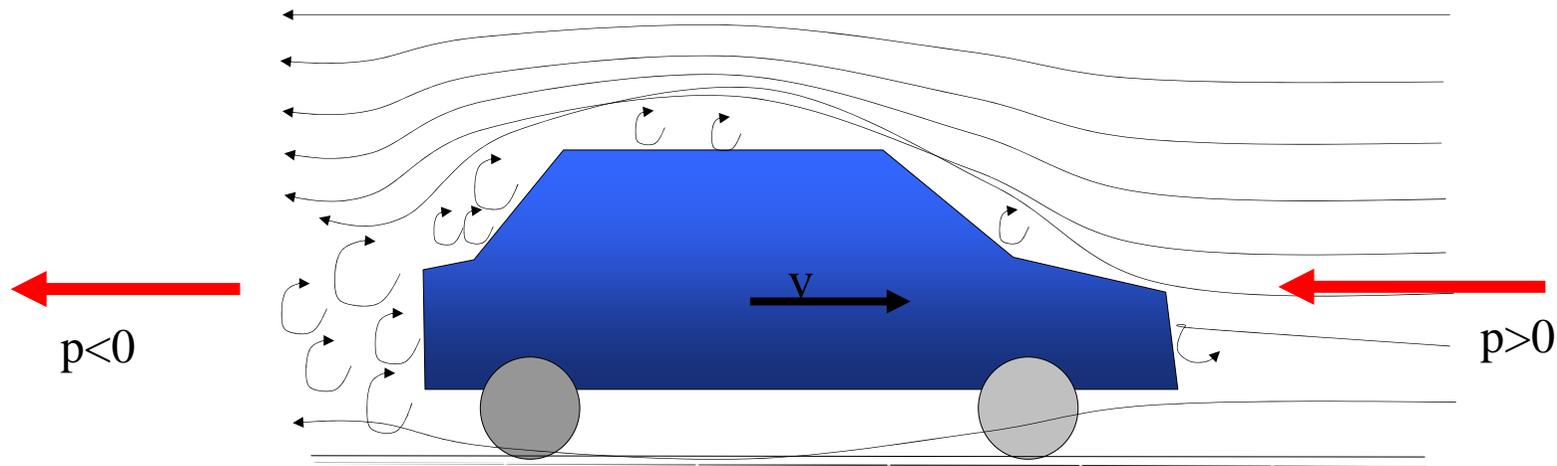


RESISTENZE ORDINARIE

Resistenza del Mezzo R_2

Un veicolo che si muove in un fluido incontra delle resistenze che possono essere scomposte in tre aliquote: la resistenza frontale, posteriore e laterale.

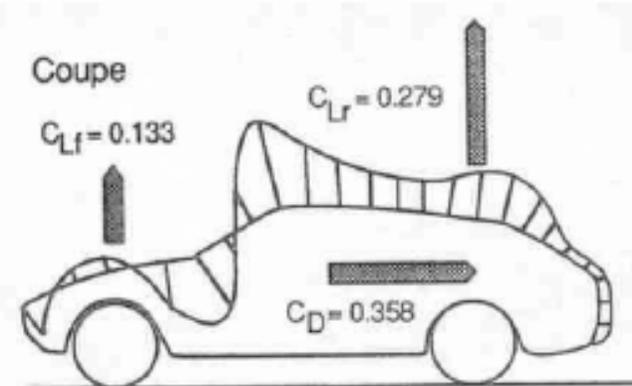
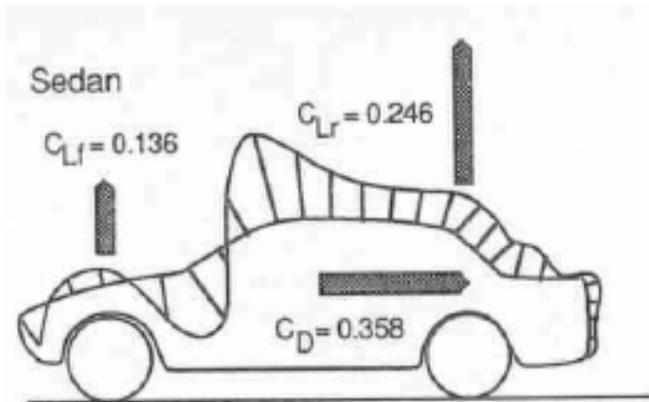
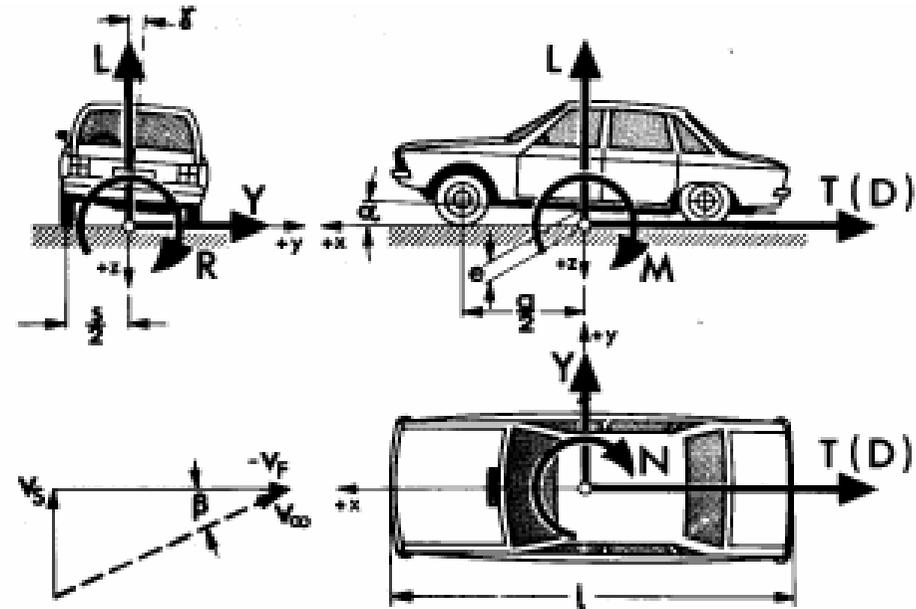
Il risultato di tali forze rappresenta la resistenza del mezzo



