



**Università degli Studi di Trieste**  
**Dipartimento di Ingegneria e Architettura**  
**Laurea Magistrale: Ingegneria Civile**  
**Corso : Infrastrutture Ferroviarie e Aeroportuali (494MI)**



## **Lezione 03: Veicoli Ferroviari**

**Roberto Roberti**

**Tel.: 040 558 3588**

**E-mail: roberto.roberti@dia.units.it**

**Anno accademico 2025/2026**



# Obiettivi e Sommario

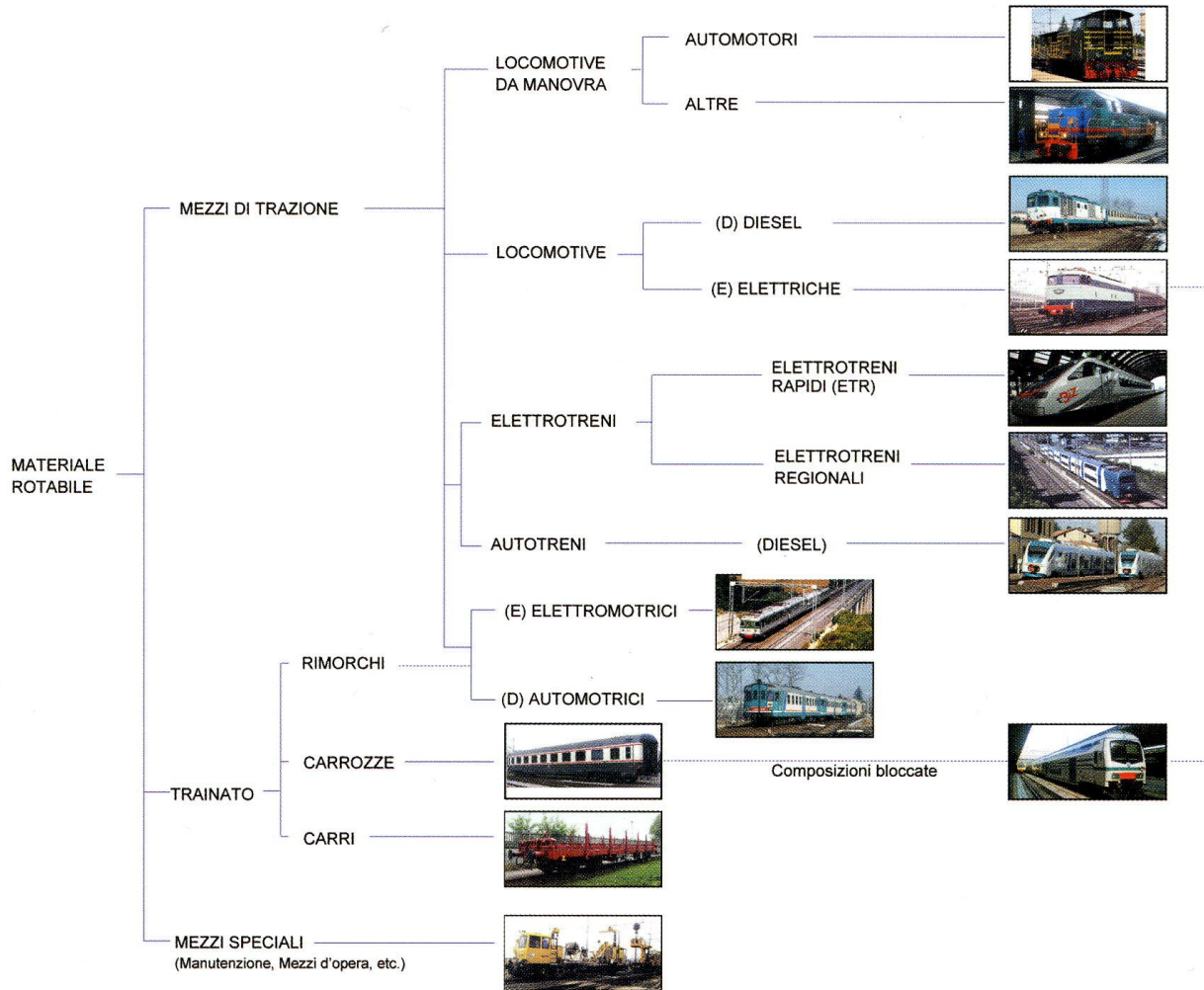
## Obiettivi Lezione 03:

- Definire e analizzare le caratteristiche dei veicoli ferroviari.

## Sommario Lezione 03:

- Classificazione dei veicoli ferroviari;
- Parti dei veicoli ferroviari;
- La ruota ferroviaria;
- Dimensioni e sagoma limite dei veicoli ferroviari;
- Resistenze al moto dei veicoli ferroviari;
- Grado di prestazione di una linea ferroviaria;
- Aderenza dei veicoli ferroviari e spazio di frenatura;
- Peso frenato di un veicolo ferroviario, e gradi di frenatura di una linea ferroviaria;
- Trazione ferroviaria;
- Equazione del moto e diagramma di trazione di un veicolo ferroviario;

# Classificazione Veicoli ferroviari



# Parti Veicoli ferroviari

## CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI VEICOLI FERROVIARI

### PRINCIPALI CARATTERISTICHE MECCANICHE

#### **RODIGGIO:**

complesso costituito dagli assi e dalle ruote del veicolo

#### **SOSPENSIONI:**

elementi con funzione di molleggio e di smorzamento delle oscillazioni dovute alle sollecitazioni dinamiche che si manifestano durante il moto

#### **TELAIO:**

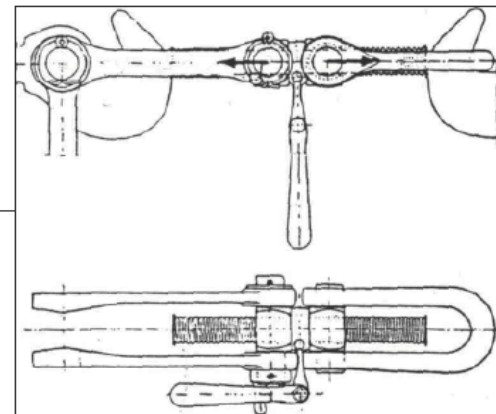
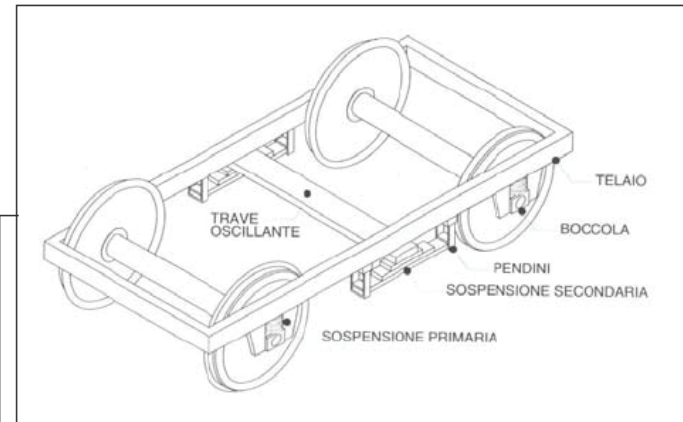
parte metallica collegata attraverso le sospensioni al rodiggio

#### **CASSA:**

ambiente costruito sul telaio destinato ai viaggiatori e alle merci

#### **ORGANI DI TRAZIONE E REPULSIONE:**

rispettivamente gancio e respingenti

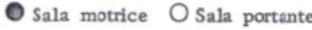










# Veicoli ferroviari (1)

## CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI VEICOLI FERROVIARI

### Caratteristiche del rodiggio

GRUPPO	SCHEMA	RODIGGIO
		
685		1-C-1
835 e 851		0-C-0
E 326		2-Co-2
E 428		2-B <sub>0</sub> + B <sub>0</sub> -2
E 636 ed E 646		B <sub>0</sub> + B <sub>0</sub> + B <sub>0</sub>
ALn 990		B-2

Tab. 2 – Schemi di alcune locomotive e automotrici usate nelle ferrovie italiane con riferimento al rodiggio.

### LEGENDA

Lettera maiuscola dell'alfabeto = *numero di assi motori consecutivi* ( $A=1$ ,  $B=2$  ecc.);

Numero = *numero di assi portati consecutivi*

Indice zero = *assi motori indipendenti*

Trattino - interposto = *appartenenza a carrelli o telai parziali*

Segno + interposto = *appartenenza a carrelli o telai diversi*

### Esempio

$2-B_0 + 2-B_0$  = locomotiva (o automotrice) a due carrelli, ognuno formato da due assi portati e due assi motori indipendenti.

## Veicoli ferroviari (2)

*Elettrotreni*: assi motori distribuiti su numerosi veicoli, materiale cosiddetto “leggero”, ossia a peso max per asse limitato.

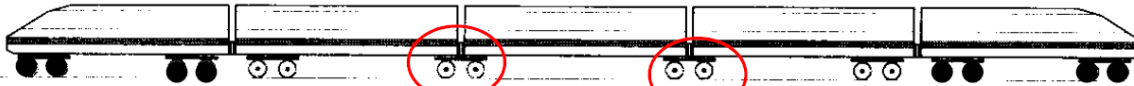
*Rodiggio di un veicolo ferroviario*: parte di un veicolo ferroviario che sta sotto le sospensioni; è costituito dall’insieme degli assi motori e portanti



Schema rodiggio ETR 500 (una locomotiva in testa ed una in coda)



Schema rodiggio Pendolino (assi motori distribuiti): ETR 401; ETR450; ETR 460; ETR 470; ETR 480; ETR600, *ma ora* anche AGV (Automotrice à Grande Vitesse) ed *ETR 1000*



Schema composizione TGV (due locomotive, una in testa un'altra in coda, come ETR 500), però carrelli comuni a due carrozze adiacenti

# Veicoli ferroviari (3)

E' ad assi motori distribuiti anche il nuovo elettrotreno ETR 1000 (prodotto da: AnsaldoBreda, ora Hitachi Rail Italy -Bombardier)

## Descrizione tecnica – *Trazione e pantografi*



Dal punto di vista dell'architettura il treno è **simmetrico** e suddiviso in **2 semi-treni indipendenti**.

La potenza di trazione continuativa è pari a 9.8 MW sotto catenaria **25 kVca 50 Hz**; è fornita da 4 convertitori indipendenti che alimentano **16** motori di trazione asincroni trifase. Sono presenti le predisposizioni elettriche e meccaniche per l'alimentazione sotto catenaria 15kVca 16.7 Hz e 1,5kVdc.

Alimentazione elettrica Rete ferroviaria austriaca e tedesca

Alimentazione elettrica di una parte della Rete ferroviaria francese (non ad alta velocità)

*Rodiggio:*

Bo'Bo'+2'2'+Bo'Bo'+2'2' + 2'2'+Bo'Bo'+2'2'+Bo'Bo'  
2 motori

Tipologia di veicolo	Principali apparecchiature
DM	Cabine di guida, convertitori trazione, reostato di frenatura
TT	Trasformatore, pantografo 3kVdc
M	Convertitore, reostato di frenatura
T	Pantografo 25kVca, batterie

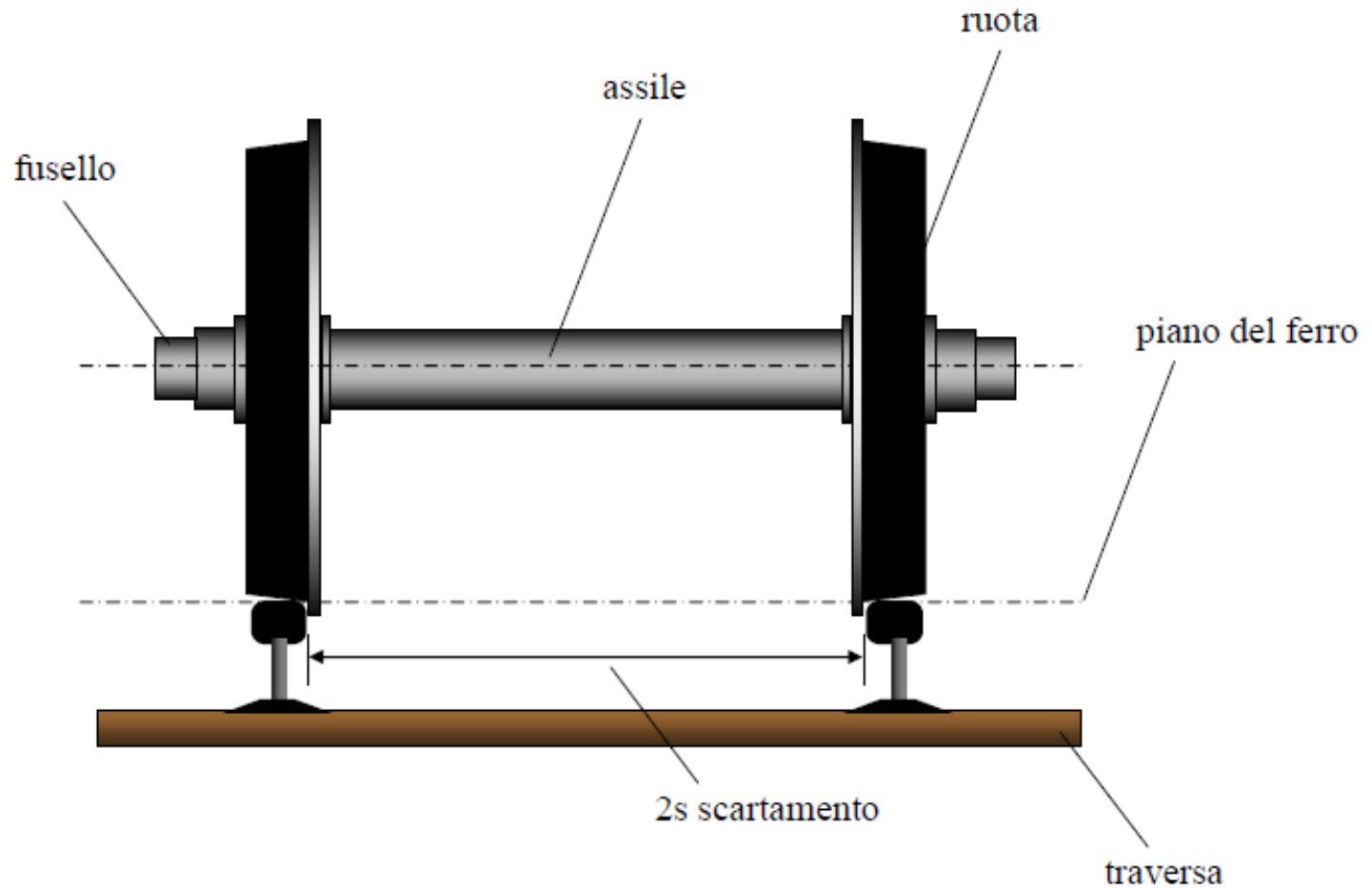
Massa = 458 t

L=202 m

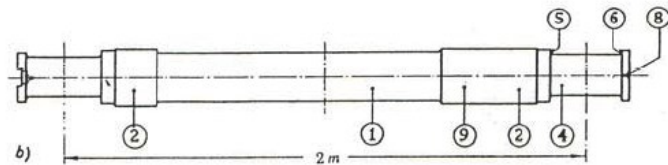
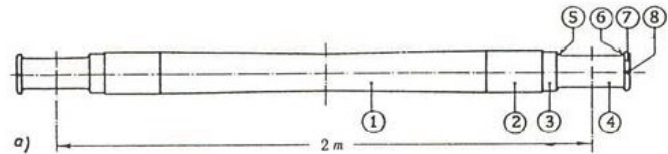
Posti: 455

Fonte: Marco Caposciutti, ETR 1000, Trenitalia, Milano, 01/07/2015.

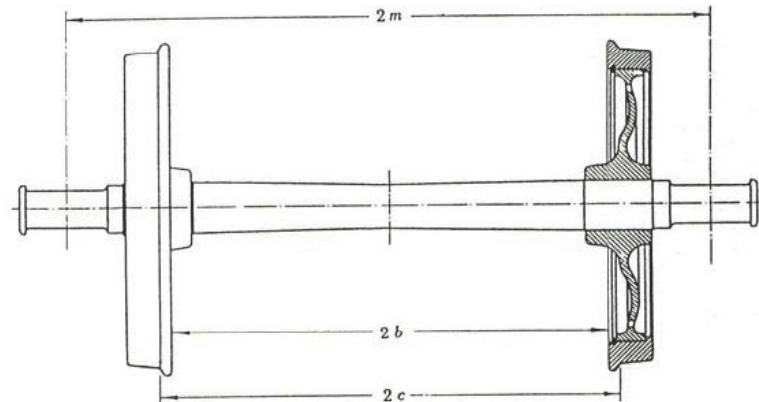
# La ruota ferroviaria (1)



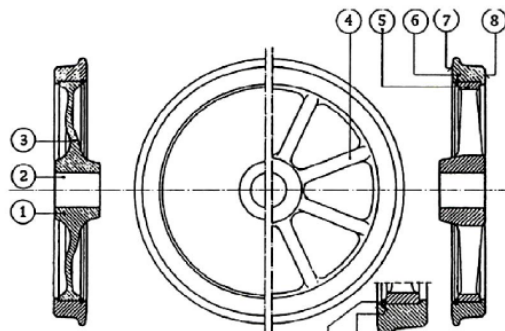
# La ruota ferroviaria (2)



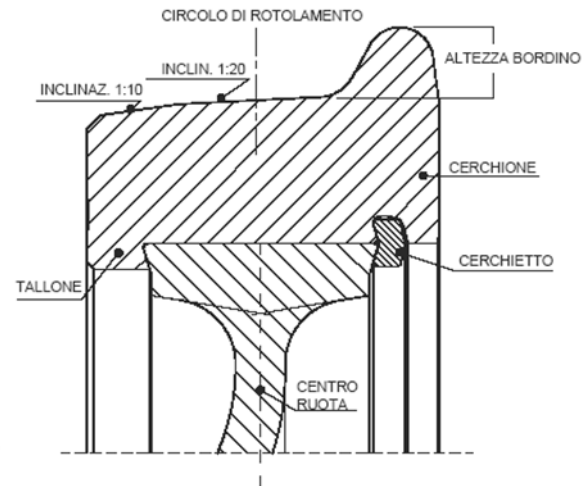
- |   |   |
|---|---|
| 1 - Corpo della sala                    | 6 - Gola anteriore del fusello                |
| 2 - Portata di calettamento della ruota | 7 - Bordino del fusello                       |
| 3 - Portata d'otturatore                | 8 - Centro di tornitura                       |
| 4 - Fusello                             | 9 - Portata di calettamento dell'in-granaggio |
| 5 - Gola posteriore del fusello         | 2 m - Scartamento dei centri dei fuselli.     |



- |  |
|--|
| 2 m - Scartamento dei centri dei fuselli                 |
| 2 b - Scartamento interno delle ruote della sala montata |
| 2 c - Scartamento dei bordini                            |



- |                          |   |
|--------------------------|---|
| 1 - Mozzo                | 7 - Faccia interna del cerchione                |
| 2 - Foro di calettamento | 8 - Faccia esterna del cerchione                |
| 3 - Disco                | 9 - Gola del bordino                            |
| 4 - Razza                | 10 - Bordino del cerchione                      |
| 5 - Corona               | 11 - Scanalatura per il cerchietto di sicurezza |
| 6 - Cerchione            | 12 - Cerchietto di sicurezza.                   |



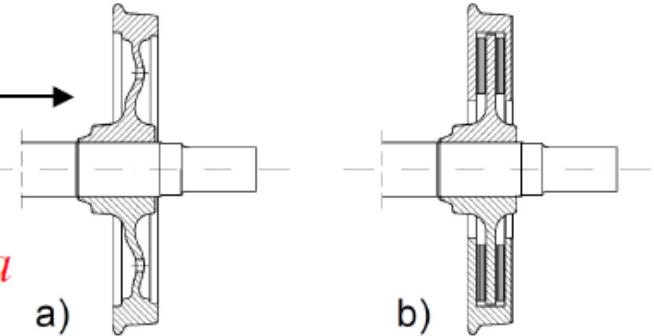
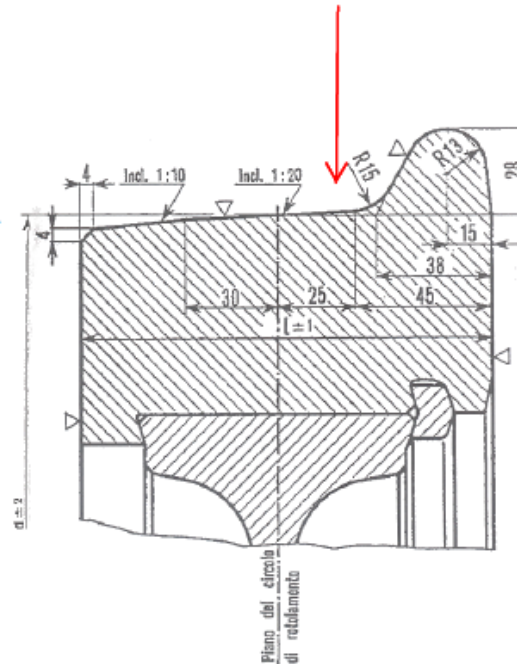


# La ruota ferroviaria (3)

*Monoblocco* (un solo pezzo fuso)

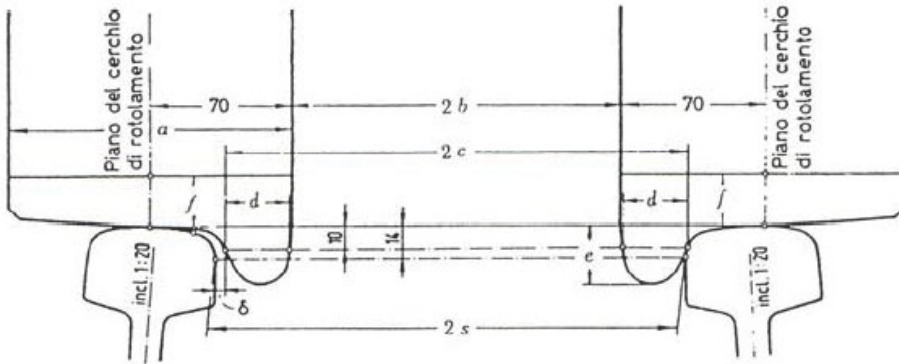
La ruota ferroviaria ha una forma *troncoconica*

*Biblocco*: parte esterna *cerchione*, + parte interna, *corpo*, unite attraverso procedimento di “calettamento”.



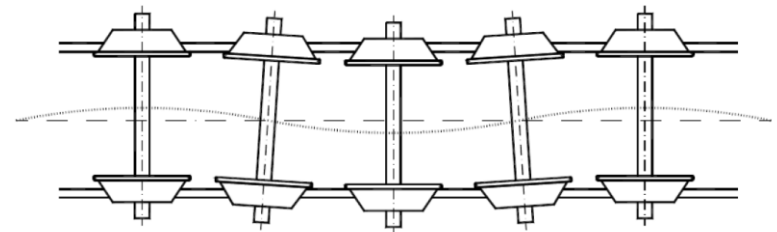
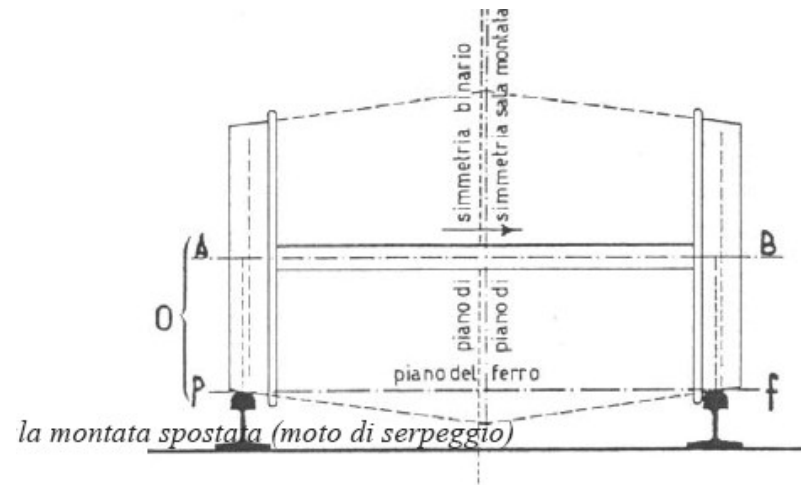
d (vedere punto 1)	l
700	125
	135
750	125
	135
800	135
850	
920	
940	
950	135
	140
1000	135
	140
1040	140
1100	
1250	

# La ruota ferroviaria (4)



	Valori	a		2 b	2 c	d	e	f	delta	2 s
Unità Tecnica delle Ferrovie edizione 1938	min.	130	130	1357	1410	20	25	25	6	1432
	max.	140*	150**	1363	1426	—	36	—	60*	1470
F.S. italiane Locomotive	min.	139,3		1357	1402	22	27,65	35	3	1433
	max.	140,7		1366	1430	31,35	36	75,5	68*	1470
Elettrotreni ed Elettromotrici	min.	135		1357	1402	22	27,65	40	3	1433
	max.	140,5		1366	1430	31,35	36	65,5	68*	1470
Automotrici	min.	—		1361	1406	22	28	22	2	1433
	max.	140,5		1366	1431	32	36	65	64*	1470
Veicoli	min.	134,5		1359	1400	20	27,65	20	6	1433
	max.	140,5		1361	1427	32,35	36	65,5	70*	1470

\* Per le ruote da costruire  
 \*\* Per le ruote costruite prima del 1939  
 \* Col max. allargamento in curva.



