - C \cdot (V - V_L)] & \text{se } V > V_L \end{cases}$$

dove:

$$V_L = x \cdot \lambda^y$$

I valori di A , B , C , x , y , sono dati nella seguente tabella:

Parametri	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
A	0,00685	Reale	-
B	0,094	Reale	-
C	0,0000 (km/h) ⁻¹ 0,0,0000 * 3,6 (m/s) ⁻¹	Reale	-
x	16,17 km/h 16,17 / 3,6 m/s	Reale	-
y	0,443	Reale	-

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO
17 di 21

7.4 Calcolo di V_β

La velocità V_β caratterizza il comportamento del treno nella fase transitoria, durante la quale il modello assume che nessuna forza frenante sia applicata alle ruote.

Risulta:

$$V_\beta = \begin{cases} V - d_i \cdot (t_f + h) & \text{se } V - d_i \cdot (t_f + h) > V_0 \\ V_0 & \text{se } V - d_i \cdot (t_f + h) \leq V_0 \end{cases}$$

dove:

V è la velocità iniziale;

V_0 è la velocità obiettivo come specificato in § 7;

h è definito in § 7;

t_f è definito in § 6.1;

d_i è definito in § 6.2.

8 Calcolo dello spazio per le curve SBI, W e P

Lo spazio di arresto per le curve SBI, W e P è ricavato a partire dallo spazio di arresto per la curva EBI.

8.1 Curva SBI

Lo spazio di frenatura S_{SBI} , espresso in m, è dato da:

$$S_{SBI} = t_{SBI} \cdot V_{\beta} + S_{EBI}$$

dove:

t_{SBI} è un tempo caratteristico tale da consentire all'intervento della frenatura di servizio di ridurre la velocità del treno in modo da evitare il successivo intervento della EBI;

V_{β} è definito in § 7.4;

S_{EBI} è definito in § 7.

Risulta:

$$t_{SBI} = t_R + t_f$$

dove:

t_f è definito in 7.1

t_f è definito nella seguente tabella (con la condizione che SBI deve comandare tramite MVB la frenatura di servizio definita dalla logica di veicolo):

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
t_R	1,0 s	[-10,0 ; 10,0]	0,1

ETCS

 Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

 FOGLIO
 19 di 21

8.2 Curva W

Lo spazio di frenatura S_W , espresso in m, è dato da:

$$S_W = t_w \cdot V + S_{SBI}$$

dove:

t_w è il tempo che caratterizza l'anticipo con cui l'allerta avverte il PdM dell'imminente azionamento della frenatura di servizio;

V è la velocità istantanea del treno;

S_{SBI} è definito in § 8.1.

Risulta:

Parametri	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
t_w	1,5	[-10,0 ; 10,0]	0,1

8.3 Curva P

Lo spazio di frenatura S_P , espresso in m, è dato da:

$$S_P = t_p \cdot V + S_W$$

dove:

t_p è il tempo che caratterizza l'anticipo con cui l'allerta avverte il PdM dell'imminente azionamento della frenatura di servizio;

V è la velocità istantanea del treno;

S_W è definito in § 8.2.

Risulta:

Parametri	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
t_p	1,5	[-10,0 ; 10,0]	0,1

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO
20 di 21

9 Tetti di velocità

I tetti di velocità per EBI, SBI e W sono ricavati a partire dalla velocità permessa nel seguente modo:

$$V_W = \Delta V_W + V_P$$

$$V_{SBI} = \Delta V_{SBI} + V_P$$

$$V_{EBI} = \Delta V_{EBI} + V_P$$

con:

$$\Delta V_W = \begin{cases} \Delta V_{W,\min} & se \quad V_P \leq V_{W1} \\ \Delta V_{W,\min} + \frac{\Delta V_{W,\max} - \Delta V_{W,\min}}{V_{W2} - V_{W1}} \cdot (V_P - V_{W1}) & se \quad V_{W1} < V_P < V_{W2} \\ \Delta V_{W,\max} & se \quad V_P \geq V_{W2} \end{cases}$$

$$\Delta V_{SBI} = \begin{cases} \Delta V_{SBI,\min} & se \quad V_P \leq V_{SBI1} \\ \Delta V_{SBI,\min} + \frac{\Delta V_{SBI,\max} - \Delta V_{SBI,\min}}{V_{SBI2} - V_{SBI1}} \cdot (V_P - V_{SBI1}) & se \quad V_{SBI1} < V_P < V_{SBI2} \\ \Delta V_{SBI,\max} & se \quad V_P \geq V_{SBI2} \end{cases}$$

$$\Delta V_{EBI} = \begin{cases} \Delta V_{EBI,\min} & se \quad V_P \leq V_{EBI1} \\ \Delta V_{EBI,\min} + \frac{\Delta V_{EBI,\max} - \Delta V_{EBI,\min}}{V_{EBI2} - V_{EBI1}} \cdot (V_P - V_{EBI1}) & se \quad V_{EBI1} < V_P < V_{EBI2} \\ \Delta V_{EBI,\max} & se \quad V_P \geq V_{EBI2} \end{cases}$$

I valori dei parametri sono riassunti nella seguente tabella:

ETCS

Codifica: **RFI TC.SCC SR AV 03 R02**

FOGLIO

21 di 21

Parametro	Valore di prima ipotesi	Intervallo di definizione	Passo
V_{w1}	110 km/h	[0; 400]	1
V_{w2}	140 km/h	[0; 400]	1
V_{SBI1}	110 km/h	[0; 400]	1
V_{SBI2}	210 km/h	[0; 400]	1
V_{EBI1}	110 km/h	[0; 400]	1
V_{EBI2}	210 km/h	[0; 400]	1
$\Delta V_{W,min}$	4,0 km/h	[0,0; 20,0]	0,5
$\Delta V_{W,max}$	5,0 km/h	[0,0; 20,0]	0,5
$\Delta V_{SBI,min}$	5,0 km/h	[0,0; 20,0]	0,5
$\Delta V_{SBI,max}$	10,0 km/h	[0,0; 20,0]	0,5
$\Delta V_{EBI,min}$	7,5 km/h	[0,0; 20,0]	0,5
$\Delta V_{EBI,max}$	15,0 km/h	[0,0; 20,0]	0,5