La resistenza del mezzo nel caso dei veicoli terrestri è rappresentativa della resistenza che l'aria (mezzo) oppone all'avanzamento del veicolo, stradale o ferroviario.

Resistenza del Mezzo R_2

Direzione	Forza	Momento
Longitudinale, positiva	Resistenza aerodinamica T	Rollio R
Laterale	Forza laterale Y	Beccheggio M
Verticale	Portanza L (sollevamento)	Imbardata N



Resistenza del Mezzo: **forma funzionale**

Gli studi condotti hanno mostrato che la resistenza del mezzo dipende da alcuni elementi dipendenti dal veicolo (geometria) e dal fluido (aria):

$$\mathbf{R_2 = \varphi(L, \rho, \mu, V)}$$

Ipotesi: aria è un fluido incomprimibile

- L parametri caratteristici della geometria del veicolo forma e dimensioni ()
- ρ densità del fluido $[ML^{-3}]$
- μ viscosità del fluido $[ML^{-1}T^{-1}]$
- V velocità del veicolo $[ML^{-1}]$

Resistenza del Mezzo: **forma funzionale**

L'esplicitazione analitica della R_2 viene ottenuta utilizzando l'analisi dimensionale.

Assunto che la R_2 sia esprimibile mediante una relazione il più generale possibile, si ha:

$$R_2 = k L^a \rho^b V^c \mu^d$$

Si deve imporre che, dimensionalmente, primo e secondo membro siano uguali tra loro

L'equazione dimensionale è la seguente:

$$\begin{aligned} [R_2] &= [MLT^{-2}] = k [L]^a [ML^{-3}]^b [LT^{-1}]^c [ML^{-1}T^{-1}]^d \\ [MLT^{-2}] &= k [L^a] [M^b L^{-3b}] [L^c T^{-1c}] [ML^{-1d} T^{-1d}] \end{aligned}$$

Per avere l'omogeneità dimensionale deve risultare:

$$\begin{array}{l} M \\ L \\ T \end{array} \left\{ \begin{array}{l} 1 = b + d \\ 1 = a - 3b + c - d \\ -2 = -c - d \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} a = 2 - d \\ b = 1 - d \\ c = 2 - d \end{array} \right.$$

RESISTENZA DEL MEZZO: **FORMA FUNZIONALE**

Da cui, sostituendo:

$$R_2 = k L^{2-d} \rho^{1-d} V^{2-d} \mu^d = k L^2 \rho V^2 (\mu/L \rho V)^d$$

Il termine $(\mu/L \rho V)^d$ è una funzione del numero di Reynolds

$$(\mu/L \rho V)^d = C(L \rho V / \mu) = C(N)$$

$C_D = C(N)$ prende il nome di **COEFFICIENTE DI FORMA** (*Longitudinale*)

dove $N = L \rho V / \mu$ (numero di Reynolds)