# Veicoli ferroviari dimensioni (1)

	Carrozze	Carri merci
Numero assi	4	2 oppure 4
Lunghezza totale [m]	17,8÷26,4	10,58÷19,9
Larghezza cassa [m]	2,85÷2,9	2,68÷3,03
Passo carrelli* [m]	2,15÷2,50	1,80
Peso a pieno carico [tonn]	31÷42	36÷80
Peso per asse (max) [tonn/asse]	7,8÷10,5	18÷20

\* Si definisce *passo* la distanza tra le sale estreme di un carrello.

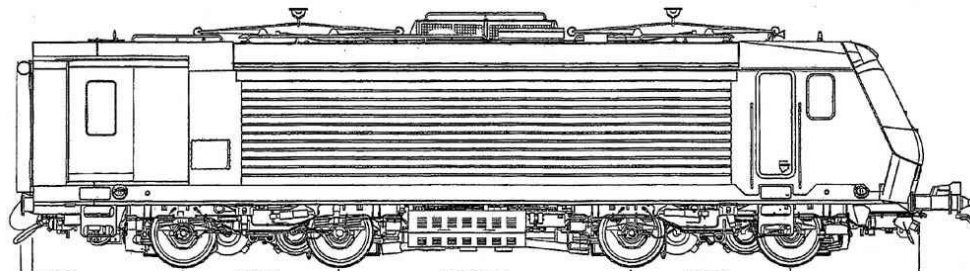
## Carrozze e carri



## Veicoli ferroviari dimensioni (2)

	Elettrica	Diesel-elettrica
Numero assi	4 ÷ 6	4
Lunghezza totale [m]	16,8 ÷ 18,3	14,1
Peso [tonn]	82 ÷ 120	76
Peso per asse (max) $\left[\frac{\text{tonn}}{\text{asse}}\right]$	20 ÷ 20,5	19
Numero motori	4 ÷ 6	2
Velocità massima $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	150 ÷ 200	130
Sforzo di trazione massimo [kN]	215 ÷ 240	216

Locomotive





# Veicoli ferroviari dimensioni (3)

## PREFAZIONE GENERALE all'Orario di Servizio

EDIZIONE 1963  
RISTAMPA 2007

**COMPUTO DELLA MASSA RIMORCHIATA (art.46 della Prefazione Generale all'Orario di Servizio)**

**1. Il materiale rimorchiato dei treni si divide in tre gruppi:**

- a) veicoli ordinari per treni viaggiatori: carrozze, bagagliai, postali, cellulari e carri riscaldatori;
- b) veicoli ordinari per treni merci: carri di tutti i tipi, compresi carri speciali come carri gru, carri soccorso, ecc.;
- c) locomotive, automotori ed automotrici che viaggiano inattivi e rimorchi delle automotrici.

**2. La massa rimorchiata, prestazione utilizzata dei treni, si ottiene sommando la massa lorda (tara più carico) dei veicoli carichi, la tara dei veicoli vuoti, la massa reale delle automotrici (Tabelle 14 e 15) e quella virtuale delle locomotive inattive in composizione (Tabella 13). Non entra nel computo la massa dei mezzi di trazione attivi o trainanti se stessi.**

**3. La massa di ogni veicolo si arrotonda trascurando le frazioni inferiori alla mezza tonnellata e computando per una tonnellata le frazioni uguali o superiori alla mezza tonnellata.**

**Per i veicoli carichi riportati nella Tabella 10 la massa lorda si ottiene sommando la tara al carico convenzionale indicato nella tabella stessa.**

**La massa degli automotori limitatamente ai gruppi 208 e 213, si trascura.**

**4. Sui veicoli F.S. ed esteri per i treni viaggiatori provvisti di marcatura uniforme la tara arrotondata è iscritta entro un rettangolo (comprendente anche i posti a sedere) riportato su entrambi i lati della cassa sotto il numero di servizio del veicolo.**

**Sui veicoli F.S. per treni viaggiatori non provvisti di marcatura uniforme e sui veicoli F.S. per treni merci la tara arrotondata è scritta, rispettivamente in giallo ed in bianco, entro un semicerchio riportato su entrambi i lati della cassa o del telaio nell'angolo inferiore destro. Analoga iscrizione esiste su alcuni veicoli di altre Amministrazioni. Ove tali iscrizioni eccezionalmente mancassero si prenderà come tara quella dei veicoli simili.**



# Veicoli ferroviari dimensioni (4)

**TABELLA 10**

**Carico convenzionale dei veicoli**

Tipo di veicoli	Carico convenzionale t
Carrozze a carrelli di 1 <sup>a</sup> classe, cuccette miste, carrozze miste	4
Carrozze a carrelli di 2 <sup>a</sup> classe e cuccette di 2 <sup>a</sup> classe, carrozze di 2 <sup>a</sup> classe con compartimento ristoro, cellulari	5
Carrozze di 2 <sup>a</sup> classe a piano ribassato	6
Carrozze a due piani	12
Carrozze salone	1
Carrozze ristorante, carrozze bar e self-service	0
Carrozze di servizio	2
Carrozze letti	2
Carrozze sanitarie	4
Bagagliai, Postali e Bagagliai - posta a carrelli (*)	5
Bagagliai ad assi, Bagagliai - Posta ad assi, Carrozze Postali ad assi	2
Veicoli trasporto auto su treni viaggiatori	2
Carri a due piani incorporati nei treni auto-cuccette e altri treni di viaggiatori (**)	1
Carri carichi di militari, con bestiame in genere o con merce voluminosa	3
Carri misti	3
Carri con bestiame di grossa taglia { di superficie fino a 24 m <sup>2</sup> ..... di superficie oltre 24 m <sup>2</sup> e fino a 30 m <sup>2</sup> ..... di superficie oltre 30 m <sup>2</sup> .....	6 7 8
Carri con bestiame minuto, per ogni piano caricato	2
<b>Veicoli riscaldatori gruppo:</b>	
- 60 83 99 24 916 al 921	9
- 60 83 99 25 830 al 990	12
<b>Furgoni generatori elettrici gruppo:</b>	
- 60 83 99 79 800 al 929	1

(\*) Per i bagagliai utilizzati in composizione ai treni Omnia-Express deve essere considerata la massa totale (tara+carico) arrotondata come detto al comma 3.

(\*\*) Deve essere accreditata 1 t per ogni veicolo trasportato (automobili, carovane, rimorchi, roulotte, battelli, ecc.).

**TABELLA 15**

**Masse in assetto di servizio: elettrotreni, automotrici elettriche e relativi rimorchi**

	Gruppo	Massa a vuoto t	Carico	
			Normale t	Massimo t (*)
ETR 220	rapp. 31/53	175	17	20
ETR 240	241÷246	185	16	17
ETR 250	251÷254	181	11	14
ETR 300	302	358	29	29
ETR 401		161	12	13
ETR 450	BA, BAC, BAP, BB, BBc	45	3,5	3,5
	BBP, BBPc	46	3,5	3,5
	R	41	3,5	3,5
ETR 460	BAC 002÷006 e 009÷010 (1)	52	4	4
	BAC 052÷056 e 059÷060 (2)	52	5	5
	BA 102÷106 e 109÷110 (1)	51	5	5
	BB 202÷206 e 209÷210 (1)	51	4	4
	BB 253÷262 e 267÷270 (1)	51	5	5
	RA 302÷306 e 309÷310 (2)	44	5	5
	RH 502÷506 e 509÷510 (1)	44	3	3
	RB 402÷406 e 409÷410	44	—	—
ETR 460 P	BAC 001; 007; 008 (1)	54	4	4
	BAC 051; 057; 058 (2)	54	5	5
	BB t201; 207; 208 (1)	53	4	4
	BB t251; 263; 265 (2)	53	5,5	5,5
	BB t252; 264; 266 (2)	53	5,5	5,5
	BA t101; 107; 108 (2)	50	5,5	5,5
	RA t301; 307; 308 (2)	45	5,5	5,5
	RH t501; 507; 508 (1)	45	3	3
ETR 470	RB t401; 407; 408	45	—	—
	BAC 051÷059 (2)	53	5	5
	RA 301÷309 (2)	53	5	5
	RA 501÷509 (1)	53	4	4
	BB 251÷268 (2)	52	5	5
	BAC 001÷009 (1)	52	4	4
	BB 201÷209 (1)	52	4	4
	RB 401÷409	51	—	—
ETR 480	BAH 101÷109 (2)	50	5	5
	BAC 001÷015 (1)	52	4	4
	BAC 051÷065 (2)	52	5	5
	BA 101÷115 (2)	51	5	5
	BB 201÷215 (1)	51	4	4
	BB 601÷630 (2)	51	5	5
	RA 310÷315 (2)	44	5	5
	RH 501÷515 (1)	44	3	3
	RB 401÷415	44	—	—

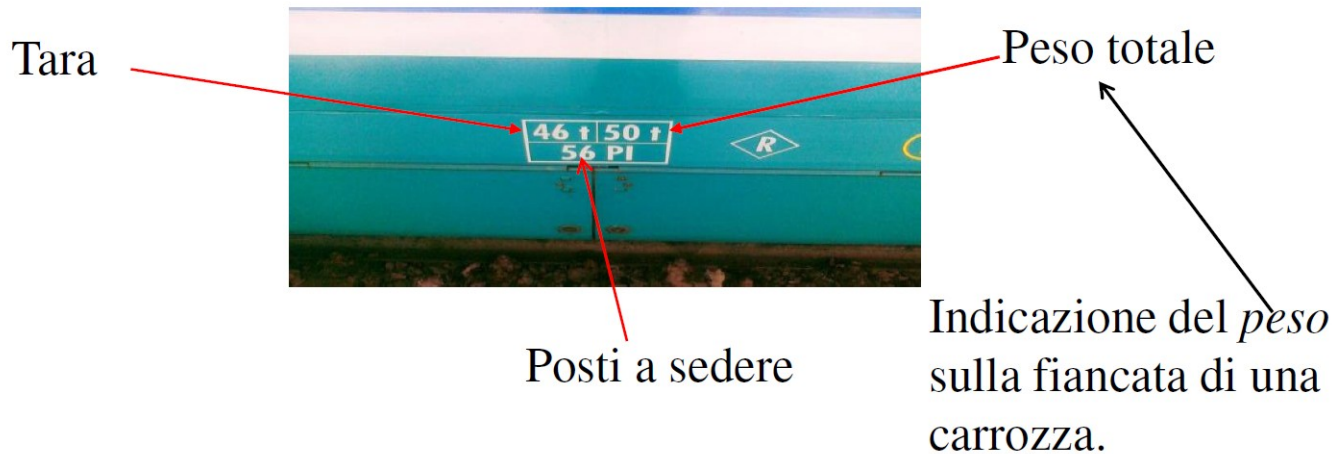
(\*) I valori relativi al carico massimo si utilizzano quando il numero dei viaggiatori supera quello previsto dalla colonna (a) della Tabella 42.

(1) veicolo di 1<sup>a</sup> classe.

(2) veicolo di 2<sup>a</sup> classe.

# Veicoli ferroviari dimensioni (5)

Il peso di una carrozza è indicato sulla fiancata della carrozza stessa

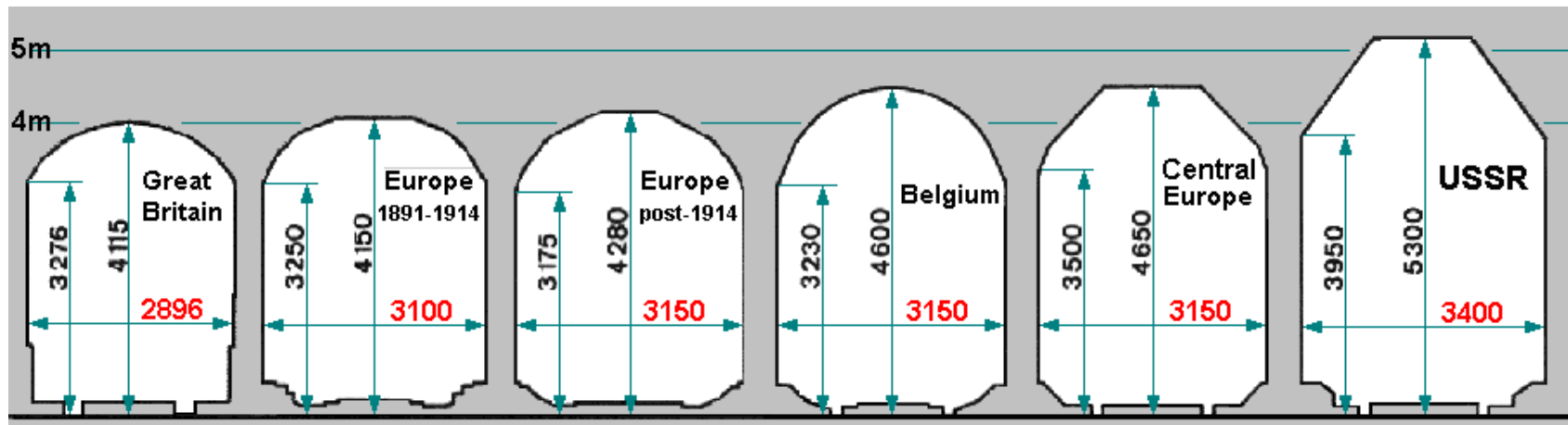


# Veicoli ferroviari Sagoma limite (1)

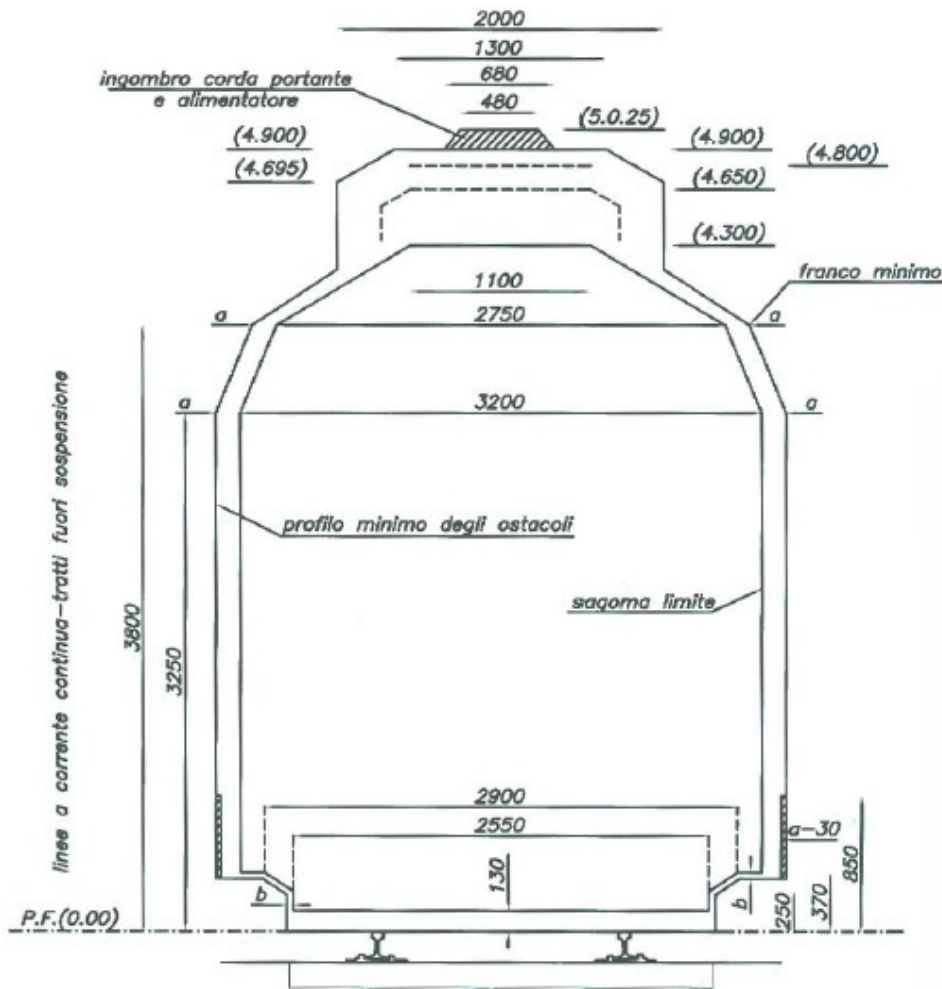
La **SAGOMA LIMITE** (o **GABARIT**) è la figura entro la quale deve essere contenuta la sezione trasversale di un veicolo. La sagoma, o Gabarit, è una poligonale chiusa all'interno della quale rientra la sezione trasversale del veicolo ferroviario, quando esso è fermo, con le sue ruote poggiate sulle due rotaie, in rettilineo. Quindi la sagoma è il contorno di riferimento, all'interno del quale il costruttore del veicolo deve far rientrare il suo mezzo.

Una certa sagoma limite, in condizione dinamiche e/o in condizione di curve ferroviarie, oscilla e dà luogo ad una **SAGOMA CINEMATICA**. La Sagoma Cinematica di un Gabarit dipende da tre variabili: raggio di curvatura; Sopraelevazione; Velocità.

Per ogni Sagoma Limite esistono diversi profili cinematici, ciascuno relativo a determinate condizioni di raggio di curva, sopraelevazione e velocità del treno.



# Veicoli ferroviari Sagoma limite (2)



In figura è riportata la sagoma limite per le linee ferroviarie italiane. Essa include una maggiorazione nella parte superiore per consentire anche il passaggio dei pantografi e l'installazione della linea elettrica di contatto, della relativa fune portante e degli organi di sostegno della linea stessa, lasciando anche, rispetto alle apparecchiature sotto tensione, opportuni franchi, detti franchi elettrici (il Gabarit è dunque riferito anche alle linee elettrificate).

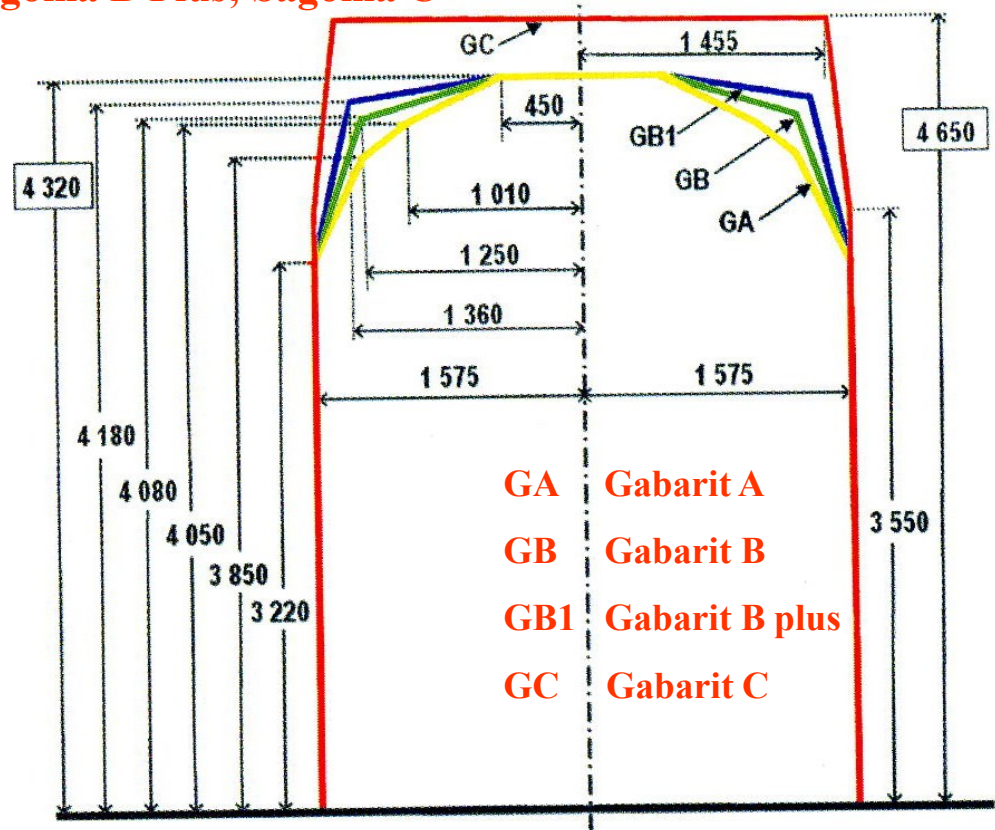
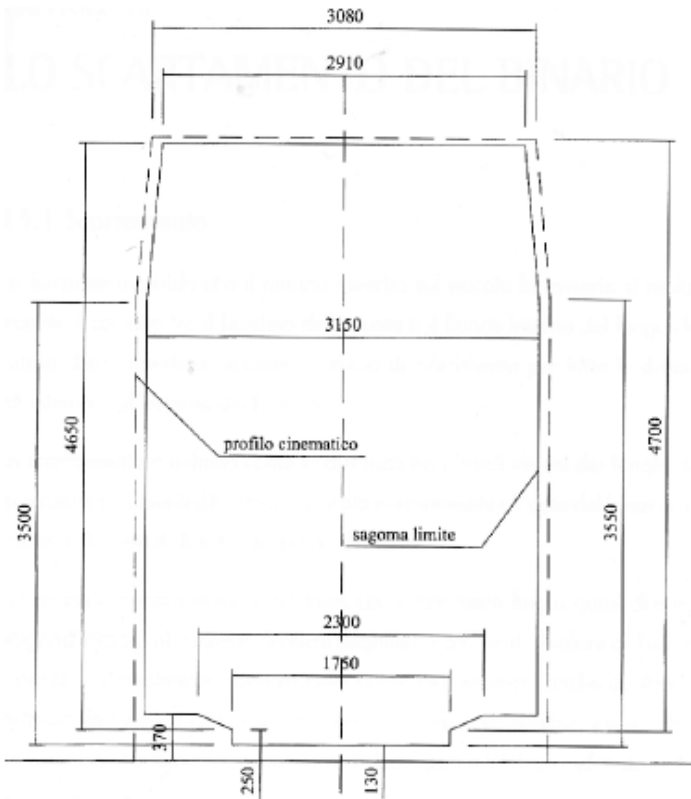
Al di là della sagoma cinematica è possibile prevedere un elemento fisso dell'infrastruttura, come, ad esempio, un palo di elettrificazione, un segnale, ecc.. Fissata la distanza di sicurezza dalla sagoma cinematica, si ottiene una poligonale che delimita l'area in cui non devono ricadere ostacoli fissi, denominata **PROFILO DEGLI OSTACOLI**.

In ogni punto di una linea significativamente estesa, cambiando raggi di curva, sopraelevazioni e velocità, cambia il Profilo degli Ostacoli. Per **PROFILO MINIMO DEGLI OSTACOLI** (P.M.O.) si intende il Profilo degli Ostacoli ottenuto tenendo in considerazione i valori minimi dei Profili degli Ostacoli che si hanno lungo la linea.

## Veicoli ferroviari Sagoma limite (3)

**Le Specifiche Tecniche di Interoperabilità delle linee convenzionali e quelle dell'Alta velocità ammettono i Gabarit A, B e C.**

**Le Sagome Limite per la Rete Nazionale FS sono le seguenti: Sagoma FS; Sagoma G1 della Fiche 505; Sagoma B della Fiche 506; Sagoma B Plus; Sagoma C**





# Veicoli ferroviari Sagoma limite (4)

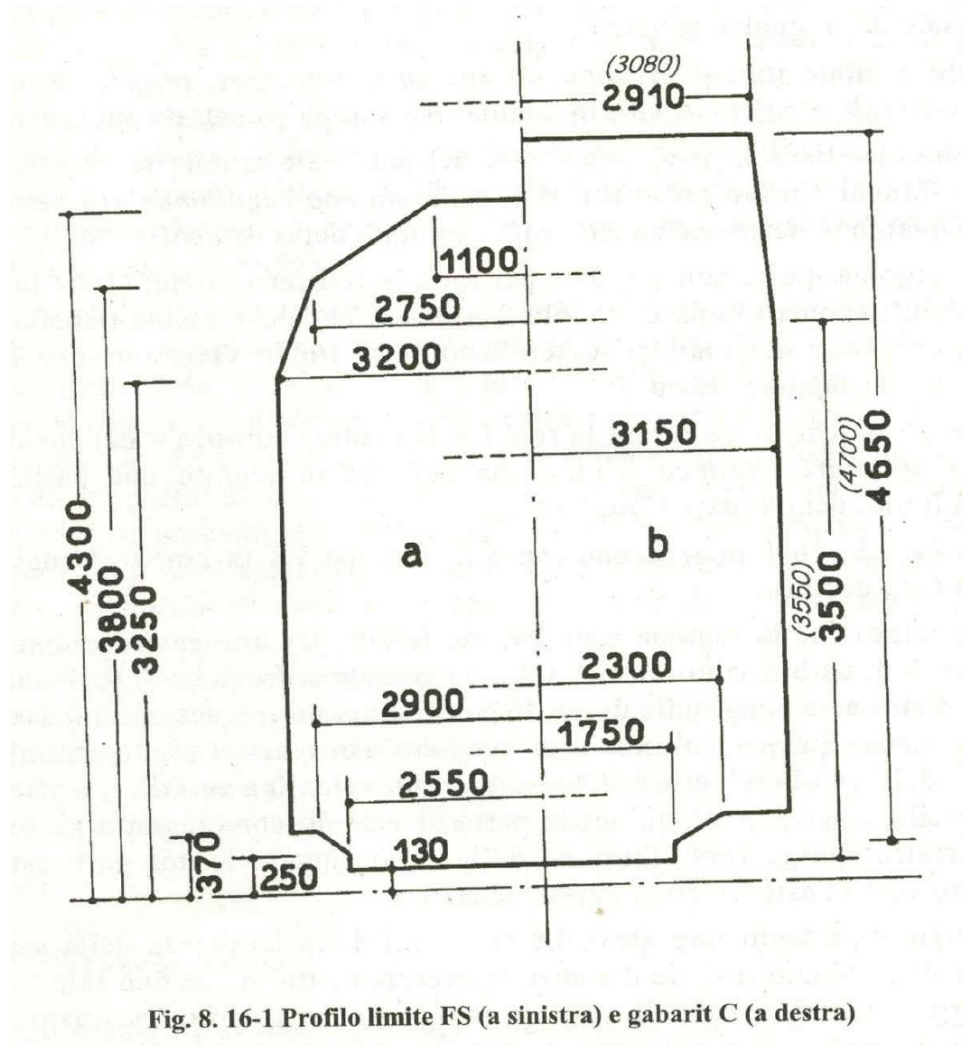
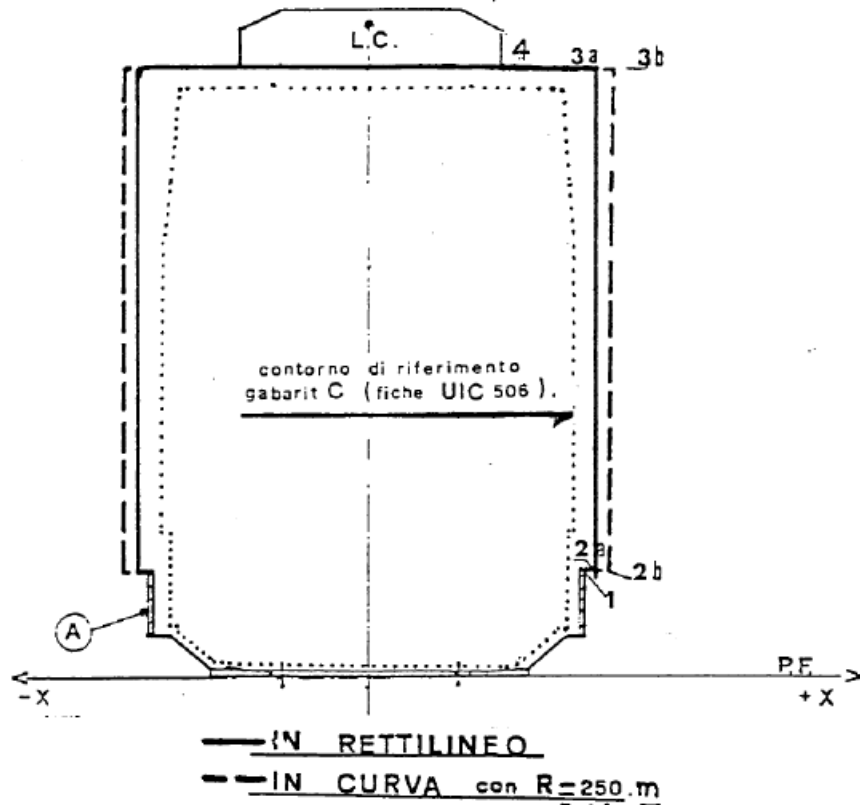


Fig. 8. 16-1 Profilo limite FS (a sinistra) e gabarit C (a destra)

## Veicoli ferroviari Sagoma limite (5)



**Fissato quindi il tracciato di una linea (raggi di curva, sopraelevazione e velocità) ed il Gabarit che si vuole far transitare per quella linea, è possibile ricavare il PMO della linea, uno in rettilineo e l'altro, più restrittivo, da considerare se la linea ha raggio di curva pari a 250m.**

## In Italia sono definiti cinque PMO:

**PMO n.1 ammette la sagoma FS e sagoma G1 della Fiche 505;**

## PMO n.2 ammette la sagoma B della Fiche 506;

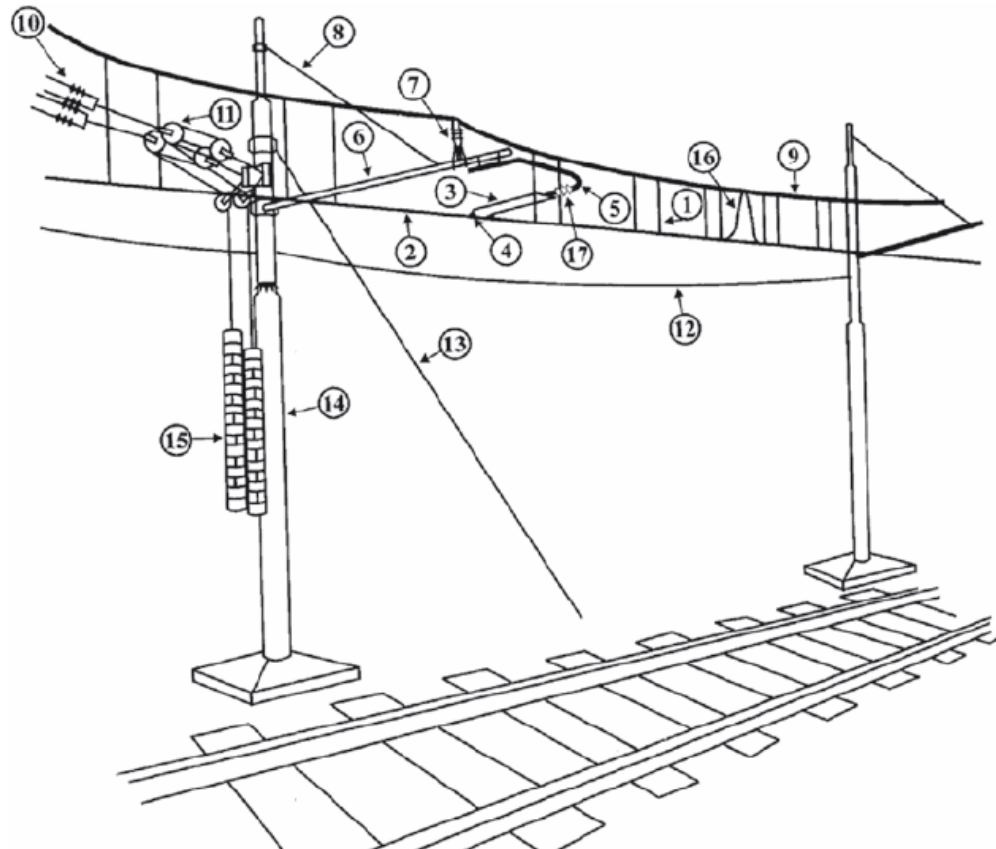
## PMO n.3 ammette la sagoma B plus;

**PMO n.4 ammette la sagoma C (valido solo per linee preesistenti al luglio 1990);**

**PMO n.5 ammette la sagoma C (valido solo per linee di nuova costruzione).**

## P.M.O. 5

# Linea di contatto trazione elettrica (1)



- 1 Pendino,
- 2 Conduttori
- 3 Tirantini di poligonazione
- 4 Morsetti di fissaggio
- 5 Braccio di poligonazione
- 6 Mensola
- 7 Isolatore della fune portante,
- 8 Tirante palo mensola
- 9 Fune portante
- 10 Isolatore di ormeggio
- 11 Dispositivo di regolazione,
- 12 Trefolo di protezione
- 13 Tirante a terra
- 14 Palo T.E
- 15 Contrappesi
- 16 Cavallotto di continuità,
- 17 Isolatore di poligonazione

# Linea di contatto trazione elettrica (2)

**Specifica RFI «La progettazione e l'esecuzione di cavalcavia e passerelle pedonali sulla sede ferroviaria»**

## **1.1.3.1 Cavalcavia su linee elettrificate a corrente continua**

**Tra l'intradosso del cavalcavia e gli impianti della trazione elettrica si deve assicurare un franco elettrico minimo di 30 cm.**

**Di conseguenza si dovrà assicurare un'altezza minima di 6,90 mt, tra il piano del ferro e l'intradosso dell'impalcato. Tale valore è calcolato a partire dalle seguenti ipotesi:**

- **linea in orizzontale;**
- **libero passaggio delle condutture sotto il cavalcavia;**
- **filo di contatto a m 5,20 dal PF;**
- **distanza tra la corda portante e filo di contatto, in corrispondenza di un palo della TE, pari a m 1,40.**

## **1.1.3.2 Cavalcavia su linee elettrificate a corrente alternata a 25 Kv**

**Tra l'intradosso del cavalcavia e gli impianti della trazione elettrica si deve assicurare un franco elettrico minimo di 50 cm.**

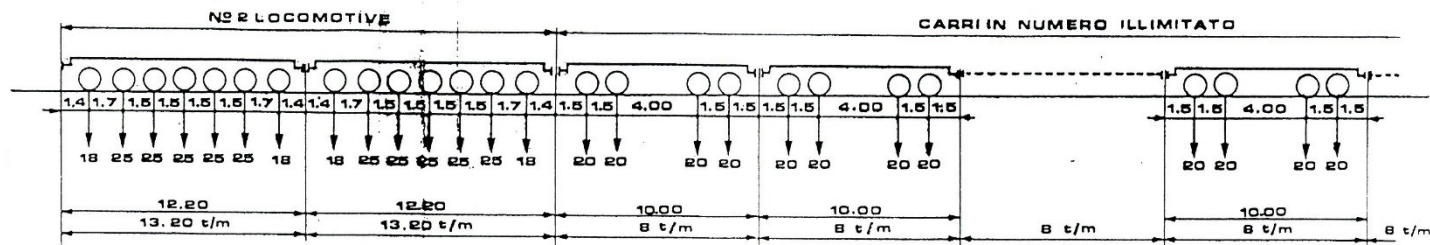
**Di conseguenza l'altezza libera H minima da assicurare tra l'intradosso del cavalcavia ed il piano del ferro è pari a 7,20 mt. Tale valore è calcolato a partire dalle seguenti ipotesi:**

- **linea in orizzontale;**
- **libero passaggio delle condutture sotto il cavalcavia;**
- **filo di contatto a m 5,30 dal PF;**
- **distanza tra la corda portante e filo di contatto, in corrispondenza di un palo della TE, pari a m 1,40.**

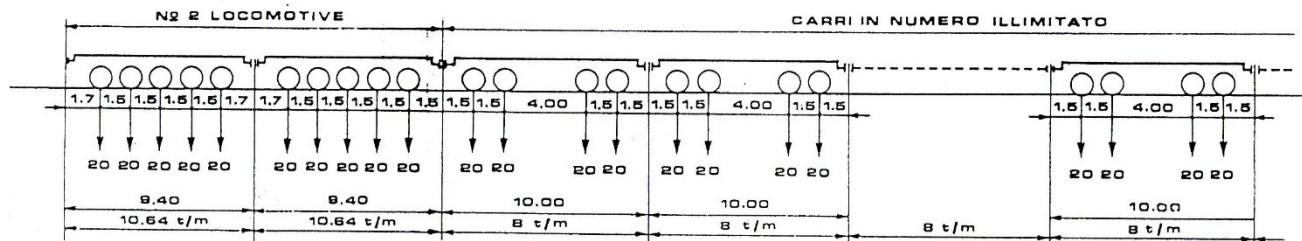
# Veicoli ferroviari pesi massimi (1)

Categoria	Massa per asse in tonnellate	Massa per metro corrente in tonnellate
A	16	5,0
B1	18	5,0
B2	18	6,4
C2	20	6,4
C3	20	7,2
C4	20	8,0
D2	22,5	6,4
D3	22,5	7,2
D4	22,5	8,0

TRENO TIPO "A"



TRENO TIPO "B"





# Veicoli ferroviari pesi massimi (2)

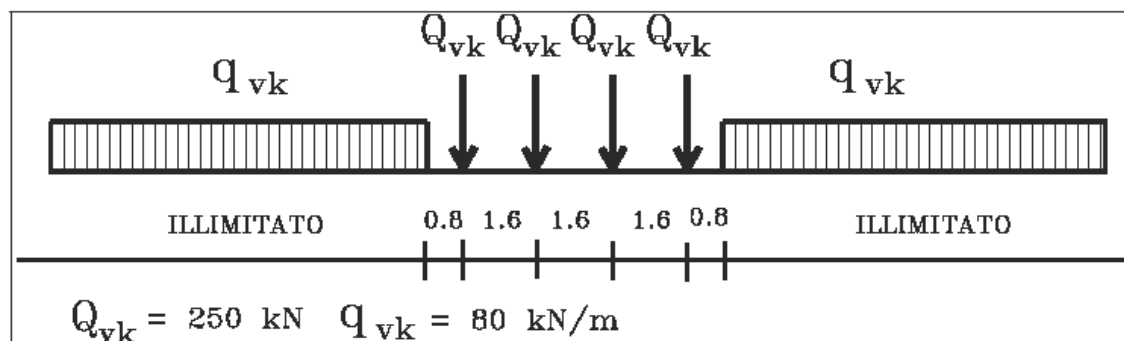


Fig. 1.4.1.2-1 - Treno di carico LM 71

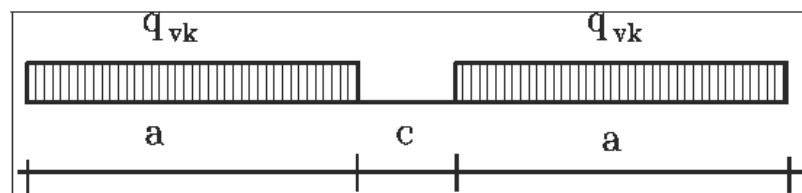
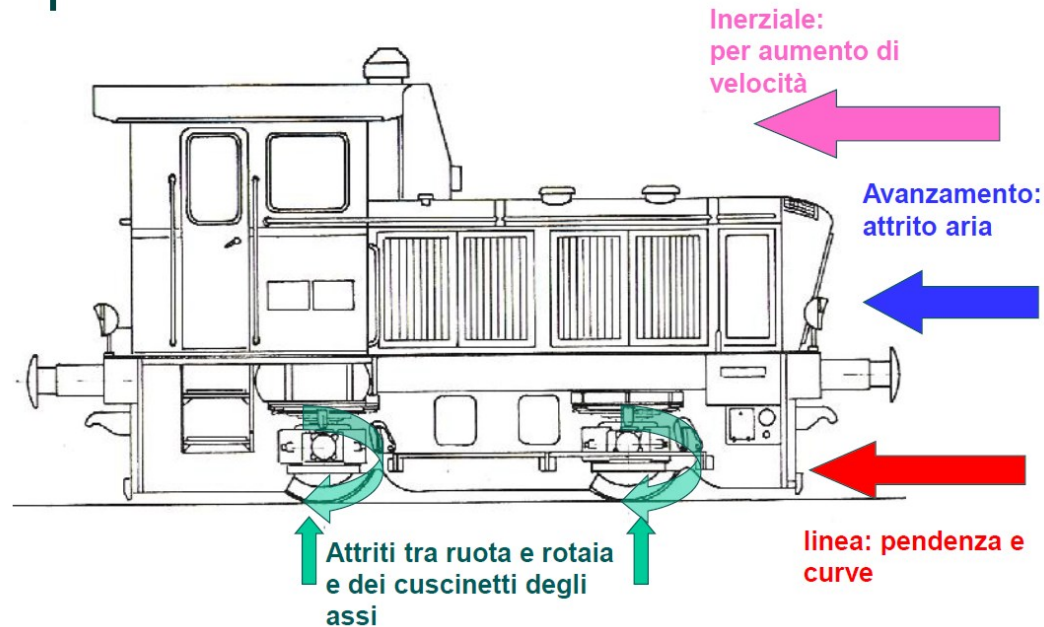


Fig. 1.4.1.2-2 - Treno di carico SW

Tipo di Carico	$q_{vk}$ [kN/m]	$a$ [m]	$c$ [m]
SW/0	133	15.0	5.3
SW/2	150	25.0	7.0

Tab.1.4.1.2 Caratteristiche Treni di Carico SW

# Resistenze veicoli ferroviari



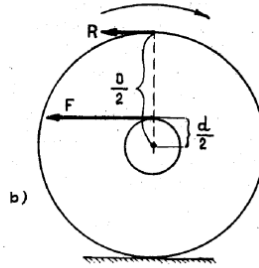
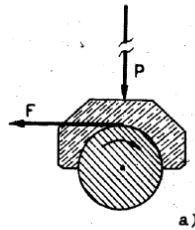
**Resistenze ordinarie:** sono le resistenze sempre presenti in ogni istante del moto:

- Resistenza di attrito nei perni (tra cuscinetto e asse ruota)
- Resistenza al rotolamento (tra zona di contatto ruota e strada)
- Resistenza aerodinamica (resistenza del fluido che deve essere spostato dal veicolo in moto)

**Resistenze accidentali:** sono le resistenze che compaiono solo in determinate circostanze:

- Resistenza in curva (dovuta ad urti e strisciamenti delle ruote sul binario quando si affronta una curva)
- Resistenza di pendenza (dovuta alla componente del peso che si oppone (salita) o favorisce il moto (discesa))
- Resistenza di inerzia (dovuta alla accelerazione o decelerazione del veicolo)

# Resistenze ordinarie veicoli ferroviari (1)



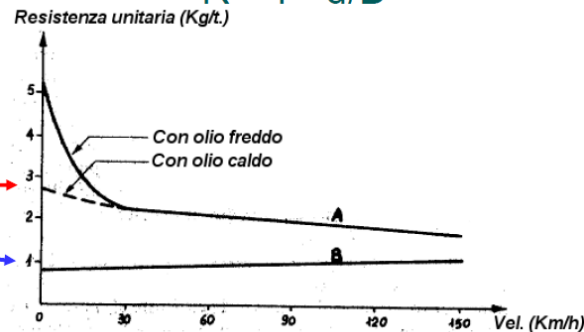
Resistenza d'attrito  $F = P f$

$f$  = coeff. attrito fusello-cuscinetto (circa 0,007)

Resistenza  
all'avanzamento  
 $R = F \cdot d/D$

A = Radente  
(strisciamento)

B = Volvente (a rulli)



1. Perno cuscinetto  $R_1 = f \cdot (d/D) \cdot 1000 \cdot P$  [daN];

$f$  coefficiente d'attrito pari a circa 1/70

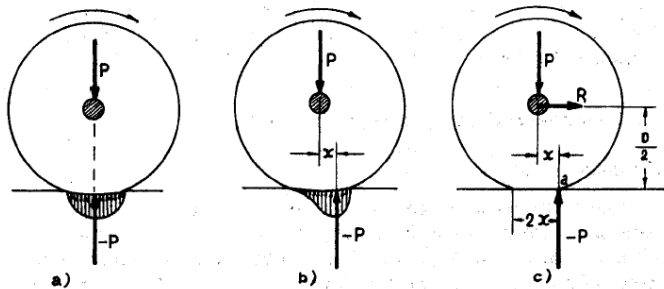
$d$  diametro del fusello pari a circa 10 – 12 cm

$D$  diametro ruota pari a circa 100 cm

$P$  peso che si scarica sul cuscinetto, espresso in tonnellate di peso

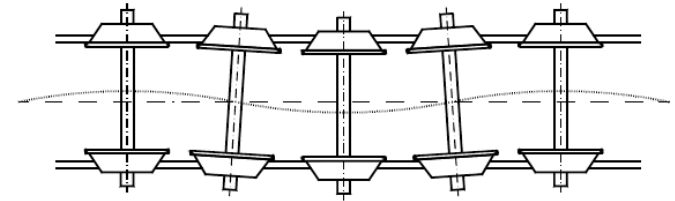
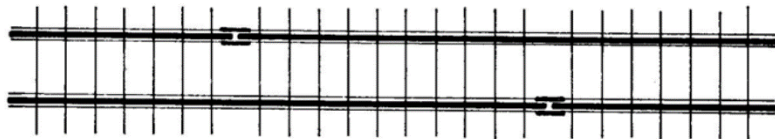
# Resistenze ordinarie veicoli ferroviari (2)

La reazione d'appoggio, per effetto dell'isteresi elastica dei materiali, non agisce sulla stessa retta d'azione della forza Peso.



Ciò ingenera un momento resistente

$$M_r = -P \cdot x$$



*Moto di serpeggio*



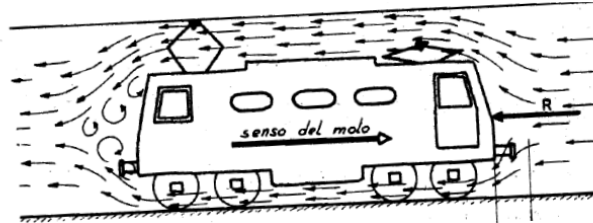
2. Ruota rotaia  $R_2$  (= res. attrito volvente + res. serpeggiamento + res. giunzioni rotaie)

$$1,5 - 1,6 \text{ [daN/t]}$$

$$R_s = f_s * V * P \text{ [daN]}$$

$$0,5 \text{ [daN/t]}$$

# Resistenze ordinarie veicoli ferroviari (3)



Dipende dalla sezione frontale  $S$ , dal fluido in cui ci si muove (aria)  $k$ , dalla velocità  $V$  e dall'aereodinamicità  $C$ .

$$R = k S C V^2$$

dove:

$k = 0,0065$  per l'aria valore costante

$C = 1$  per rotabili non sagomati,  $0,35 \div 0,5$  per m.d.t o Ale

$S = 9 \text{ m}^2$  per loc.;  $7 \text{ m}^2$  per Ale e Aln

**3. Dell'aria  $R_a$  (= res. frontale + res. laterale) =  $0,001 * v^2 * S * P$  [daN]**

$v$  = velocità relativa espressa in [m/s]

$S$  = superficie convenzionale =  $7 + 0,84 * n$  [m<sup>2</sup>] con “n” numero carri

$P$  = peso espresso in tonnellate peso

# Resistenze ordinarie veicoli ferroviari (4)

## Formule globali per le resistenze ordinarie

$$r = a + bV + cV^2 \quad (N / KN)$$

Formula *trinomia*

$$r = a + bV^2 \quad (N / KN)$$

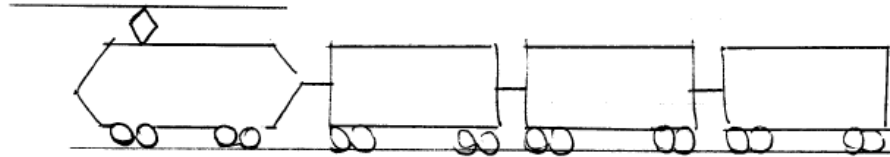
Formula *binomia*

Le formule sono in termini di *resistenze specifiche*: quindi ipotizzano che le resistenze siano proporzionali al peso del veicolo.

Sono utilizzate soprattutto nel caso ferroviario: in questo caso comunque la resistenza dell'aria è proporzionale alla lunghezza e perciò al peso del veicolo.



# Resistenze ordinarie veicoli ferroviari (5)



Misuro la corrente assorbita:  $I$ .