Quindi, si ottiene:

$$R_2 = k \rho S V^2 C(N)$$

S = sezione maestra

$C(N)$ = coeff. di forma

RESISTENZA DEL MEZZO: **FORMA FUNZIONALE**

Nelle applicazioni alla trazione terrestre $k = 1/2 = 0.5$

quindi
$$R_2 = 1/2 C(N) \rho S V^2$$

Inoltre, essendo $\rho = 0.125 \text{ Kg/m}^3$ (per $T = 15^\circ\text{C}$)

Si ha:

$$R_2 = 0.0625 C(N) S v^2 \quad [v] = \text{m/s}$$

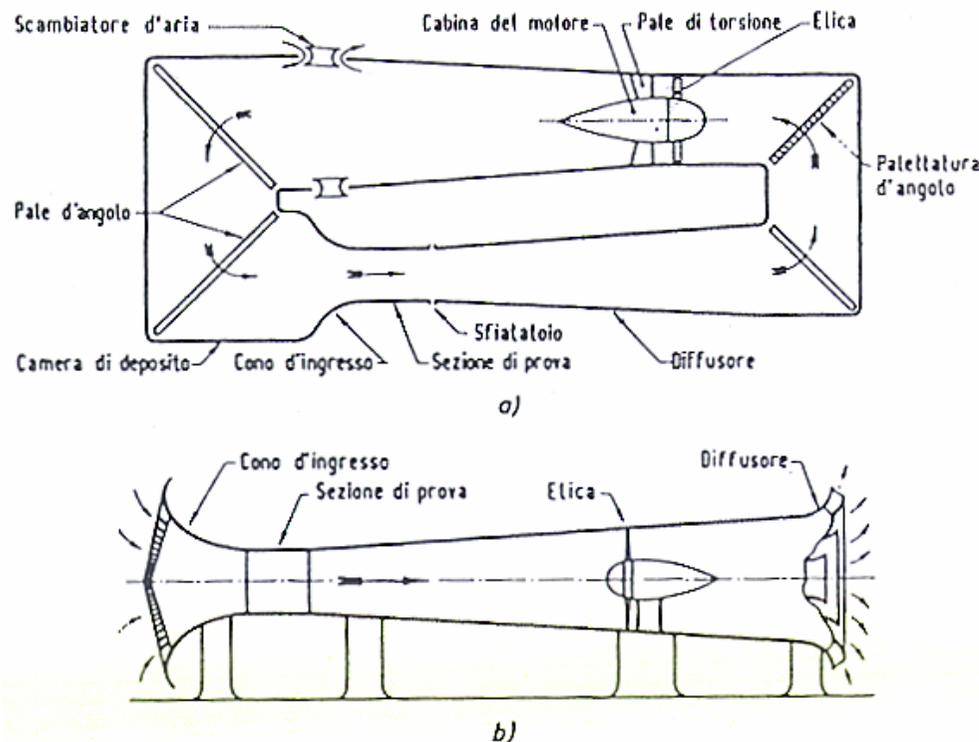
$$R_2 = 0.0048 C(N) S V^2 \quad [V] = \text{km/h}$$

$$V = V_{\text{veicolo}} \pm V_{\text{aria}}$$

Note le caratteristiche geometriche e cinematiche, per la determinazione di R_2 , occorre **definire il valore del coefficiente di forma $C(N)$**

DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI FORMA

Lo studio dei fenomeni connessi alla resistenza aerodinamica necessita di **PROVE SU MODELLI**. Tali prove vengono condotte all'interno delle gallerie del vento (in passato anche in vasche idrodinamiche)



Galleria del vento: a) a rinvio semplice; b) a circuito aperto

Le gallerie del vento sono degli ambienti in cui **il veicolo è fermo** e viene investito da una corrente d'aria che si muove con velocità nota V_{aria} .

Una galleria del vento è dotata di un sistema di acquisizione dati, e di sistemi di rilevazione delle forze impresse dall'aria sul veicolo. Altri sistemi consentono, inoltre, di rilevare con la massima precisione la velocità del vento, la sua direzione e la sua turbolenza.

Dallo studio delle forze a cui è soggetto il veicolo e dallo studio delle traiettorie delle particelle di aria è possibile **definire il coefficiente di forma** ed altre indicazioni utili a definire il comportamento aerodinamico del veicolo.