C'è una relazione che lega  $I$  alla coppia alle ruote  $C(I)$

$$T = \frac{C(I)}{\mathcal{R}}$$

← Coppia alle ruote  
← Raggio delle ruote

Equazione generale del moto:  $T - R = M_e \frac{dv}{dt}$

Nel caso di moto uniforme:  $\frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow T = R$

*Misurando  $T$  misuro  $R$ .*

# Resistenze ordinarie veicoli ferroviari (6)

Formula di Clark (valida per basse velocità)

$$r_0 = 2,4 + 2,65 \cdot \frac{V^2}{1000} \quad [\text{daN/t}]$$

Formula di Erfurt (valida per medie velocità)

$$r_0 = 2,4 + 2,65 \cdot \frac{V^2}{1300} \quad [\text{daN/t}]$$

Formula di Von Borries (valida per alte velocità)

$$r_0 = 1,6 + 0,3 \cdot V \cdot \frac{V + 50}{1000} \quad [\text{daN/t}]$$

Formula di Barbier (valida per alte velocità)

$$r_0 = 1,6 + 0,456 \cdot V \cdot \frac{V + 10}{1000} \quad [\text{daN/t}]$$

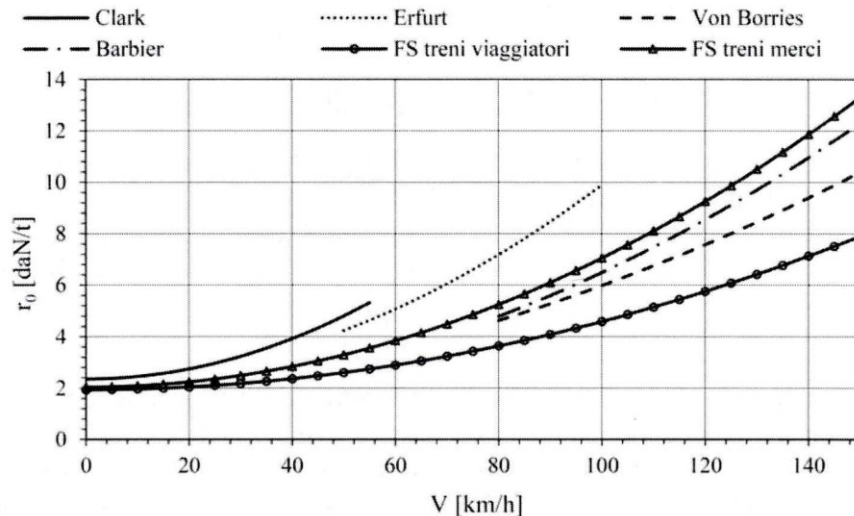
fino a velocità massime di 140÷150 Km/h, le nostre FS, utilizzano le seguenti espressioni:

Per treni viaggiatori ordinari

$$r_0 = 1,94 + 2,65 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 \quad [\text{daN/t}]$$

Per treni merci

$$r_0 = 2,04 + 5,01 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 \quad [\text{daN/t}]$$



# Resistenze ordinarie veicoli ferroviari (7)

**Per i treni ad alta velocità in Francia (la SNCF) adotta la seguente**

In cui:  $r_0$  resistenza specifica,  $P$  peso convoglio in [t],  $p$  peso assiale in [t],  $S$  la sezione frontale [m<sup>2</sup>],  $L$  lunghezza totale del convoglio,  $p_e$  è il perimetro parziale del convoglio da rotaia a rotaia [m],  $\sum k_i$  è la somma dei coefficienti per difetti di carenatura.

$$r_0 = \left( 1,3 \cdot \sqrt{\frac{10}{p}} + 0,01 \cdot V \right) \cdot P + \left( 0,0021 \cdot S + 0,0025 \cdot p_e \cdot \frac{L - 45}{100} + \sum k_i \right) \cdot V^2 \quad [\text{daN/t}]$$

**In Giappone sulla rete AV Sinkansen si adotta la seguente**

In cui  $P$  peso complessivo del treno [t],  $V$  velocità [km/h],  $L$  lunghezza complessiva treno.

$$R_0 = (1,2 + 0,022 \cdot V) \cdot P + (0,013 + 0,00029 \cdot L) \cdot V^2 \quad [\text{daN}]$$

Le resistenze in galleria sono superiori con  $\frac{r_{0,G}}{r_{0,A}} = 1,7 \div 1,8$

Se sono note le caratteristiche delle pareti delle gallerie la resistenza aerodinamica può essere stimata con la relazione di Parshall e Hobart;

dove  $d=4A/P_{er}$  è il diametro medio della galleria,  $A$  l'area e  $P_{er}$  il perimetro della galleria;  $L$  lunghezza galleria;  $\omega$  è il volume specifico dell'aria [m<sup>3</sup>/daN] (0,752 per  $T=15^\circ$  e pressione atmosferica);  $\gamma$  è un coefficiente che dipende dal tipo di galleria (galleria con parete liscia 0,020, galleria con parete scabra 0,027).

$$R_A = \gamma \cdot \frac{L \cdot V^2}{2 \cdot d \cdot g \cdot \omega} \quad [\text{daN}]$$

# Resistenze ordinarie veicoli ferroviari (8)

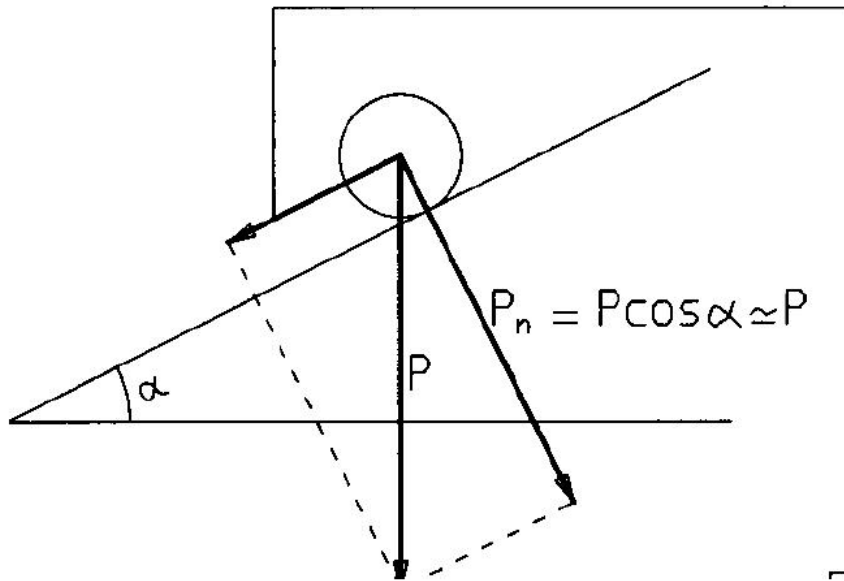
Sperimentazioni fatte in Italia negli anni '80 in gallerie, della direttissima Roma- Firenze, aventi sezione di 53,5 m<sup>2</sup> e diverse lunghezze hanno indicato le seguenti espressioni per la resistenza specifica complessiva in galleria [daN/t]:

Tipo di CONVOGLIO	Resistenze al moto in Kg/tonn	
	All'aperto	In galleria
2 ALE 601+Rimorchio	$0,99684+0,00025 V^2$	$0,62017+0,00046 V^2$
Locomotore+4 vetture	$1,3845+0,00021 V^2$	$1,60348+0,00035 V^2$
Treno merci delle DB	$1,6952+0,00027 V^2$	$1,24463+0,00051 V^2$
ETR 500	$0,90404+0,00012 V^2$	$0,83300+0,00021 V^2$

# Resistenze accidentali, pendenza (1)

Resistenza al moto in salita

$$R_i = P \cdot \sin \alpha = P \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \alpha)^2}} \cong P \cdot \operatorname{tg} \alpha = P \cdot i$$



$$R_i = P \frac{a * i_1 + b * i_2}{l}$$

**Valida se il treno è più lungo della livelletta:**

**$l$  = lunghezza treno**

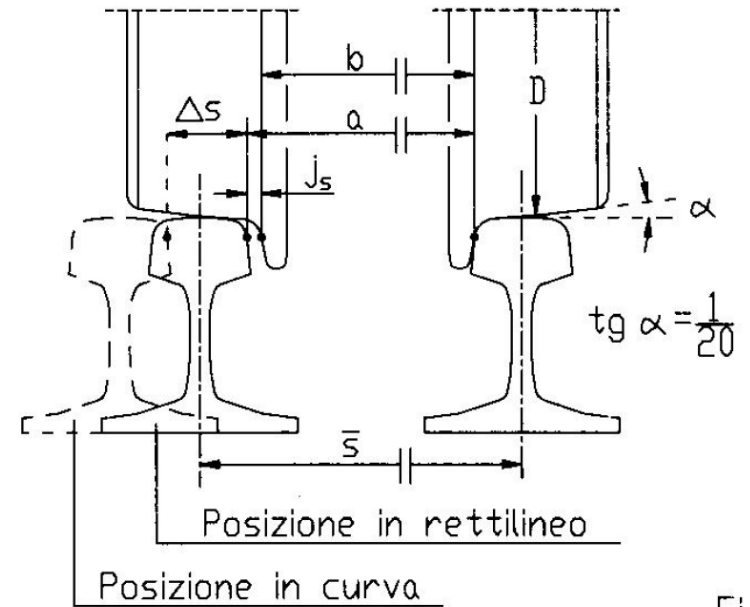
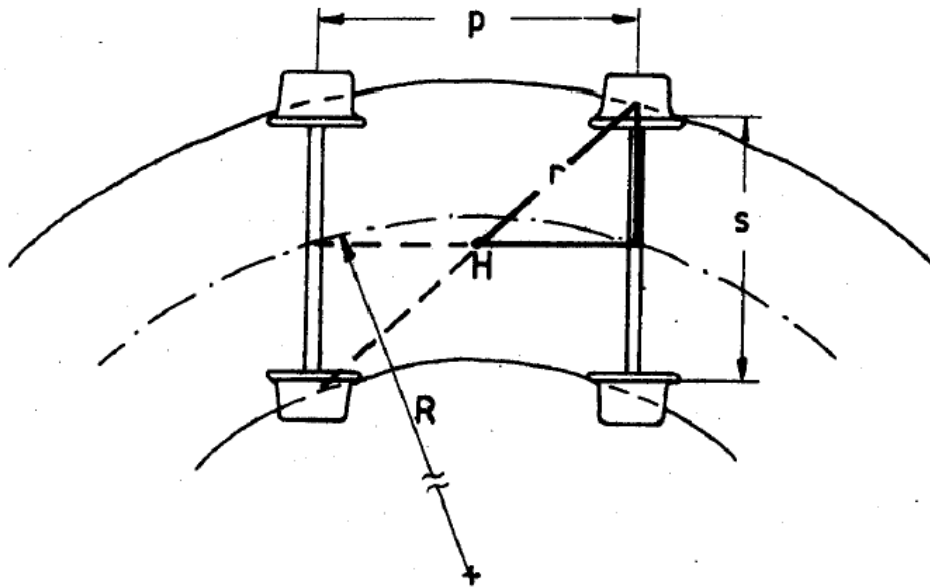
**$a$  e  $b$  lunghezze parti treno sulle diverse livellette  $i_1$  e  $i_2$**

**per pendenze  $R_i = 1000 * P * i$  [daN];**

**$P$  = peso espresso in tonnellate peso**

**$i$  = pendenza della ferrovia (espressa in valore assoluto)**

# Resistenze accidentali, curve (1)



In curva  $R_c = r_c * P$  [daN/t]; P espresso in tonnellate

Per  $r_c$  una espressione utilizzata è quella di Röckl

$$r_c = \frac{k_1}{R - k_2} \left[ \frac{daN}{t} \right]$$

Raggio R [m]	$k_1$	$k_2$
$\geq 350$	650	55
$350 \div 250$	650	65
$250 \div 150$	650	30



# Resistenze accidentali, curve (2)

Le FS hanno adottato la stessa espressione per  $R_c = r_c \cdot P$  [daN/t];  $P$  espresso in tonnellate, ma i valori di  $r_c$ , per linee a scartamento ordinario, sono quelli ottenuti da Bauman.

Raggio (m)	1.000	900	800	700	600	500	450
$r_c$ (kg/t) <sup>(1)</sup>	0,50	0,60	0,80	1,00	1,20	1,50	1,70
Raggio (m)	400	350	300	250	200	180	
$r_c$ (kg/t)	2,00	2,40	2,80	3,40	4,20	4,50	

Per le linee sopra i 1000 m di raggio, la resistenza in curva è trascurabile

Per linee a scartamento ridotto si possono impiegare altre relazioni di Röckl:

Per scartamento 1 m

$$r_c = \frac{400}{R - 20} \left[ \frac{daN}{t} \right]$$

Per scartamento 0,75 m

$$r_c = \frac{300}{R - 10} \left[ \frac{daN}{t} \right]$$

Se la curva ha uno sviluppo  $S_v$  inferiore alla lunghezza del treno  $L$  il valore della resistenza specifica  $r'_c$  è calcolabile con l'espressione:

$$r'_c = r_c \cdot \frac{S_v}{L}$$

# Resistenze accidentali, inerzia (1)

$$R_{in} = M * (1 + \mu) * a$$

**M** massa treno in [kg]

**“a”** accelerazione in [m/s<sup>2</sup>]

**μ** coefficiente di maggiorazione per masse rotanti = 0,07-0,08 per veicoli rimorchiati; 0,15 per locomotive a vapore; 0,18-0,20 per locomotive elettriche in c.c.; 0,13-0,16 per locomotive elettriche trifase; 0,35-0,45 per locomotive elettriche monofase.

**M\*(1+μ) = Me** massa equivalente

Il valore (1+μ) di un convoglio ferroviario composto da «n» veicoli ferroviari di massa «m<sub>i</sub>» è calcolabile attraverso la media ponderata

$$(1 + \mu) = \frac{\sum_{i=1}^n (1 + \mu)_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

# Grado di prestazione linea (1)

$I = r_i + r_c$   $I$  è la pendenza compensata o fittizia espressa in 0/00

$r_i$  espressa in 0/00;  $r_c$  in kg/t

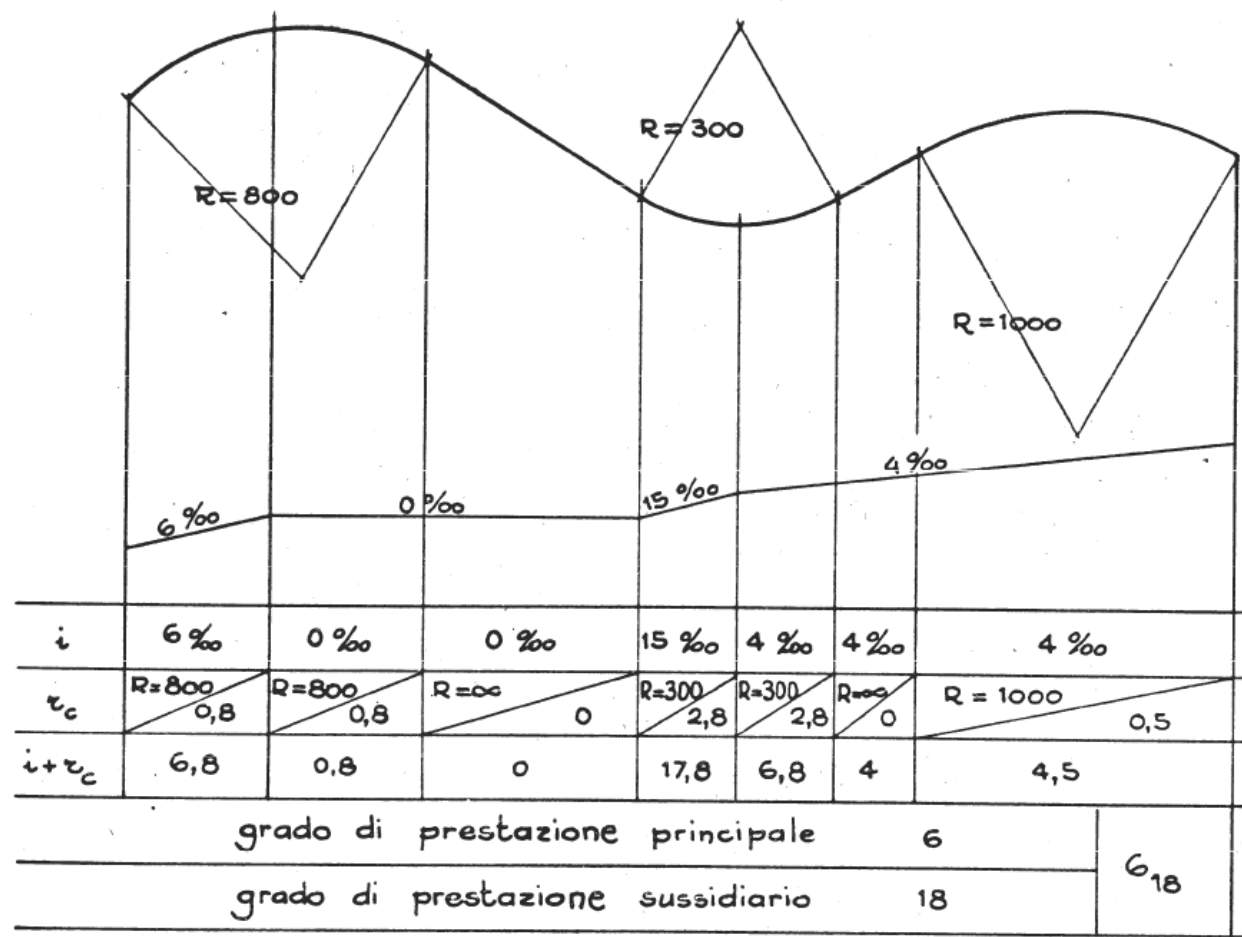
La valutazione dell' $I$ , e quindi del grado di prestazione, va fatta per tronchi elementari (denominati sezioni di carico), di lunghezza superiore a 2 km, per entrambi i sensi di marcia.

All'interno delle singole sezioni di carico i valori di  $r_i$  e  $r_c$  possono variare ma la loro somma deve essere inferiore o uguale al valore di  $I_c$  (grado di prestazione caratteristico) stabilito per la sezione.

Qualora all'interno di una sezione di carico sia presente un breve tratto (poche centinaia di metri) con una pendenza compensata superiore al grado di prestazione della sezione, per non ridurre la lunghezza della sezione sotto i 2 km si adotta un grado di prestazione sussidiario.









GRADI DI PRESTAZIONE IN R.F.I.			
Grado di Prestazione	$I$ ‰ [Kg/tonn]	Grado di Prestazione	$I$ ‰ [Kg/tonn]
1	4,50	17	17,00
2	5,00	18	18,40
3	5,50	19	19,80
4	6,00	20	20,90
5	6,50	21	21,90
6	7,00	22	22,70
7	7,70	23	24,60
8	8,40	24	25,70
9	9,20	25	27,80
10	10,00	26	29,80
11	11,00	27	30,80
12	12,00	28	32,50
13	12,90	29	34,20
14	13,80	30	37,50
15	14,60	31	40,50
16	15,80		

## Grado di prestazione linea (2)



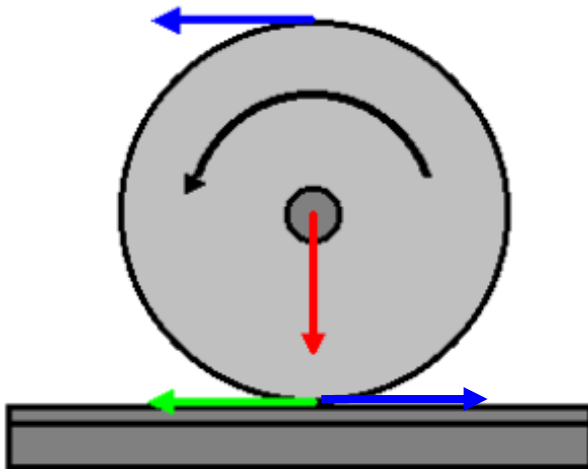
# Grado di prestazione linea (3)

Il Grado di Prestazione, delle diverse tratte che compongono una linea ferroviaria, è dichiarato dal Gestore dell'Infrastruttura, Rete Ferroviaria Italiana (RFI), in prospetti (cosiddetta Fiancata principale) contenuti in documenti, specifici di ciascuna linea: cosiddetti Fascicoli Circolazione Linee.

Grado di prestazione	Ascesa %	Progressive chilometriche	Distanze parziali	LOCALITA' DI SERVIZIO	Posti di blocco	INDICAZIONI DI SERVIZIO E PROTEZIONE P.L.	Numero e capacità binari
16	13	150,231		<b>BOLZANO</b>	303d	 (a)    	(445-690)
		149,919					
		151,705	1,786		P305d		
		152,000	0,295	Cippo			
		153,220	1,220		P307d		
		153,257	0,037	Imbocco Sud Galleria CARDANO			
		154,922	1,665		P309d		
		157,196	2,274	Imbocco Nord Galleria CARDANO			
				<b>Prato Tires</b>	311d		(600-600)
		157,997	0,801				
12	11	158,187	0,190	Imbocco Sud Galleria SCILAR		 (b)	
		158,500	0,313	Dev. U. Prato Tires			
		159,766	1,266		P313d		
		161,000	1,234	Cippo			
		161,141	0,141		P315d		
		161,339	0,198	Finestra Steg			
		162,687	1,348		P317d		
		164,061	1,374		P319d		
		165,441	1,380		P321d		
		167,191	1,750		P323d		
		168,000	0,809	Cippo			
		168,339	0,339	Finestra Rio Tisana			
		168,916	0,577		P325d		
		170,000	1,084	Cippo			
		170,266	0,266		P327d		
		171,474	1,208	Imbocco Nord Galleria SCILAR			
18	15	172,432	0,958	<b>Ponte Gardena-Laion</b>	329d	 (b)	1 (750)
		174,706	2,274		P331d		
		176,150	1,444		P333d		
		178,000	1,850		P335d		
		178,240	0,240	Chiusa			
	16	179,888	1,648		P337d		
		181,888	2,000		P339d		
		182,000	0,112	Cippo			
		183,888	1,888		P341d		
		185,650	1,762		P343d		

# Aderenza Veicoli ferroviari (1)

L'aderenza è un termine che indica il **massimo sforzo  $F$**  che può essere trasmesso in fase di avviamento, di mantenimento della velocità e di frenata attraverso il contatto ruota - rotaia



$$F < f P$$

$f$  = coefficiente di aderenza

$P$  = peso sull'asse

$$f P = A \text{ (aderenza)}$$



# Aderenza Veicoli ferroviari (2)

Coefficiente di aderenza è il rapporto tra lo sforzo di trazione ed il Peso che grava sulla ruota

$$f_{ad} = \frac{T}{P}$$

Ossia lo sforzo di trazione massimo deve essere in ogni istante:

$$\bar{T} \leq f_{ad} * P_{aderente}$$

<b>F E R R O V I A</b>	Trazione elettrica assi accoppiati	0,25 - 0,30
	Trazione elettrica assi liberi	0,20
	Trazione Diesel assi accoppiati	0,20
	Trazione Diesel assi liberi	0,167
	Trazione a vapore	0,167
<b>STRA DA</b>	Asfalto	0,65 - 0,70
	Calcestruzzo liscio	0,65 - 0,70
	Calcestruzzo ruvido	0,80 - 0,85

# Aderenza Veicoli ferroviari (3)

## **$f$** aumenta con:

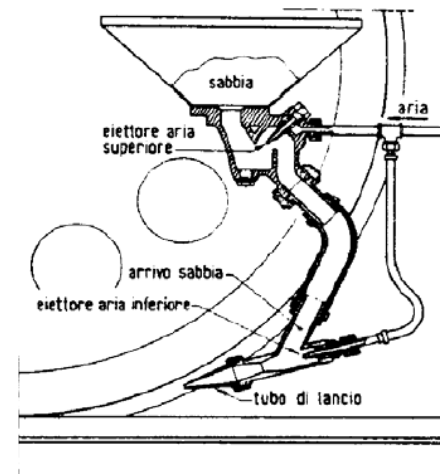
- l'aumentare del peso sull'asse;
- l'interposizione di materiale (sabbia) tra ruota e rotaia;
- Il passaggio di corrente sulla rotaia di ritorno (T.E.).

## **$f$** varia $\pm$

- per le caratteristiche dei materiali rotaia-ruota;
- con l'umidità presente sulla rotaia.

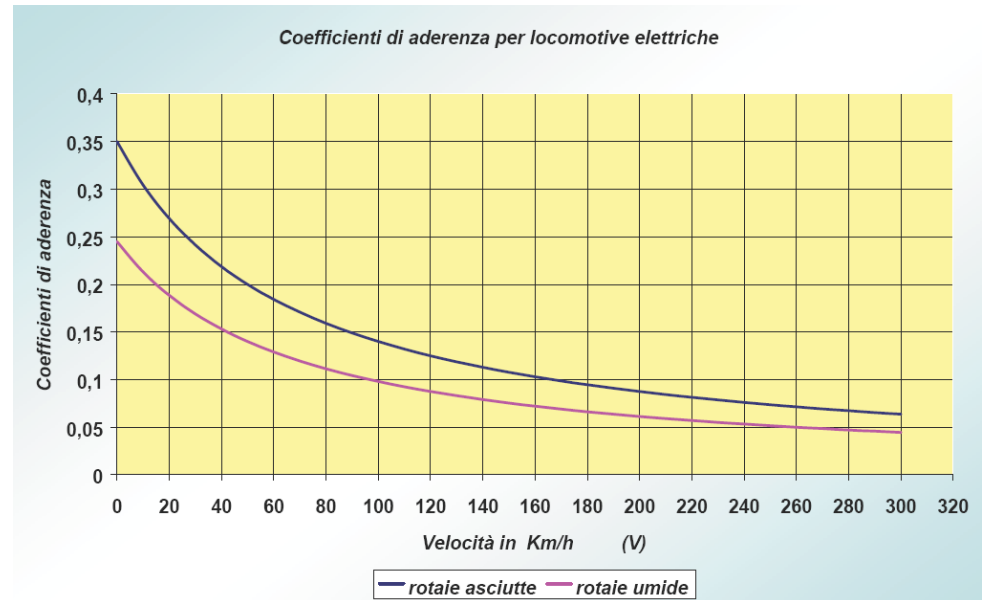
## **$f$** diminuisce

- al crescere della velocità;
- in curva.



# Aderenza Veicoli ferroviari (4)

VALORE DEL COEFFICIENTE LIMITE D'ADERENZA $\alpha_1$ SENZA RITORNO DI CORRENTE LUNGO IL BINARIO	
CONDIZIONI AMBIENTALI E DEL BINARIO	COEFFICIENTE D'ADERENZA $\alpha_1$
- binario molto asciutto con coppia motrice uniforme	$1/3 = 0,33$
- binario ampiamente dilavato dalla pioggia con coppia motrice uniforme	$1/3 = 0,33$
- binario asciutto in buone condizioni di manutenzione con coppia motrice uniforme	$1/3,5 = 0,2857$
- binario asciutto in buone condizioni di manutenzione con coppia motrice disuniforme	$1/4 = 0,25$
- binario asciutto in condizioni medie di manutenzione con coppia motrice uniforme	$1/4,5 = 0,222$
- binario asciutto in condizioni medie di manutenzione con coppia motrice disuniforme	$1/5 = 0,20$
- binario poco bagnato dalla pioggia con coppia motrice disuniforme	$1/7 = 0,14$
- binario in presenza di brina con coppia motrice disuniforme	$1/8 = 0,125$
- binario sporco con nebbia e con coppia motrice disuniforme	$1/9 = 0,11$
- binario ingrassato	$1/10 = 0,10$
- binario ingombro di foglie secche	$1/12,5 = 0,08$



L'espressione sperimentale di Muller che ci permette di quantificare il coefficiente d'aderenza vale:

$$f_{ad} = \frac{f_{ad}^*}{1 + 0,01 \cdot V}$$

dove  $f_{ad}^*$  è il coefficiente di aderenza in corrispondenza a  $V = 0$  [km/h]

Oppure si possono utilizzare altre espressioni del tipo  $f = 0,3216 - 0,0019 \cdot V + 3 \cdot 10^{-6} \cdot V^2$  con  $V$  in km/h

# Aderenza Veicoli ferroviari (5)

Durante la fase di trazione, la ruota deve rotolare senza slittare e la forza da applicare alla ruota dovrà essere

$$F < f P$$

Durante la fase di frenatura, il sistema frenante non dovrà provocare il bloccaggio delle ruote (pattinamento)

$$|-F| < f P$$

# Aderenza Veicoli ferroviari (6)

In realtà ho *sempre* una *percentuale di scorrimento*  $s$

Ruota motrice: “la ruota gira di più di quanto avanzi”.

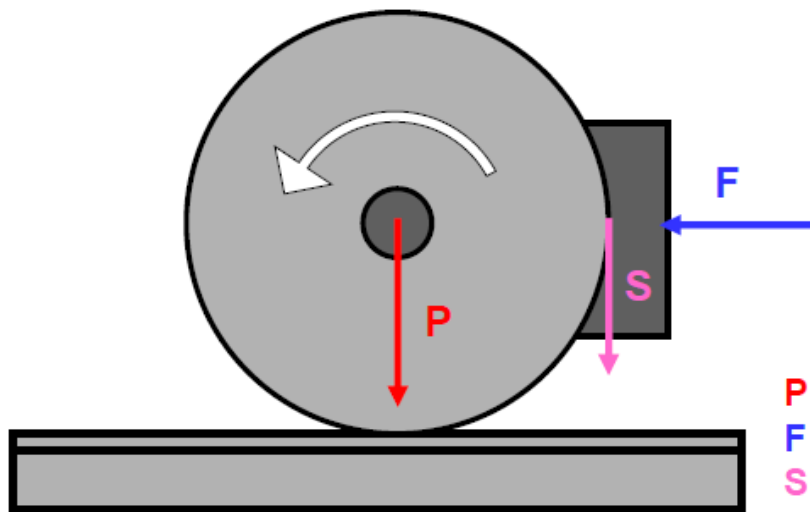
$$s = \frac{n\pi D - L}{n\pi D} = 1 - \frac{L}{n\pi D}$$

Ruota frenata: “la ruota avanza di più di quanto giri”.

$$s = \frac{L - n\pi D}{L} = 1 - \frac{n\pi D}{L}$$

# Aderenza Veicoli ferroviari (7)

- $f'$  = coefficiente di **attrito** ceppo-ruota
- $f$  = coefficiente di **aderenza** ruota-rotaia



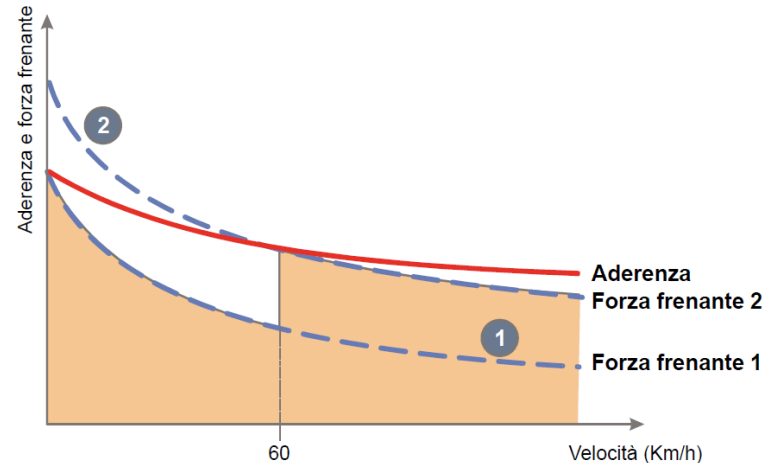
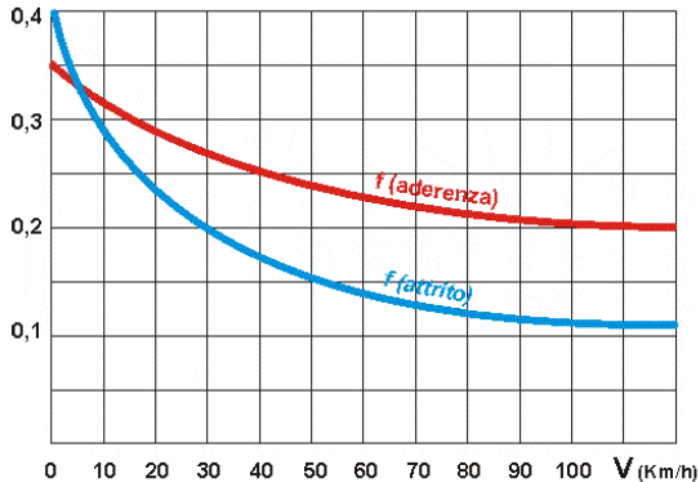
$$S = f' \cdot F \leq f \cdot P$$

dove  $f \cdot P = A$

**P** = peso dell'asse  
**F** = Sforzo frenante  
**S** = Sforzo periferico d'attrito



# Aderenza Veicoli ferroviari (8)



$$\frac{F}{P} \leq \frac{f}{f'} \quad \frac{F}{P} = \frac{f_{v=0}}{f'_{v=0}} \cong 0,7 = \lambda_r$$

**Per un freno ad unico stadio la condizione critica si determina in prossimità di velocità nulla.  $\lambda_r = f(v)$  viene chiamato percentuale peso frenato**

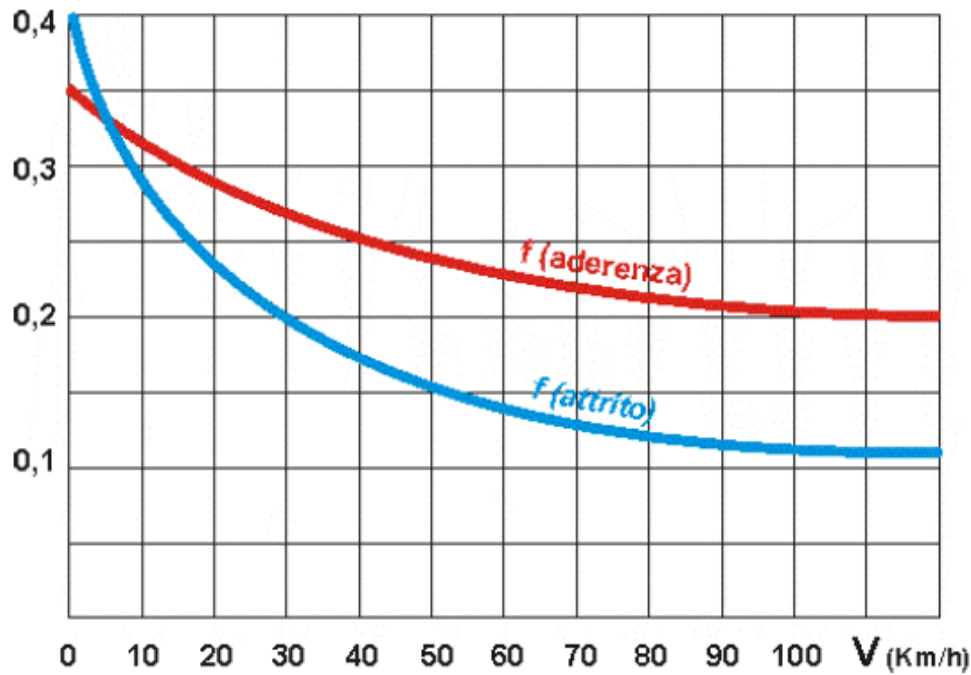
Consideriamo un treno che è composto da numerosi assi (i) e consideriamo il rapporto fra sforzo frenante totale ( $S_T$ ) e peso totale del treno ( $P_T$ ).

$$\frac{S_T}{P_T} = \frac{\sum_i f' \cdot F_i}{P_T} = f' \cdot \sum_i \frac{F_i}{P_i} \cdot \frac{P_i}{P_T} = f' \cdot \lambda_r \cdot \frac{1}{P_T} \cdot \sum_i P_i = f' \cdot \lambda_r$$

E' stata introdotta una percentuale di peso frenato detta convenzionale, indicata con  $\lambda_c$ , che è uguale ad 1 quando  $\lambda_r$  è eguale a 0,7.

$$\frac{S_T}{P_T} = f' \cdot 0,7 \cdot \lambda_c$$

# Aderenza Veicoli ferroviari (9)



$$\frac{F}{P} \leq \frac{f}{f'}$$

Freno ad un solo stadio,  $F/P = 0,75 - 0,85$

Freno a due stadi,  $F/P = 1,20 - 1,60$

Esempio:

- a 120 km/h  $F/P \leq f/f' = 0,20/0,12 = 1,66$   $F \leq 1,66 \cdot P$
  - a 50 km/h  $F/P \leq f/f' = 0,24/0,15 = 1,60$   $F \leq 1,60 \cdot P$   $F \cdot 0,15 \leq P \cdot 0,24$  per  $P=1000$  N  $1,6 \cdot 1000 \cdot 0,15 = 1000 \cdot 0,24$
  - a 0 km/h  $F/P \leq f/f' = 0,35/0,40 = 0,87$   $F \leq 0,875 \cdot P$   $F \cdot 0,40 \leq P \cdot 0,35$  per  $P=1000$  N  $0,875 \cdot 1000 \cdot 0,40 = 1000 \cdot 0,35$
- se utilizzassi il rapporto  $F/P = 1,60$  precedente  $1,6 \cdot 1000 \cdot 0,40 = 640 \geq 1000 \cdot 0,35 = 350$  con bloccaggio della ruota

# Spazio di frenatura(1)

$$T - R = (1 + \mu) \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} \quad -S_T - R = (1 + \mu) \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} = (1 + \mu) \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} \cdot \frac{ds}{ds} = (1 + \mu) \cdot M \cdot \frac{v \cdot dv}{ds}$$

Equazione del moto

Equazione del moto in frenatura

$$ds = -(1 + \mu) \cdot M \cdot \frac{v \cdot dv}{S_T + R} \longrightarrow s_f = \int_{v_0}^0 ds = \int_{v_0}^0 -(1 + \mu) \cdot M \cdot \frac{v \cdot dv}{S_T + R} = -(1 + \mu) \cdot \frac{P_T}{g} \cdot \int_{v_0}^0 \frac{v}{S_T + R} \cdot dv$$

$$s_f = (1 + \mu) \cdot \frac{P_T}{g} \cdot \int_0^{v_0} \frac{v}{S_T + P_T \cdot \left( \frac{r_r}{1000} + \frac{k \cdot S \cdot v^2}{P_T} \pm \frac{i}{1000} \right)} \cdot dv \quad P_T, S_T \text{ in [N]}; r_r \text{ in [N/KN]}; i \text{ in [‰]}$$

$$s_f = \frac{(1 + \mu)}{g} \cdot \int_0^{v_0} \frac{v}{(0,7 \cdot \lambda_c \cdot f') + \left( \frac{r_r}{1000} + \frac{k \cdot S \cdot v^2}{P_T} \pm \frac{i}{1000} \right)} \cdot dv$$

$$s_a = v_0 \cdot t_0 + \frac{(1 + \mu)}{g} \cdot \int_0^{v_0} \frac{v}{(0,7 \cdot \lambda_c \cdot f') + \left( \frac{r_r}{1000} + \frac{k \cdot S \cdot v^2}{P_T} \pm \frac{i}{1000} \right)} \cdot dv$$

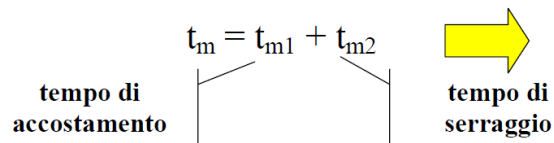
$t_0$  tempo di percezione e reazione del macchinista e di intervento meccanico del freno (questo ultimo tempo è alto nel caso ferroviario)

# Spazio di frenatura(2)

Quindi per determinare lo spazio di arresto bisogna tenere conto del tempo  $t_0$

$$t_0 = t_r + t_m,$$

$t_r$  = tempo di reazione, trascurabile nella frenatura ferroviaria poiché imposta da un segnale in posizione prestabilita.  
 $t_m$  = tempo meccanico dovuto alle caratteristiche dell'impianto frenante e che può assumere valori considerevoli.



Il tempo  $t_{m1}$  di accostamento è sempre di circa 1÷1,5 sec; invece il tempo  $t_{m2}$  di serraggio è più o meno lungo a seconda del tipo di freno (vedi tabella 2 e fig. 15).

Tabella 2 - Valori di  $t_2$  a seconda del tipo di freno

$t_m$ (sec)	$t_{\text{accostamento}}$	$t_{\text{serraggio}}$
Treno viaggiatori	1÷1.5	2÷3
Treno merci	1÷1.5	20÷30

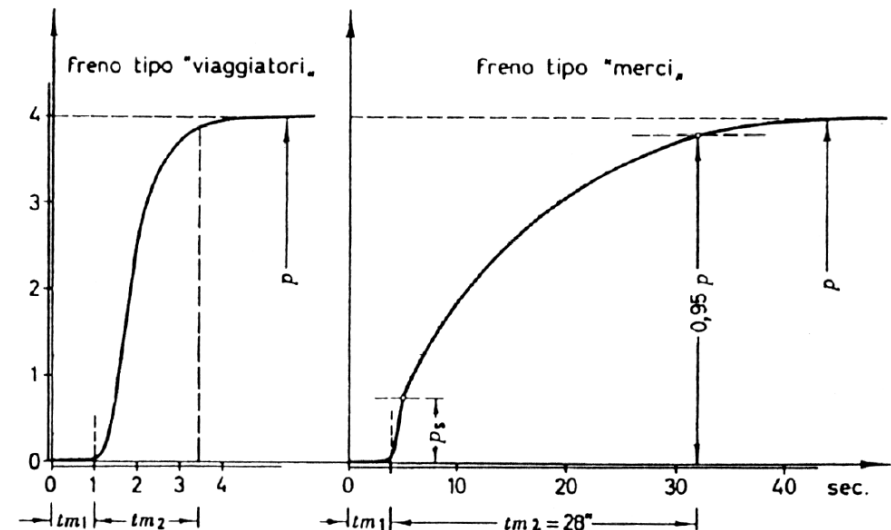
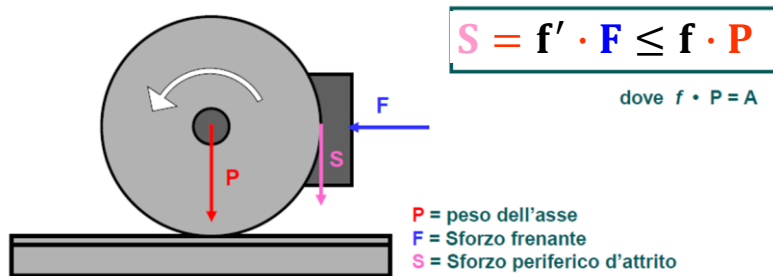


fig. 15 – Freno tipo viaggiatori e merci.

# Peso frenato (1)

- $f'$  = coefficiente di **attrito** ceppo-ruota
- $f$  = coefficiente di **aderenza** ruota-rotaia



$$\frac{v^2 - 0^2}{2 \cdot l} = a$$

$$f \cdot P_f = \frac{P}{g} \cdot a = \frac{Q \cdot f'}{f \cdot g} \cdot a$$

$$P_f = \frac{Q \cdot f'}{f^2 \cdot g} \cdot a$$

$$P_{f\%} = \frac{P_f}{P} \cdot 100$$

**B** = peso frenato, il peso che gli viene attribuito agli effetti della frenatura; esso rappresenta l'efficacia del freno

**P** = peso del treno

**F** = forza radiale del ceppo (<Q)

**Q** = forza radiale massima del ceppo

**B<sub>%</sub>** = percentuale peso frenato

**g** = accelerazione gravità

**a** = decelerazione treno

**l** = spazio frenatura

## Peso frenato (2)

$$s_a = v_0 \cdot t_p + \frac{(1 + \mu)}{g} \cdot \int_0^{v_0} \frac{v}{(0,7 \cdot \lambda_c \cdot f') + \left( \frac{r_r}{1000} + \frac{k \cdot S \cdot v^2}{P_T} \pm \frac{i}{1000} \right)} \cdot dv$$

$$s_a = \frac{V_0^2}{\frac{1,09375 \cdot \lambda_c}{\varphi(V_0)} + \frac{0,127}{\varphi(V_0)} \pm 0,235 \cdot i}$$

**Formula di Pedelucq (1920),  $V_0$  in [km/h]; in [0/00]**

Il coefficiente  $\varphi(V_0)$  dipende dalla sola velocità iniziale di frenatura e tiene conto del fatto che  $f'$  varia con la velocità e che con la velocità variano le resistenze al moto. Tiene inoltre conto del tempo meccanico di intervento del freno. I coefficienti della tabella, e quindi l'utilizzo della formula di Pedelucq, sono stati estesi fino a 200 km/h (quando fu messa a punto la formula la velocità massima dei treni era consistentemente inferiore).

Quando è stata elaborata la formula di Pedelucq i freni ferroviari erano tutti del tipo a ceppo. Però già da tempo la tipologia dei freni è cambiata. In particolare esistono i freni a disco, e i freni, sempre a ceppo, ma a doppio stadio (in particolare utilizzati sulle locomotive).

$V_0(km/h)$	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$\varphi$	0,0611	0,0676	0,0681	0,0686	0,0691	0,0696	0,0714	0,0731	0,0742	0,0755	0,0763	0,0771	0,0779	0,0787

# Peso frenato (3)

$$s_a = \frac{V_0^2}{\frac{1,09375 \cdot \lambda_c}{\varphi(V_0)} + \frac{0,127}{\varphi(V_0)} \pm 0,235 \cdot i}$$

$$\lambda_c = \frac{P_f}{P_T}$$

Faccio delle prove di frenata normalizzate, per un certo tipo di veicolo ferroviario (veicolo trainato isolato, locomotiva isolata, treni di stessi veicoli trainati). Misuro  $s_a$  con una certa  $V_0$  (per esempio 120Km/h) fissata dalla normativa UIC (“Union Internationale de Chemins de Fer”: questo organismo non suggerisce direttamente la formula di Pedelucq, ma suggerisce di utilizzare dei grafici basati su di essa). Ricavo dall’equazione precedente l’unica incognita  $\lambda_c$ .

Conoscendo  $P_T$  posso ricavare il peso frenato  $P_f$  per il dato veicolo ferroviario.

Operando in questo modo  $P_f$ , il peso frenato, diventa una quantità convenzionale, data una volta dato il singolo veicolo ferroviario, che esprime la capacità frenate di esso. Ossia si tratta di quel valore di peso frenato che diviso per il peso reale del veicolo ed introdotto nella formula di Pedelucq mi dà, alla velocità normalizzata, lo spazio di frenatura che è stato misurato sperimentalmente. Poiché è una quantità convenzionale  $P_f$  può essere superiore al peso del veicolo ossia:  $\lambda_c > 1$ ; per esempio:  $\lambda_c = 1,3$ .

Spesso le viene espressa in percentuale in questo caso:  $\lambda_c = 130\%$



**Indicazione del peso frenato e del peso reale sulla fiancata di una locomotiva**



# Peso frenato (4)

Tara

Peso totale

Indicazione del *peso reale* sulla fiancata di una carrozza.

Posti a sedere

Indicazione del peso frenato sulla fiancata di una carrozza (non è quello della carrozza precedente).

Percentuale di peso frenato per questa carrozza (ETR 500) :  
 $74/46 = 1,61$  (161%)

The diagram illustrates the calculation of the percentage of braking weight for a train car. It consists of three images of weight indicators on a train car. The top image shows a white sign with '46 t' (Tara), '50 t' (Peso totale), and '56 PI'. The middle image shows a blue sign with 'Freno WU - R 59 t'. The bottom image shows a grey sign with '42 t', '46 t' (circled), '52 PI', 'Freno WU-R', and '74 t' (circled). Arrows link the text labels to the corresponding values on the signs.

# Peso frenato (5)

ESEMPIO: locomotiva E402B + 15 carrozze,  $V_0 = 160$  km/h

E402B  $P_f = 78$  t  $P = 87$  t  $\lambda_c = 0,9$  Carrozza  $P_f = 70$  t  $P = 50$  t  $\lambda_c = 1,4$

$V_0 (km/h)$	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$\varphi$	0,0611	0,0676	0,0681	0,0686	0,0691	0,0696	0,0714	0,0731	0,0742	0,0755	0,0763	0,0771	0,0779	0,0787

$$\lambda_c = \frac{78 + 15 \cdot 70}{87 + 15 \cdot 50} \cong 1,35$$

$$s_a = \frac{160^2}{\frac{1,09375 \cdot 1,35}{0,0755} + \frac{0,127}{0,0755}} = 1205 [m]$$

Come distanza di sicurezza (distanza libera da ostacoli) per un ETR 500 viaggiante a 300 km/h, sulle nuove linee ad alta velocità, si assume 9 km.

La distanza di arresto, con frenatura di servizio, per un ETR 500 viaggiante a 300 km/h, è di circa 7-8 km.

La distanza di arresto, con frenatura di emergenza, sempre per un ETR 500 viaggiante a 300 km/h è poco superiore ai 3 km.

# Peso frenato e gradi di frenatura (1)

TABELLA DI FRENATURA

TABELLA A

Percentuali minime di massa frenata normalmente attribuita ai treni di materiale ordinario serviti da freno continuo	
Tipo del treno	Massa frenata con freno continuo tipo viaggiatori
Treni viaggiatori e merci con orario programmato.....	Percentuale prevista in Orario
Treni viaggiatori e merci con velocità massima fino a 120 km/h .....	90%
Treni merci con velocità massima fino a 100 km/h .....	75%
Altri treni merci con velocità massima fino a 90 km/h .....	70%
Tipo di treno	Massa frenata con freno continuo tipo merci (1)
Treni merci con orario programmato .....	Percentuale prevista in Orario
Treni merci con velocità massima fino a 120 km/h (2).....	75%
Treni merci con velocità massima fino a 100 km/h (2)..... Treni merci con velocità massima fino a 90 km/h .....	70%
Locomotive isolate .....	
Treni merci con velocità massima fino a 80 km/h .....	60%
Tradotte .....	50%

(1) Tali treni sono individuati in orario da apposito segno convenzionale.

(2) Treni merci serviti da mezzi di trazione provvisti di ripetizione dei segnali, circolanti su linee o tratti di linea attrezzate con il blocco automatico a correnti codificate.