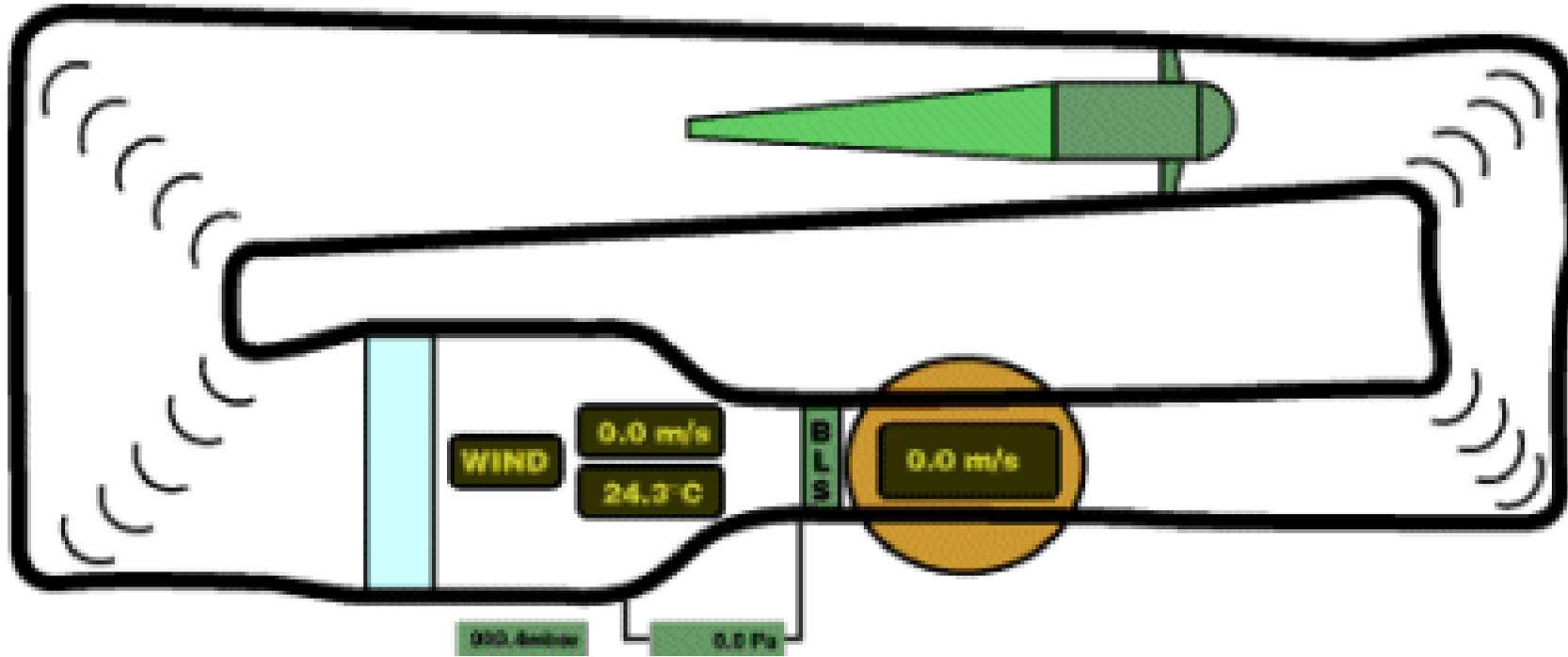
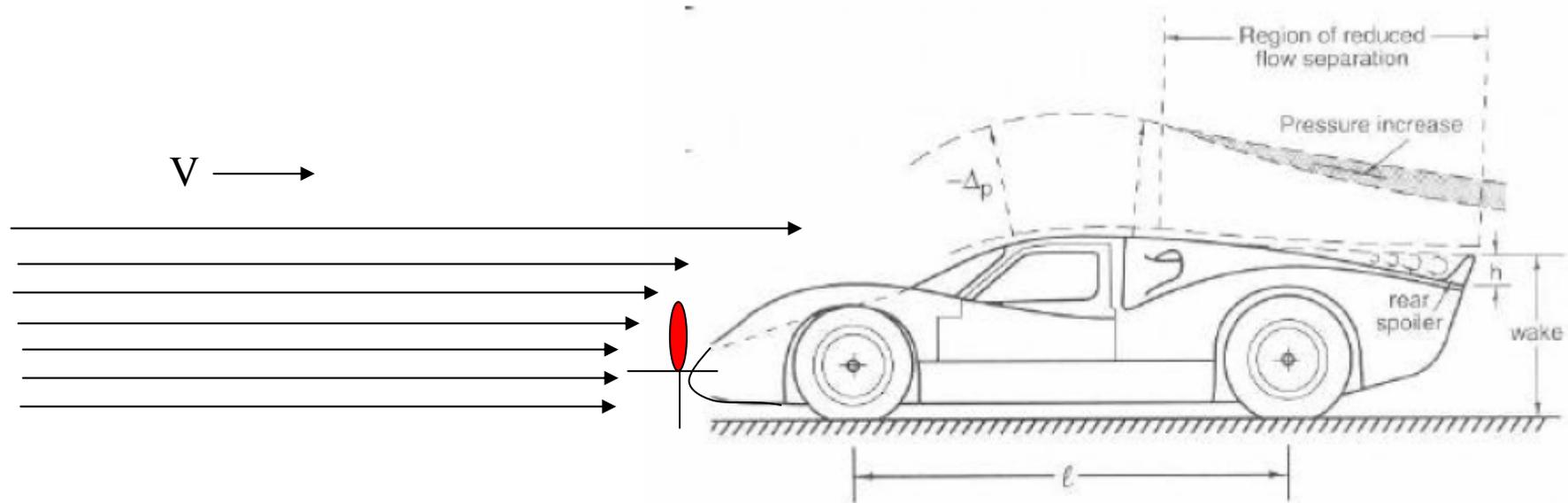