# Peso frenato e gradi di frenatura (2)

GRADI DI FRENATURA E PENDENZE DELLE LINEE

Gradi di frenatura	I <sub>a</sub>		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		IX	
Pendenze per mille	dal	al	ol- tre	al	ol- tre	al	ol- tre	al	ol- tre	al	ol- tre	al	ol- tre	al	ol- tre	al	ol- tre	al	ol- tre	al
	0	4	4	6	6	8	8	11	11	13	13	16	16	20	20	25	25	30	30	35

TRENI SERVITI DA FRENO CONTINUO TIPO VIAGGIATORI

compresi i treni di mezzi leggeri e treni di locomotive isolate

(Tabella B - Quadro 1° del Cap. VII della Prefazione Generale all'Orario di Servizio)

Velocità massima assoluta ammessa																											
Gradi di frenatura della linea	Percentuale di peso frenato esistente nel treno																										
	150	145	140	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	
I <sub>a</sub>	150	150	150	150	150	150	145	145	140	140	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60	
I	150	150	150	150	150	145	145	140	135	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	90	85	80	70	65	60	55	
II	150	150	150	150	145	140	140	135	130	130	125	120	115	110	105	100	100	95	90	85	80	75	70	65	55	50	
III	150	150	145	145	140	135	135	130	125	120	115	115	110	105	100	100	95	90	85	80	75	70	65	60	50	45	
IV	140	140	135	135	130	130	125	125	120	115	110	110	105	100	95	95	90	85	80	75	70	65	60	55	45	40	
V	135	130	130	125	125	120	120	115	110	110	105	105	100	95	90	90	85	80	75	70	65	60	55	50	40	35	
VI	125	125	120	120	115	115	110	105	105	100	100	95	95	90	85	80	80	75	70	65	60	55	50	40	35	—	
VII	115	115	110	110	105	105	100	100	95	95	90	90	85	85	80	75	70	70	65	60	55	45	40	35	—	—	
VIII	100	100	100	100	95	95	95	90	90	85	85	80	80	75	70	65	65	60	55	50	45	40	35	—	—	—	
IX	90	90	90	90	85	85	85	80	80	75	75	70	70	65	65	60	55	50	45	40	35	30	—	—	—	—	



# Peso frenato e gradi di frenatura (3)

TABELLA SPECIALE DI FRENATURA PER TRENI MUNITI DI FRENO CONTINUO TIPO VIAGGIATORI, SERVITI DA MEZZI DI TRAZIONE EQUIPAGGIATI CON APPARECCHIATURE SPECIALI DI SICUREZZA, CIRCOLANTI SU LINEE ATTEZZATE CON IL BLOCCO AUTOMATICO A CORRENTI CODIFICATE — SPAZIO DI FRENATURA: 2 700 METRI

Gradi di frenatura della linea	(1) Velocità massima assoluta (1)																										
	Frenatura combinata										Frenatura con solo freno continuo																
	Percentuale di peso frenato elettrico										Percentuale di peso frenato con freno continuo																
	60	50	40	35	30	25	20	15	10																		
	125 e superiori																									120	115
I <sub>a</sub>	200	190	185	180	180	175	170	170	165	160	155	150	150	140	135	130	125	120	120	115	110	105	100	95	85	80	75
I	200	190	185	180	180	175	170	170	165	160	155	150	150	140	135	130	125	120	120	115	110	105	100	95	85	80	75
II	190	185	180	180	175	175	170	165	165	160	150	150	145	140	135	130	120	120	120	115	110	105	100	95	80	75	70
III	180	180	180	175	170	170	165	160	160	155	145	145	140	135	130	125	120	120	120	115	110	105	100	95	80	75	70
IV	170	170	170	165	160	160	160	150	150	145	140	140	140	130	125	120	115	110	110	110	100	100	90	85	75	70	60
V	160	160	160	155	150	150	150	140	140	135	130	130	130	125	120	110	105	100	100	100	90	90	80	80	70	60	50

(1) Velocità massima per i treni viaggiatori impostati a velocità superiore a 150 km/h, serviti da mezzi di trazione (ETR o ALe 601 senza rimorchi) provvisti di frenatura elettrica, ripetizione dei segnali in cabina di guida e controllo automatico della velocità efficienti.

L'apporto della frenatura elettrica (frenatura combinata) va considerato solamente qualora siano soddisfatte le due condizioni seguenti:

- a) La percentuale di peso frenato con freno continuo risulti  $\geq 125\%$ ;
- b) La percentuale di peso frenato elettrico non risulti inferiore al 10%.

In mancanza anche di una sola di tali condizioni valgono le velocità massime indicate per il solo freno continuo.

**Prescrizioni particolari:**

In caso di guasto alla apparecchiatura di ripetizione dei segnali la velocità massima deve essere contenuta entro i limiti previsti dalla normale Tabella B di frenatura.

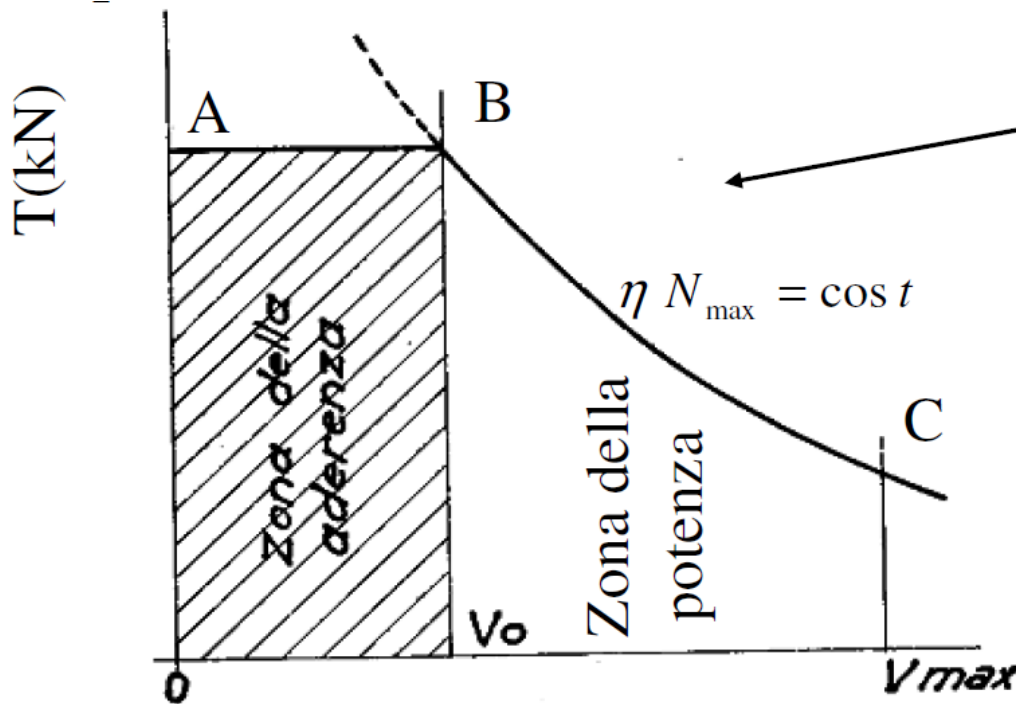
La frenatura meccanica deve essere utilizzata, salvo casi di emergenza, a velocità minore od uguale a 160 km/h.

La riduzione di velocità dalla V max a 160 km/h deve essere attuata, salvo casi di emergenza, con la sola frenatura elettrica.

(1) Velocità massima per i treni serviti da mezzi di trazione provvisti di ripetizione dei segnali in cabina di guida, efficienti.

# Trazione ferroviaria (1)

La caratteristica meccanica di trazione di un veicolo da trasporto è una curva  $T(V)$  che fornisce il valore massimo della trazione che si può avere ad una determinata velocità per quel certo veicolo da trasporto.



**Caratteristica Meccanica Ideale** (è quella che vorrei avere).

Si individuano:

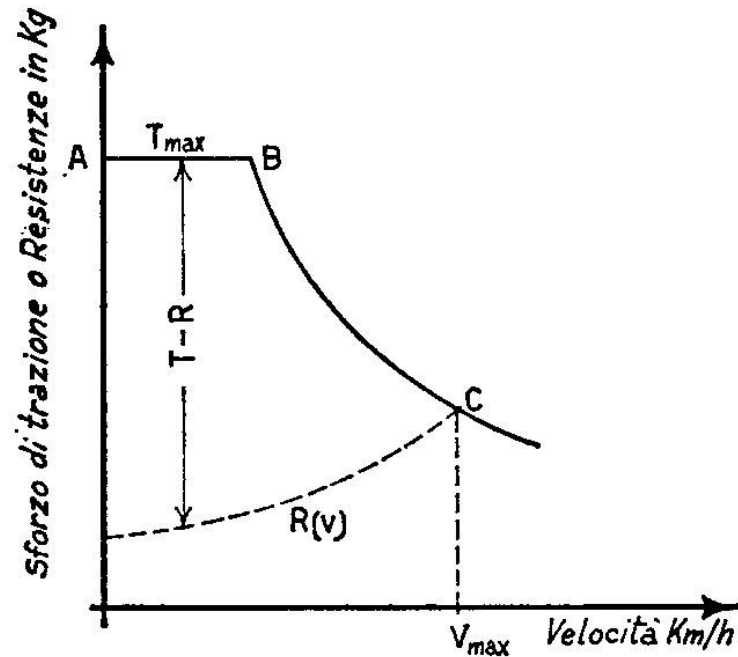
- una zona detta dell'aderenza
- una zona detta della potenza

A basse velocità la  $T$  è limitata dall'aderenza, mentre a velocità più alte la  $T$  è limitata dalla potenza

$$F_a \text{ [N]} = f \cdot P \geq T \text{ [N]}$$

$$N \text{ [w]} = \frac{T \cdot v}{\eta} \left[ N \cdot \frac{m}{s} \right]$$

## Trazione ferroviaria (2)



$$N \text{ [w]} = \frac{F \cdot v}{\eta} \left[ N \cdot \frac{m}{s} \right]$$

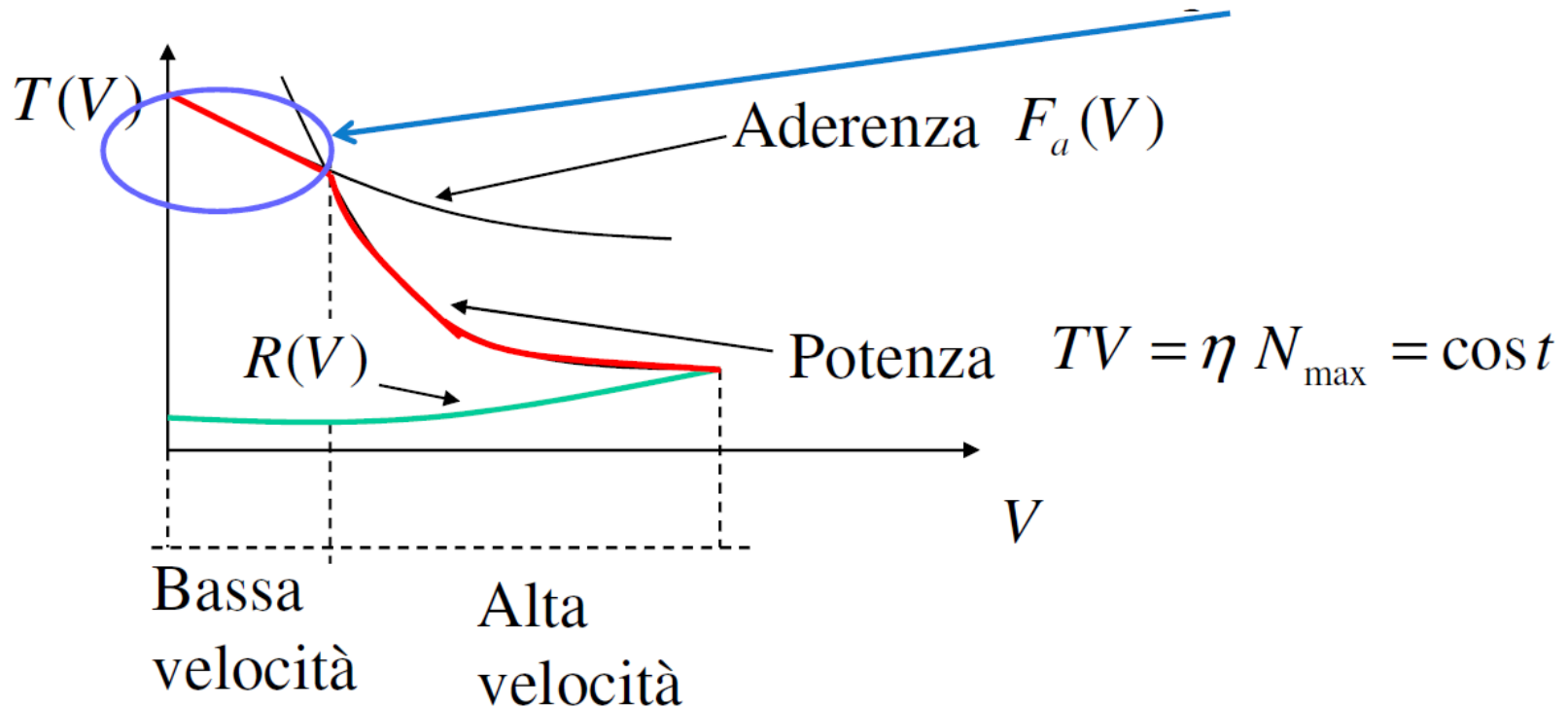
$$N \text{ [kw]} = \frac{F_{kgf} \cdot 9,81 \cdot \frac{V}{3,6}}{1000 \cdot \eta} = \frac{F_{kgf} \cdot V}{367 \cdot \eta} \left[ kg_f \cdot \frac{km}{h} \right]$$

FIG. II.17 - Caratteristica di trazione (trattore a potenza costante).



# Trazione ferroviaria (3)

In realtà, a volere essere precisi, come abbiamo visto, l'aderenza diminuisce all'aumentare della velocità. Quindi la forma della caratteristica meccanica ideale dovrebbe essere questa:

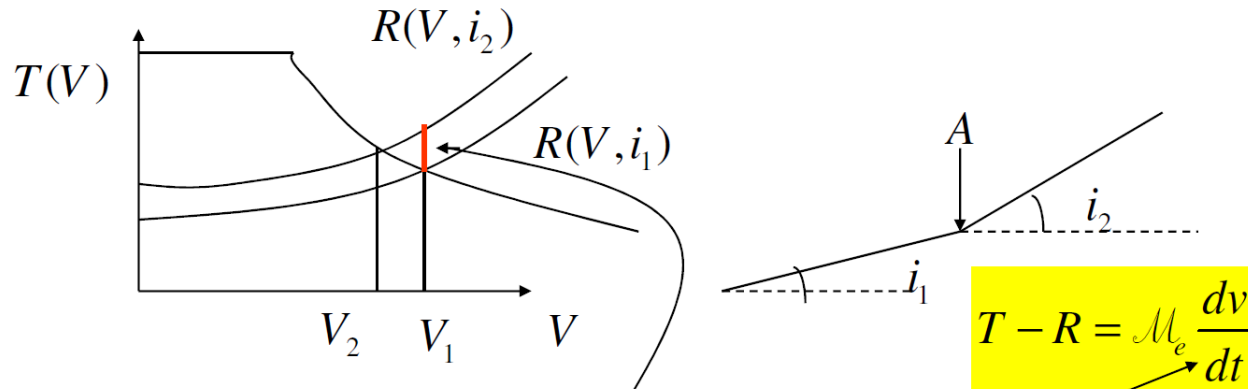


$$F_a \text{ [N]} = f \cdot P \geq T \text{ [N]}$$

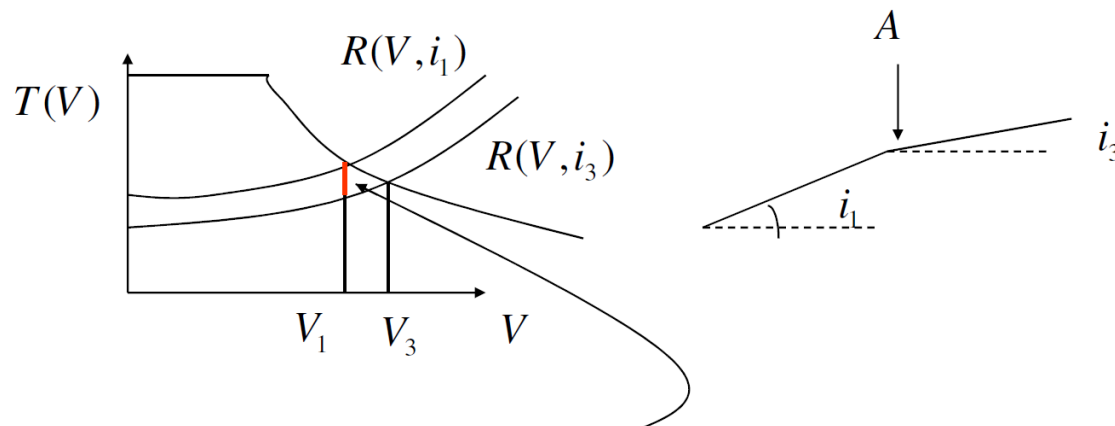
$$N \text{ [w]} = \frac{T \cdot v}{\eta} \left[ \text{N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

# Trazione ferroviaria (4)

La caratteristica meccanica a potenza costante è ideale perché è stabile.



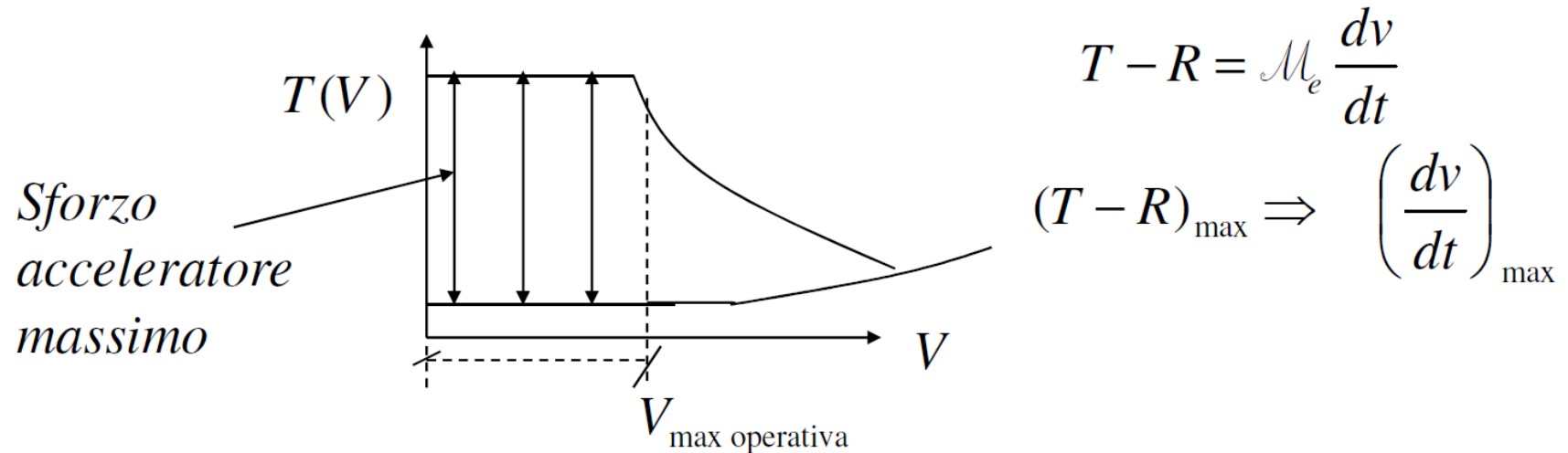
Appena passato il punto A risulta:  $T - R < 0$ . Il veicolo decelera.  
Si ristabilisce però un nuovo equilibrio alla velocità  $V_2$ .



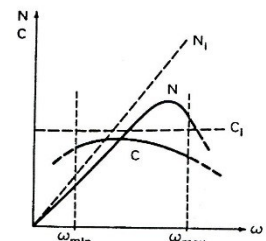
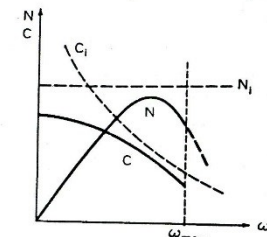
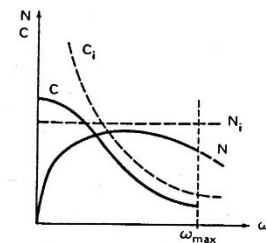
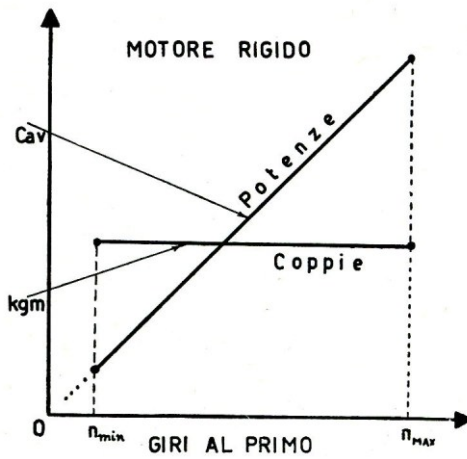
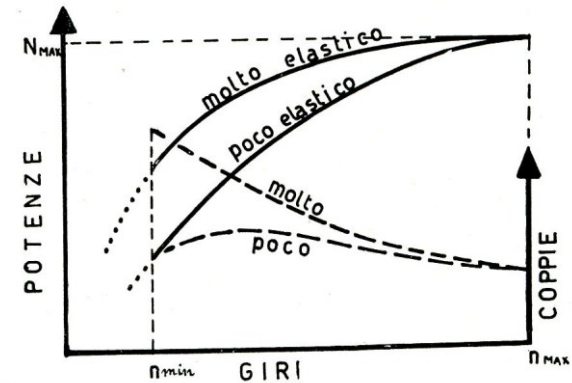
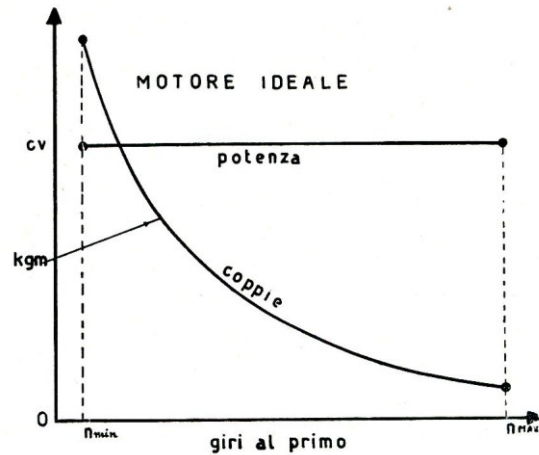
Appena passato il punto A risulta:  $T - R > 0$ . Il veicolo accelera.  
Si ristabilisce però un nuovo equilibrio alla velocità  $V_3$ .

# Trazione ferroviaria (5)

La caratteristica meccanica a potenza costante è ideale perché lo sforzo acceleratore nella fase di avvio è massimo.



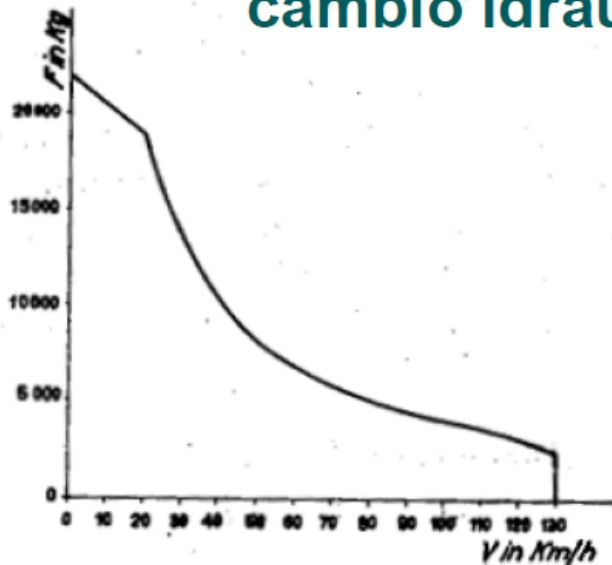
# Trazione Ferroviaria (6)



--- Curve ideali  
— Curve reali

# Trazione Ferroviaria (7)

- Le curve caratteristiche per le migliori condizioni di funzionamento ferroviario sono delle iperboli equilateri, ottenibili con i motori elettrici a c.c. o con i Diesel con interposto cambio idraulico.



10. Caratteristica meccanica della locomotiva Diesel - elettrica D 443

# Sforzo di trazione (8)

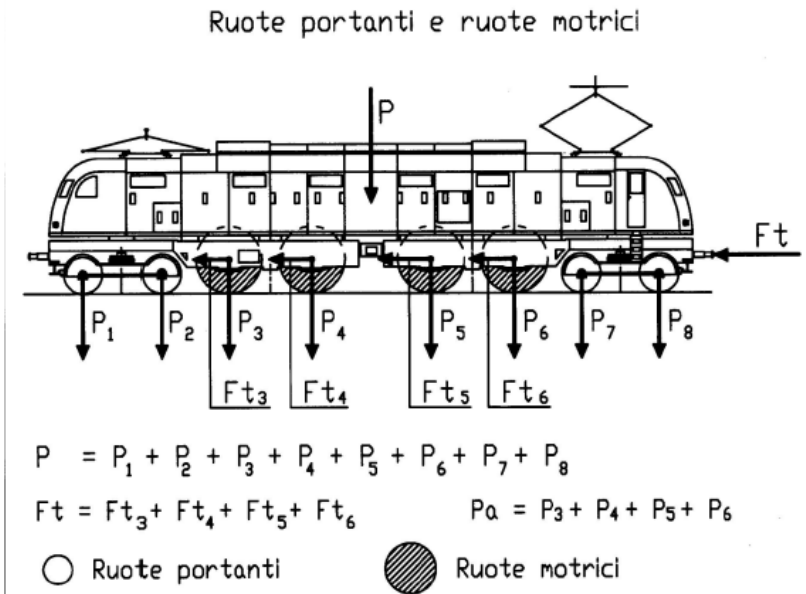
E' la forza che bisogna imprimere al veicolo per avere moto.

Per ottenere il moto si deve avere al massimo

$$\bar{T} \leq f_{ad} P_{aderente}$$

Tale sforzo deve anche essere tale da vincere le resistenze al moto:

$$T = R_1 + R_2 + R_3 + ..... + \frac{P}{g} a \leq T_{\max}$$



# Diagramma di trazione (1)

Il diagramma di trazione indica l'andamento della velocità in funzione del tempo, fra due fermate successive, per un veicolo da trasporto:  $V=F(t)$ . Si ottiene integrando l'equazione generale del moto:

$$T - R = M_e \cdot \frac{dv}{dt}$$

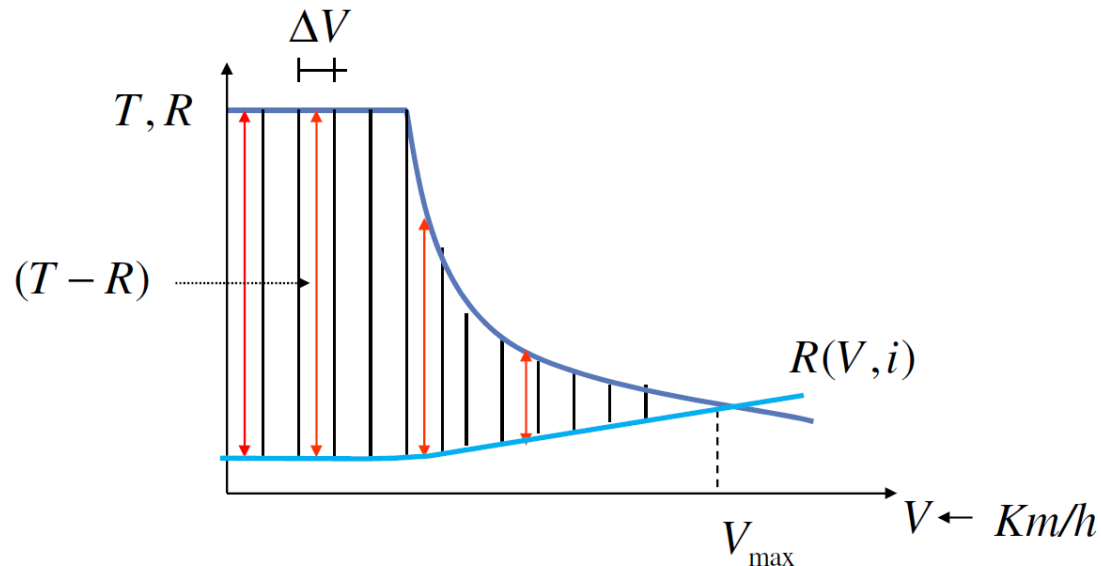
La prima parte del diagramma di trazione è chiamato diagramma di avviamento.

Integro alle differenze finite, considerando una serie di intervalli  $K$  di velocità costante  $\Delta v$ .

Si valuta lo sforzo acceleratore  $T-R$  in corrispondenza di un determinato salto di velocità  $\Delta V$  (costante, per esempio: 5 km/h)

$$T - R = M_e \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\Delta t = M_e \cdot \frac{\Delta v}{T - R}$$



# Diagramma di trazione (2)

Si valuta il tempo necessario al veicolo da trasporto per fare il salto di velocità  $\Delta v$  (in m/sec):

$$\Delta t_k = \frac{M_e \cdot \Delta v}{T \left( v_{i,k} + \frac{\Delta v}{2} \right) - R \left( v_{i,k} + \frac{\Delta v}{2} \right)}$$

$$t_{f,k} = t_{i,k} + \Delta t_k$$

Con  $t_{i,1} = 0$  e  $t_{i,k} = t_{f,k-1}$   
 $i = \text{iniziale}$   $f = \text{finale}$  per ogni  $k$   
 $k = 1, 2, \dots, K$

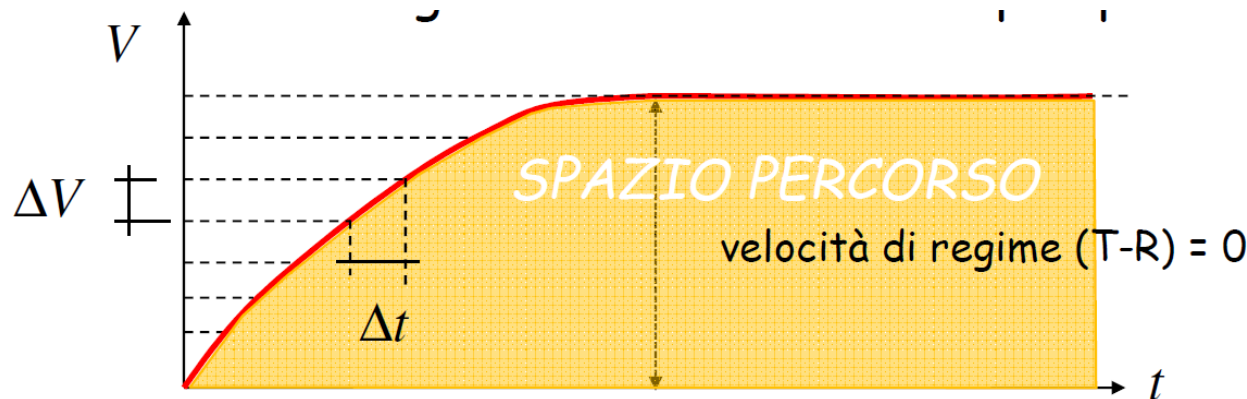
$$v_{f,k} = k \cdot \Delta v$$

Con  $v_{i,1} = 0$  e  $v_{i,k} = v_{f,k-1}$   
 $i = \text{iniziale}$   $f = \text{finale}$  per ogni  $k$

$$S_{f,k} = S_{i,k} + \Delta t_k \cdot \left( v_{i,k} + \frac{\Delta v}{2} \right) \quad \text{Con } S_{i,1} = 0 \text{ e } S_{i,k} = S_{f,k-1}$$

$i = \text{iniziale}$   $f = \text{finale}$  per ogni  $k$

Costruisco il diagramma di avviamento per punti ( $\Delta V, \Delta t$ ). All'aumentare della velocità, diminuisce lo sforzo acceleratore ( $T-R$ ) e  $\Delta t$  aumenta (l'area sotto il diagramma di trazione rappresenta lo spazio percorso).



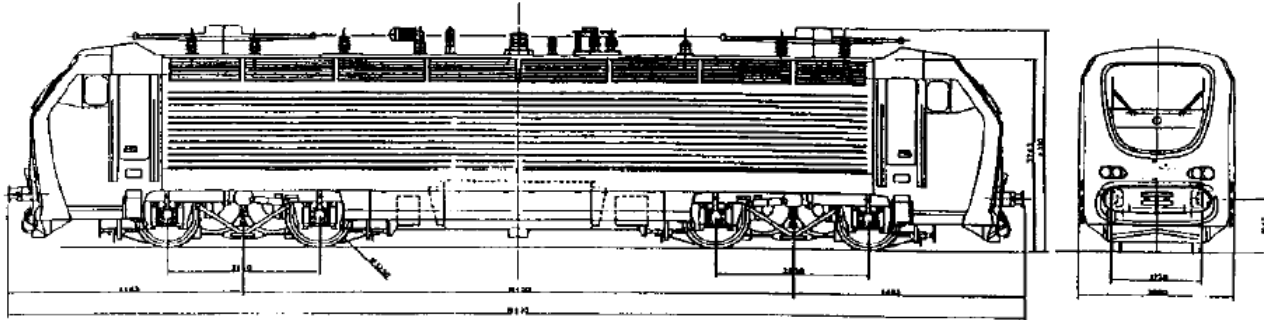


# Diagramma di trazione (2)

In molti casi pratici il diagramma di avviamento si semplifica considerando una accelerazione “a” costante



Esempio: Treno Intercity E402B (87t)+ 15 carrozze (750t)



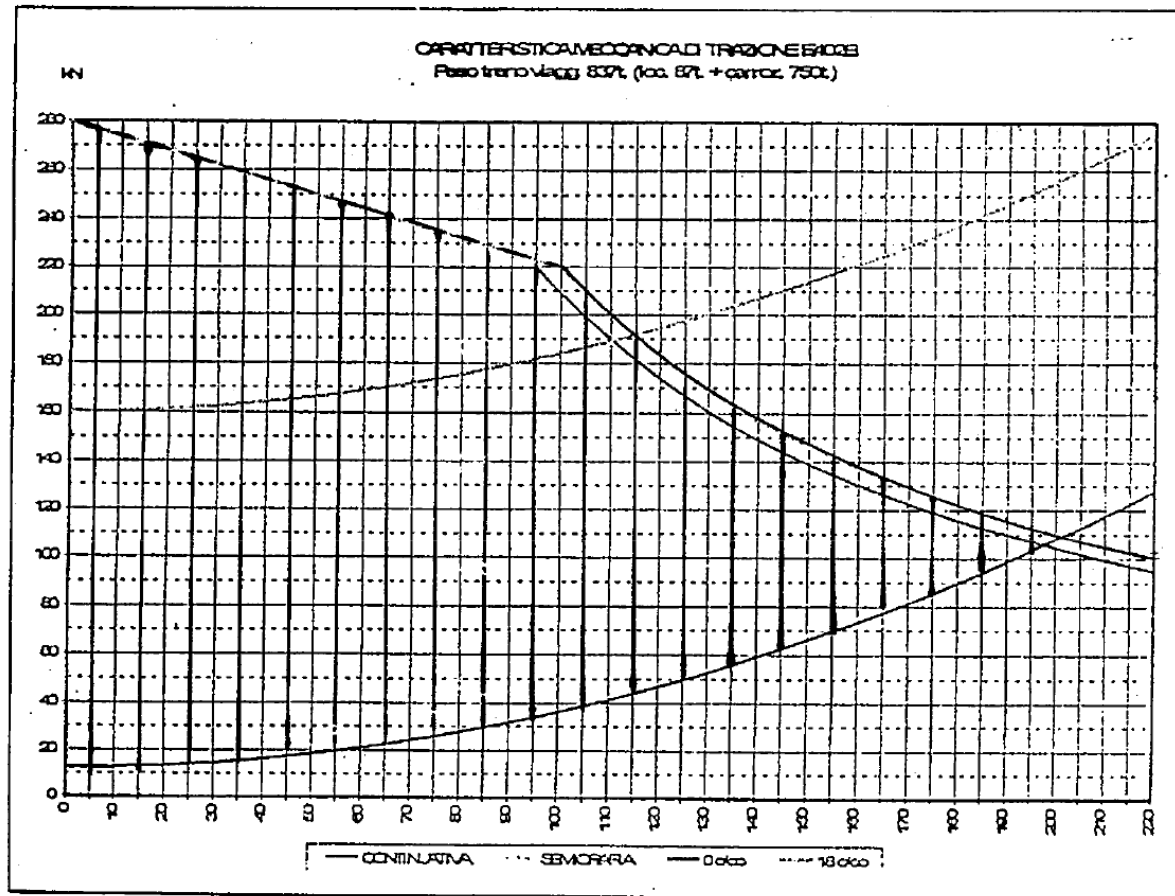
$$\mu = 0,2 \cdot \frac{87}{837} + 0,06 \cdot \frac{750}{837} \cong 0,07$$

$$\Delta t_k = \frac{837 \cdot (1 + 0,07)}{T_k - R_k} \cdot \frac{10}{3,6}$$

$\Delta V = 10 \text{ km/h}$

# Diagramma di trazione (3)

Caratteristica meccanica di trazione e curve delle resistenze per un treno intercity: E402B (87t) +15 carrozze (750t).



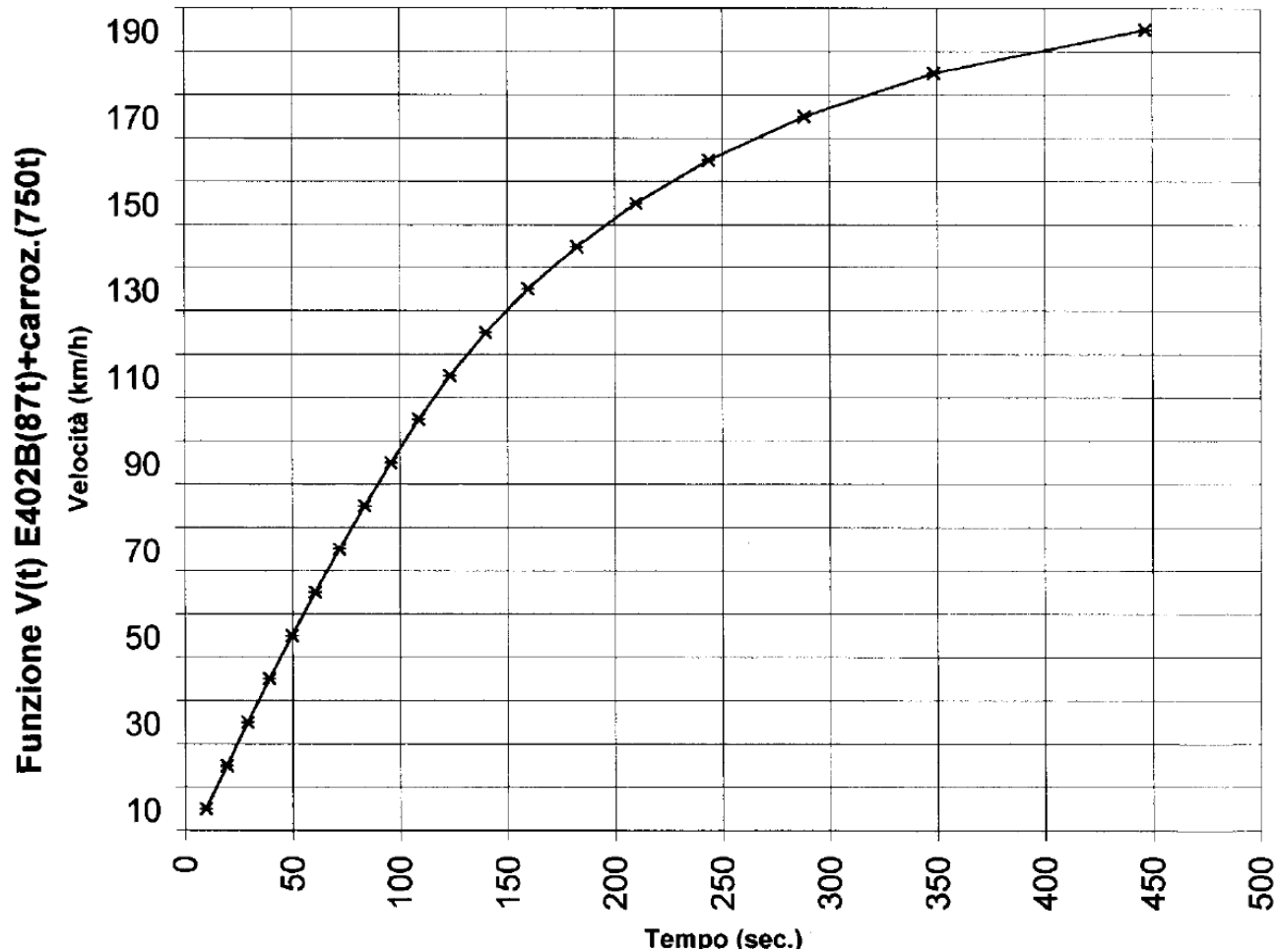
# Diagramma di trazione (3)

E402B (87t) + 750t (carrozze).

V (km/h)	T-R (kN)	Delta t (s)	t totale (s)	Acc. Punt. (m/s <sup>2</sup> )	Acc. Med. (m/s <sup>2</sup> )	Spaz.Par. (m)	Spaz.Tot. (m)
10	264	9.423295	9.423295	0.294778	0.294778	13.08791	13.08791
20	258.6667	9.61759	19.04089	0.288823	0.29177	40.07329	53.1612
30	250.6667	9.924535	28.96542	0.27989	0.287699	68.92038	122.0816
40	245.3333	10.14029	39.10571	0.273935	0.28413	98.58611	220.6677
50	237.3333	10.48209	49.5878	0.265002	0.280087	131.0262	351.6938
60	229.3333	10.84775	60.43555	0.25607	0.275776	165.7295	517.4233
70	220	11.30795	71.7435	0.245648	0.271027	204.1714	721.5947
80	210.6667	11.80894	83.55244	0.235227	0.265967	246.0196	967.6143
90	201.3333	12.35637	95.90881	0.224805	0.260664	291.7477	1259.362
100	192	12.95703	108.8658	0.214384	0.255156	341.9217	1601.284
110	172	14.46366	123.3295	0.192052	0.247755	421.8568	2023.141
120	149.3333	16.65904	139.9885	0.166743	0.238115	532.1638	2555.304
130	126.6667	19.64013	159.6287	0.141434	0.226219	681.949	3237.253
140	109.3333	22.75381	182.3825	0.12208	0.213227	853.2679	4090.521
150	90.66667	27.43842	209.8209	0.101237	0.198582	1105.159	5195.68
160	73.33333	33.92386	243.7448	0.081883	0.18234	1460.611	6656.291
170	56	44.42411	288.1689	0.062529	0.16387	2036.105	8692.395
180	41.33333	60.1875	348.3564	0.046152	0.143531	2925.781	11618.18
190	25.33333	98.20066	446.557	0.028287	0.118188	5046.423	16664.6

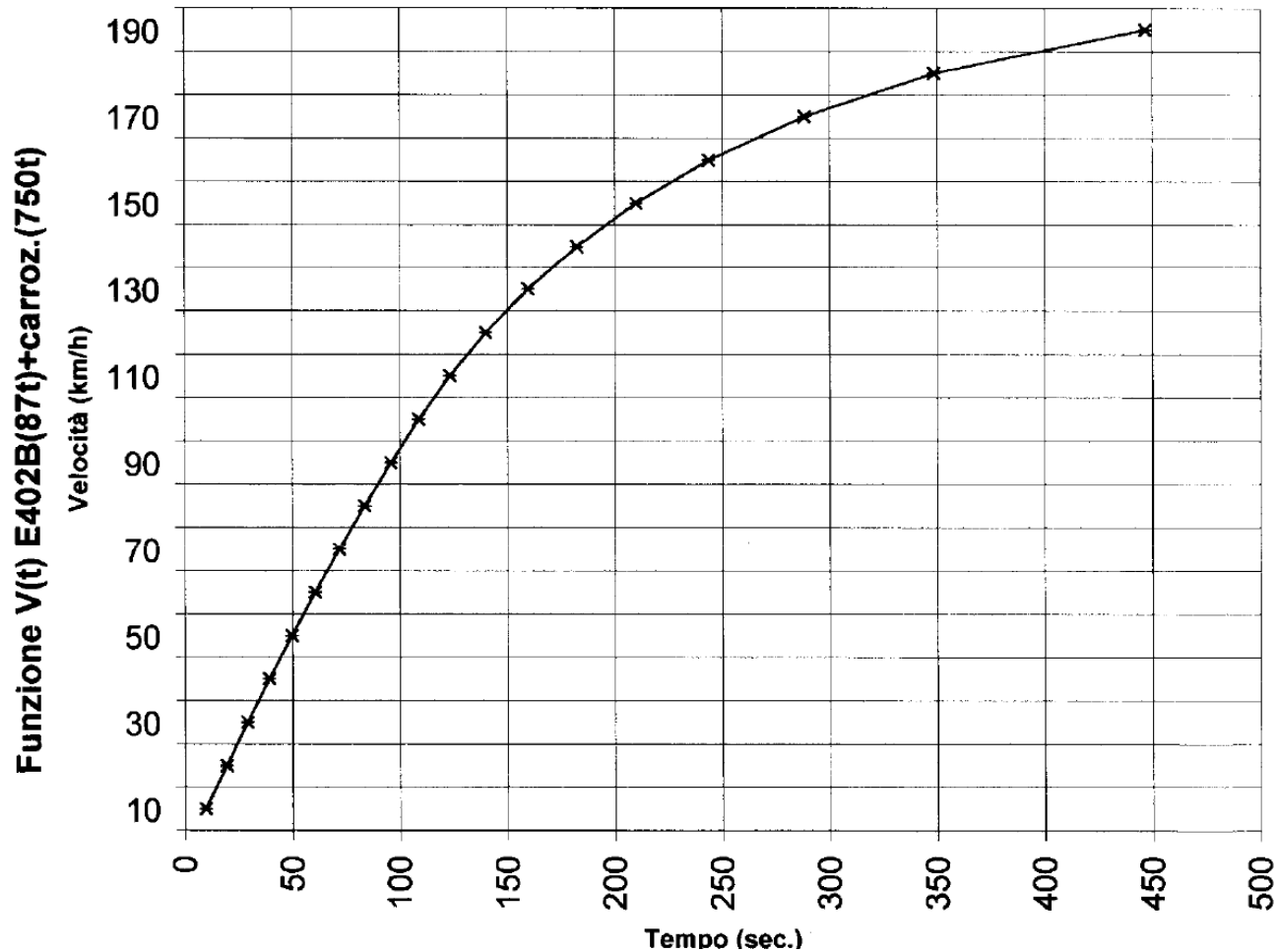
# Diagramma di trazione (4)

Diagramma di avviamento per treno "intercity" con E402B (87t) + 750t (carrozze).

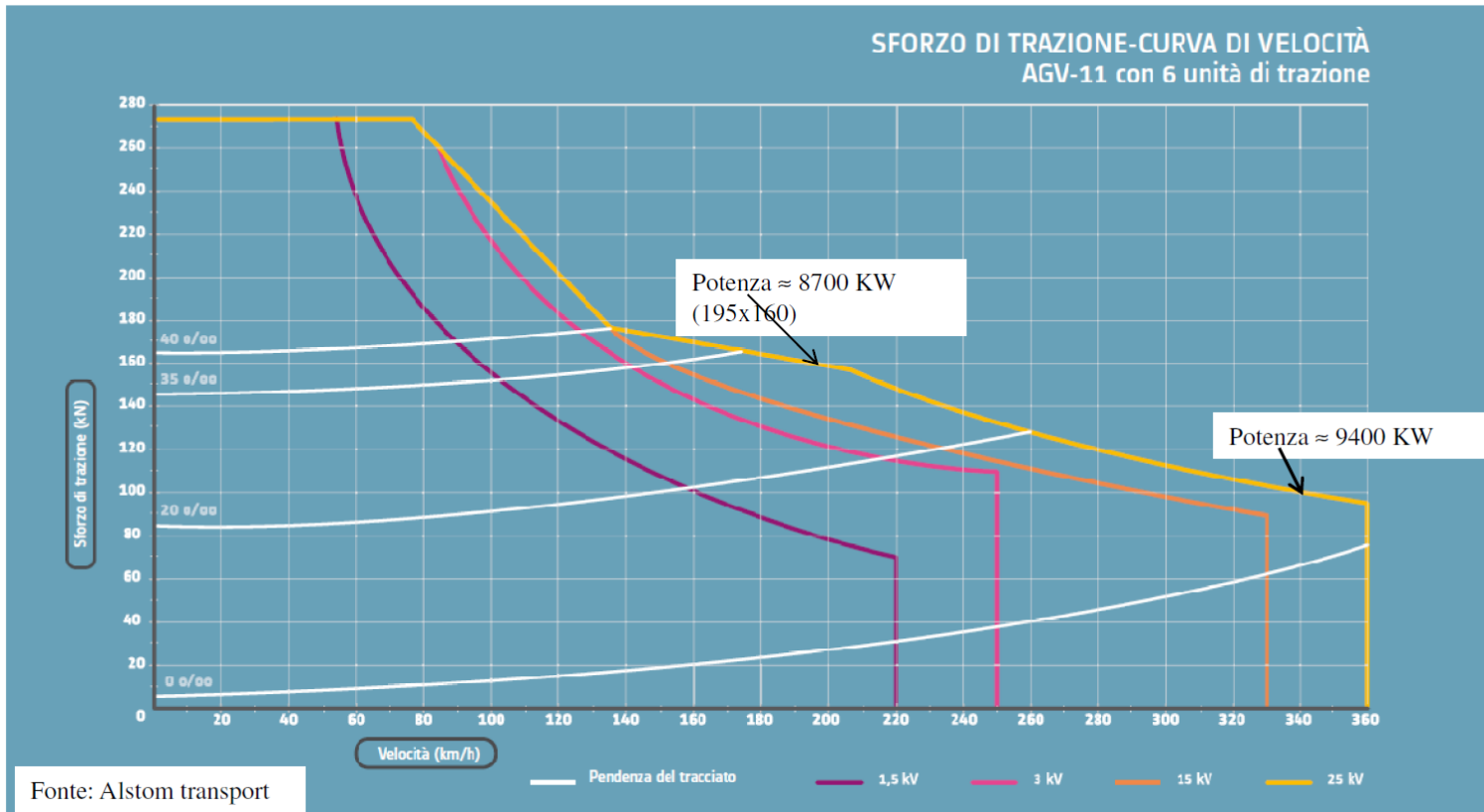


# Diagramma di trazione (4)

Diagramma di avviamento per treno "intercity" con E402B (87t) + 750t (carrozze).



# Diagramma di trazione (5)



## Caratteristica meccanica di Trazione di un AGV (Automotrice à Grande Vitesse)

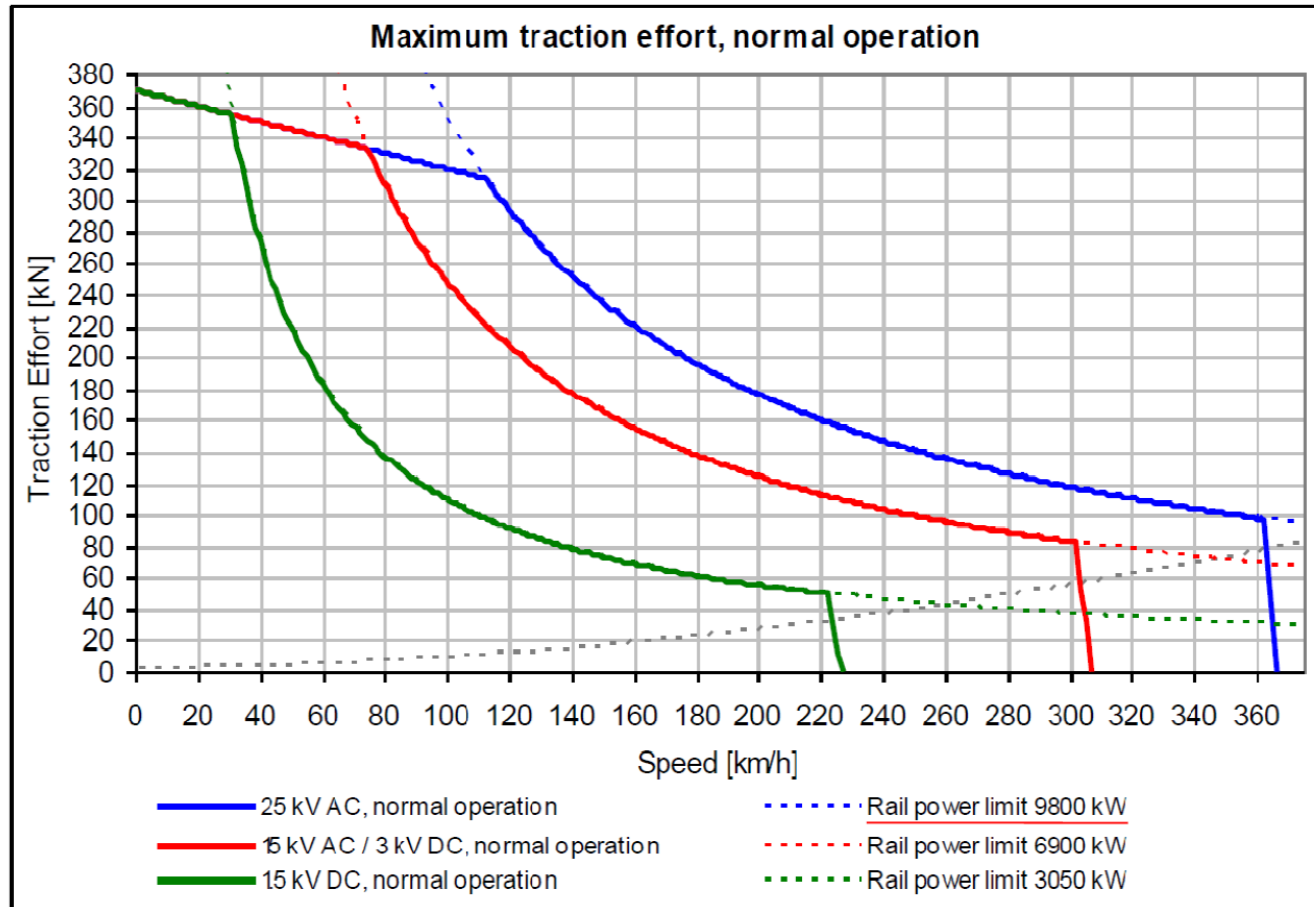
Dati relativi alla AGV 11 con 6 carrelli motori (su 12 totali): massa 416 t (posti 466) .

$R = a + bv + cv^2$   $a = 2500 \text{ N}$ ;  $b = 104,4 \text{ N/m/s}$ ;  $c = 5,83 \text{ N/m}^2/\text{s}^2$ ;  $R$  in N;  $v$  in m/s

Fonte: [http://fltsi.fr/tsi/tsi1/Domaines\\_de\\_competences/DC05\\_Caracteriser\\_les\\_actions\\_mecaniques/Travaux%20diriges/frt\\_agv.pdf](http://fltsi.fr/tsi/tsi1/Domaines_de_competences/DC05_Caracteriser_les_actions_mecaniques/Travaux%20diriges/frt_agv.pdf)

# Diagramma di trazione (6)

Fonte: Diego Canetta, ETR 1000/V300 ZEFIRO – Il treno del futuro, AnsaldoBreda-Bombardier, 01/07/2015.



Caratteristica meccanica di Trazione di un ETR 1000  
(Frecciarossa 1000) Massa = 458 t; L=202 m; Posti: 455

# Le fasi del moto (1)

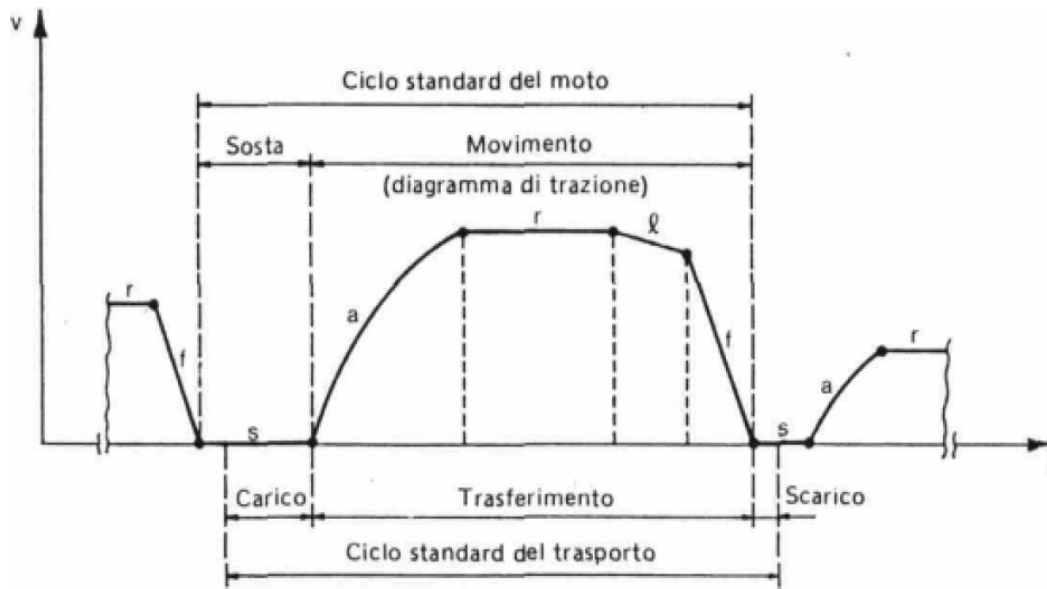
Nel moto di un veicolo o di qualsiasi sistema di trasporto possiamo distinguere varie fasi di marcia (movimento): accelerazione (a); regime (r); rallentamento o lancio o coasting (l); frenatura (f)

Il ciclo standard del moto comprende tutte le fasi meccaniche del movimento a-r-l-f (ciclo completo), una fase di movimento deve essere composta almeno da un avviamento ed una frenatura (ciclo ridotto); possono non essere presenti il regime ed il lancio.

<i>Fasi</i>	<i>Condizioni di moto</i>	<i>Velocità</i>	<i>Accelerazione</i>	<i>Forze</i>
<b>Sosta</b>		$v = 0$	$\frac{dv}{dt} = 0$	$F = 0$ $I = 0$ $R = 0$
<b>Movimento</b>	<i>accelerazione</i> $+ F - R = M_e \frac{dv}{dt}$	$v \neq 0$	$\frac{dv}{dt} > 0$	$I < 0$ $R < F$
	<i>regime</i> $+ F - R = 0$	$v \neq 0$	$\frac{dv}{dt} = 0$	$F = R$ $I = 0$
	<i>rallentamento o lancio</i> $- R = M_e \frac{dv}{dt}$	$v \neq 0$	$\frac{dv}{dt} < 0$	$F = 0$ $I = R$
	<i>frenatura</i> $- F - R = M_e \frac{dv}{dt}$	$v \neq 0$	$\frac{dv}{dt} < 0$	$I > 0$ $R \neq 0$



## Le fasi del moto (2)



Le aree comprese nel *diagramma di trazione* corrispondono agli spazi percorsi nei rispettivi intervalli di tempo, mentre la tangente alla curva esprime la variazione istantanea di velocità  $dv/dt$  che, nel riferimento cartesiano scelto, è:

fig. 1. Cicli standard del moto e del trasporto

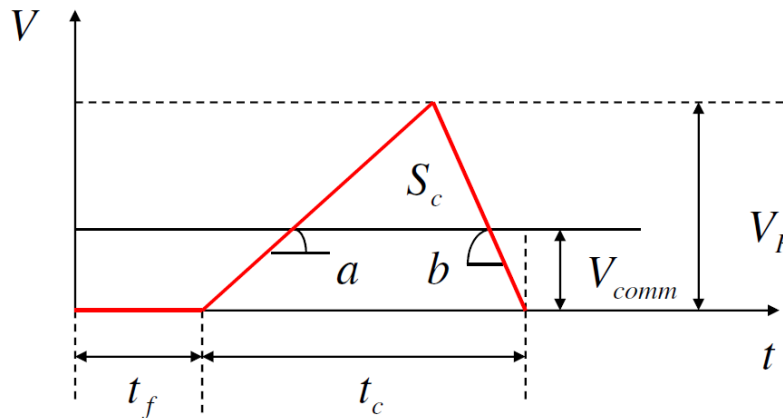
- positiva (accelerazione) se  $\operatorname{tg} \alpha > 0$  ( $dv/dt > 0$ ) con  $0 < \alpha < \pi/2$
- nulla (velocità costante) se  $\operatorname{tg} \alpha = 0$  ( $dv/dt = 0$ ) con  $\alpha = 0$ ;
- negativa (decelerazione) se  $\operatorname{tg} \alpha < 0$  ( $dv/dt < 0$ ) con  $\pi/2 < \alpha < \pi$

# Forme del Diagramma di trazione (1)

Quando si determina il diagramma di trazione sono dati:

- $a$ : accelerazione in fase di avviamento, che, per semplicità, si suppone costante e pari al valore medio.
- $b$ : decelerazione costante in fase di frenatura.
- $V_r$  velocità di regime (fra due fermate successive).
- $S$ : distanza fra due fermate successive.
- $t_f$ : tempo medio di fermata.
- $c$ : decelerazione in fase di “coasting” (=  $R / M$ )

Spazio critico : spazio minimo affinché sia raggiunta la velocità di regime.



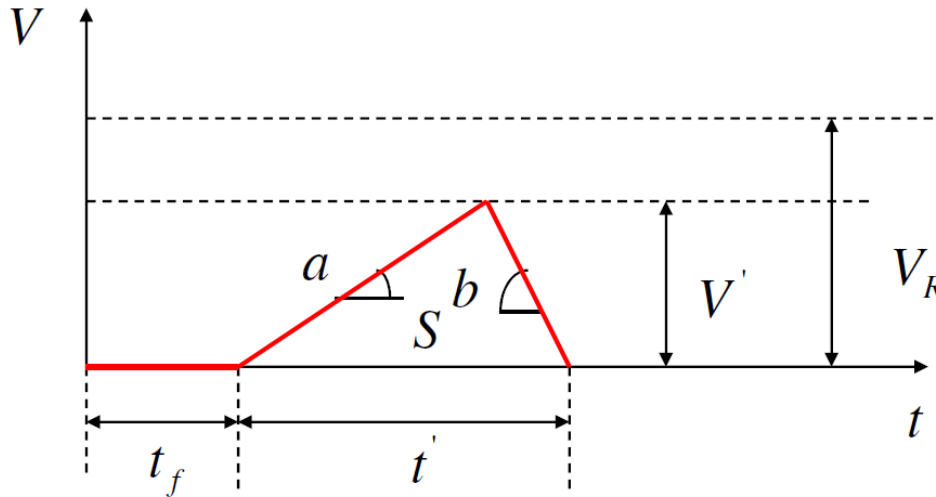
Calcolo: 
$$S_c = \frac{v_R^2}{2a} + \frac{v_R^2}{2b}$$

$$t_c = \frac{v_R}{a} + \frac{v_R}{b}$$

$$v_{comm} = \frac{S_c}{t_f + t_c}$$

# Forme del Diagramma di trazione (2)

Caso  $S < S_c$  : Forma triangolare (si deve iniziare a frenare prima di arrivare alla velocità di regime).

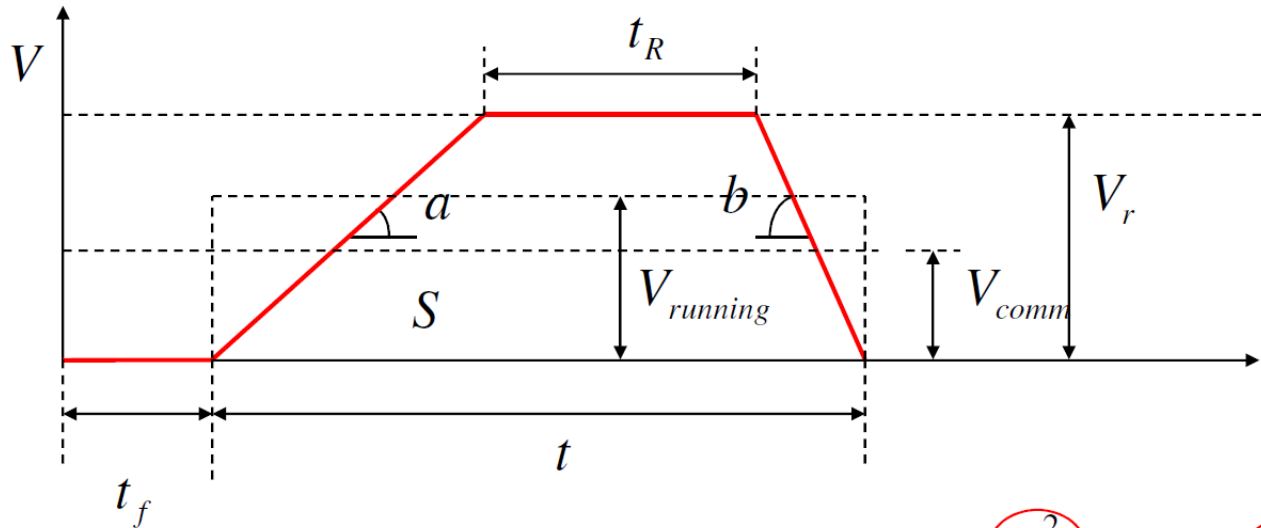


$$S = \frac{v'^2}{2a} + \frac{v'^2}{2b} \Rightarrow \text{ricavo } v'$$

Calcolo:  $t' = \frac{v'}{a} + \frac{v'}{b}$   $v_{comm} = \frac{S}{t_f + t'}$

# Forme del Diagramma di trazione (3)

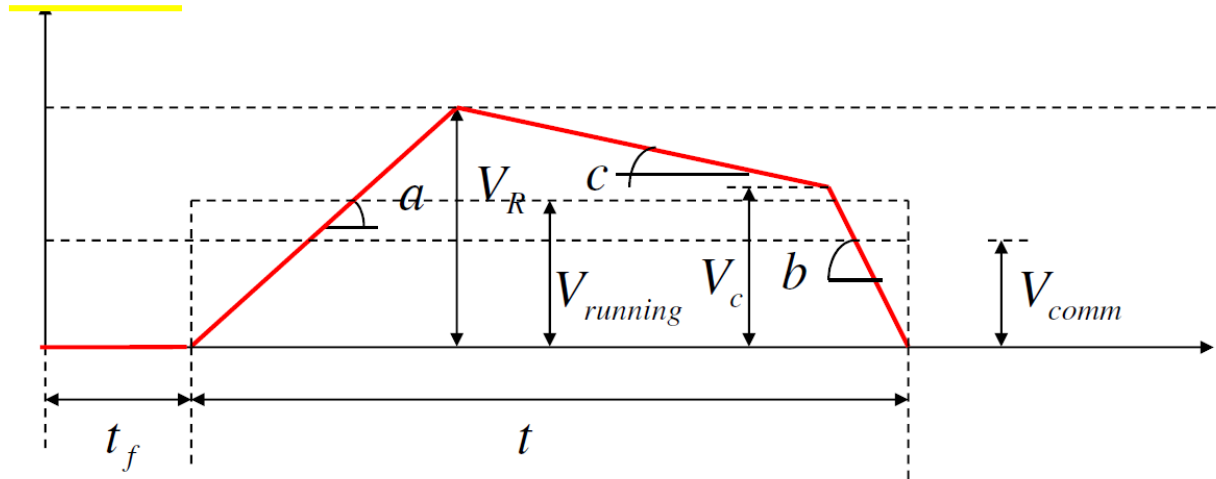
Caso  $S > S_c$  : Forma trapezia.



- ❶ Ricavo  $t_R$  dalla seguente relazione:  $S = \frac{V_R^2}{2a} + V_R t_R + \frac{V_R^2}{2b}$
- ❷ Calcolo  $t$ :  $t = \frac{V_R}{a} + t_R + \frac{V_R}{b}$
- ❸ Calcolo  $v_{running}$  e  $v_{comm}$ :  $v_{running} = \frac{S}{t}$   $v_{comm} = \frac{S}{t_f + t}$

# Forme del Diagramma di trazione (4)

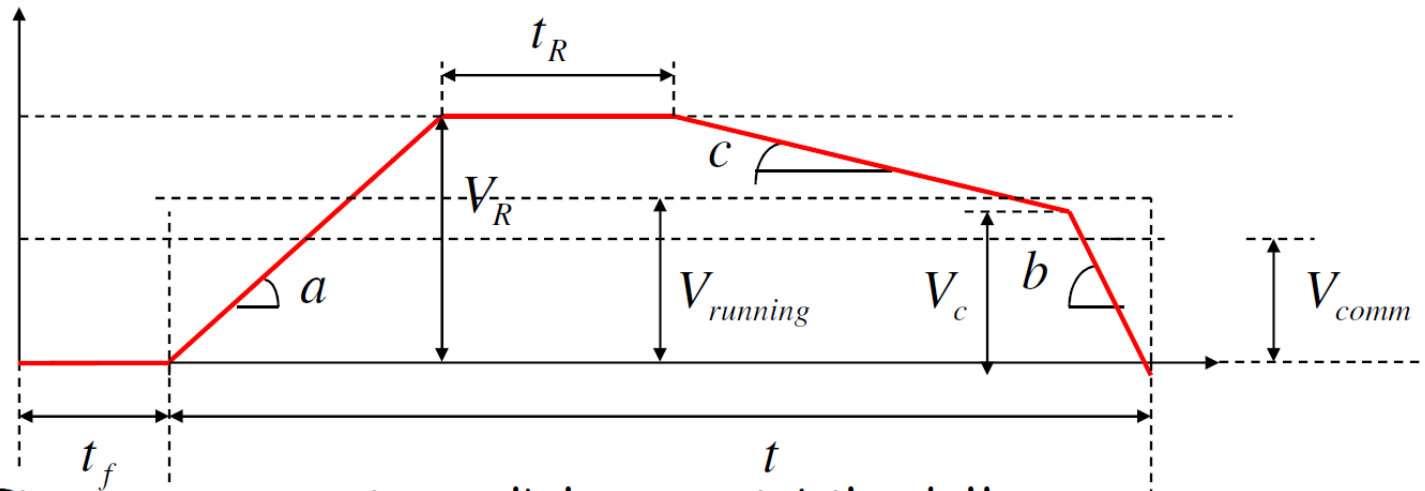
Caso  $S > S_c$  : forma con fase di lancio.



- ❶ Ricavo  $v_c$  dalla seguente relazione:  $S = \frac{v_R^2}{2a} + \frac{v_R^2 - v_c^2}{2c} + \frac{v_c^2}{2b}$
- ❷ Calcolo  $t$ :  $t = \frac{V_R}{a} + \frac{V_R - V_c}{c} + \frac{V_c}{b}$
- ❸ Calcolo  $v_{running}$  e  $v_{comm}$ :  $v_{running} = \frac{S}{t}$      $v_{comm} = \frac{S}{t_f + t}$

# Forme del Diagramma di trazione (5)

Caso  $S > S_c$  : forma con fase di regime e di lancio.



- ❶ Fisso  $v_c$  o  $t_R$  e ricavo l'altra variabile dalla seguente relazione:

$$S = \frac{v_R^2}{2a} + v_R t_R + \frac{v_R^2 - v_c^2}{2c} + \frac{v_c^2}{2b}$$

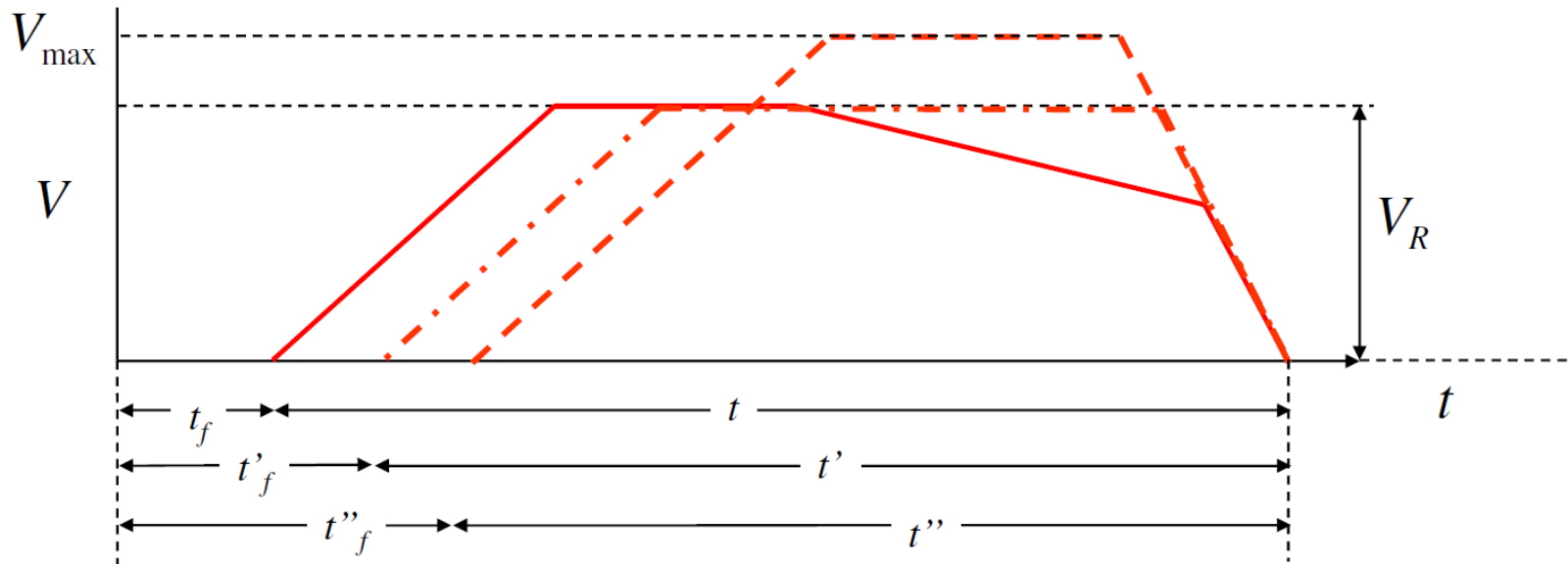
- ❷ Calcolo  $t$ : 
$$t = \frac{v_R}{a} + t_R + \frac{v_R - v_c}{c} + \frac{v_c}{b}$$

- ❸ Calcolo  $v_{\text{running}}$  e  $v_{\text{comm}}$ : 
$$v_{\text{running}} = \frac{S}{t} \quad v_{\text{comm}} = \frac{S}{t_f + t}$$

# Forme del Diagramma di trazione (6)

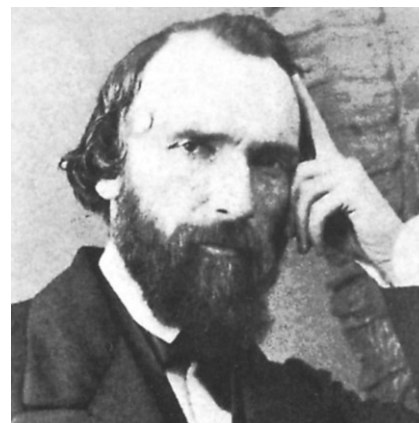
La forma con fase di lancio e di regime è considerata la migliore perché:

- rappresenta un compromesso fra il diagramma migliore da un punto di vista del livello di servizio (quello trapezio) e quello migliore da un punto di vista energetico (quello con sola fase di lancio);
- rende soprattutto il servizio più affidabile in quanto permette il recupero di ritardi accumulati alla fermate e quindi permette di mantenere la cadenza del servizio.





# Approfondimenti e Riflessioni



Le masse saranno sempre al di sotto della media. La maggiore età si abbasserà, la barriera del sesso cadrà, e la democrazia arriverà all'assurdo rimettendo la decisione intorno alle cose più grandi ai più incapaci. Sarà la punizione del suo principio astratto dell'uguaglianza, che dispensa l'ignorante di istruirsi, l'imbecille di giudicarsi, il bambino di essere uomo e il delinquente di correggersi. Il diritto pubblico fondato sulla uguaglianza andrà in pezzi a causa delle sue conseguenze. Perché non riconosce la disuguaglianza di valore, di merito, di esperienza, cioè la fatica individuale: culminerà nel trionfo della feccia e dell'appiattimento. L'adorazione delle apparenze si paga. »

Henri-Frédéric Amiel, “Frammenti di diario intimo”, 12 giugno 1871