Figura 9 Schema della galleria del vento di Fiorano

DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI FORMA: PROVE SU MODELLI



Il modello in scala (1:10; 1:20, talvolta in scala reale 1:1) viene investito da una corrente d'aria dotata di velocità V .

Con un dispositivo viene misurata direttamente la resistenza R_2 (spinta su un dinamometro). Essendo noti ρ , S e V , si determina $C(N)$ indirettamente con la formula analitica

-- Requisiti sperimentali

- Precisione del dinamometro (misura della resistenza)
- Uniformità della corrente (filetti d'aria paralleli e con uguale velocità)

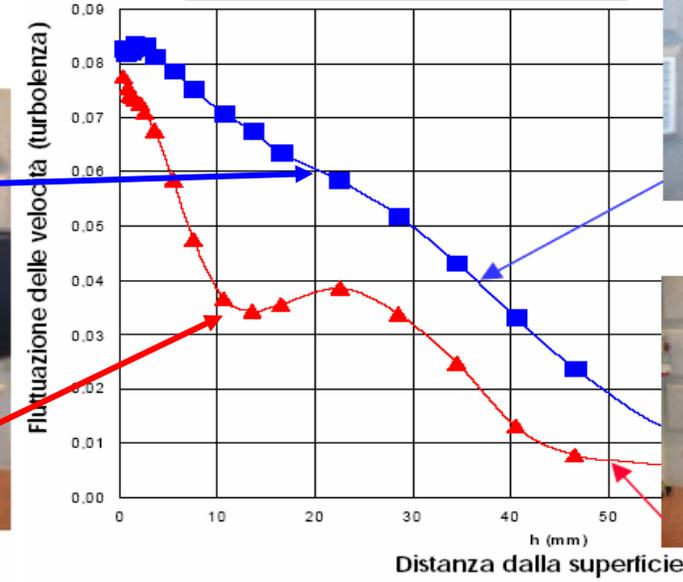
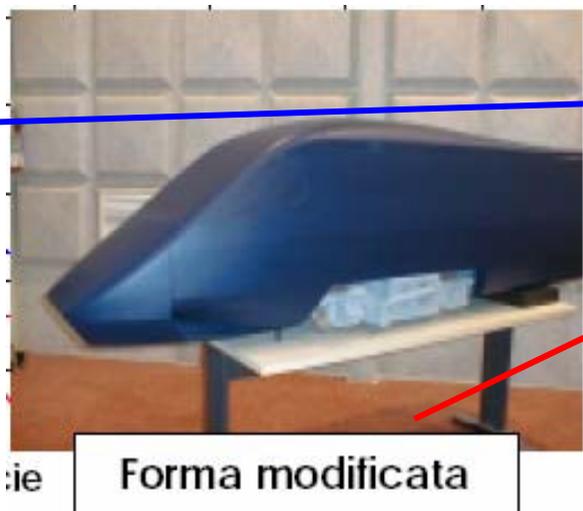
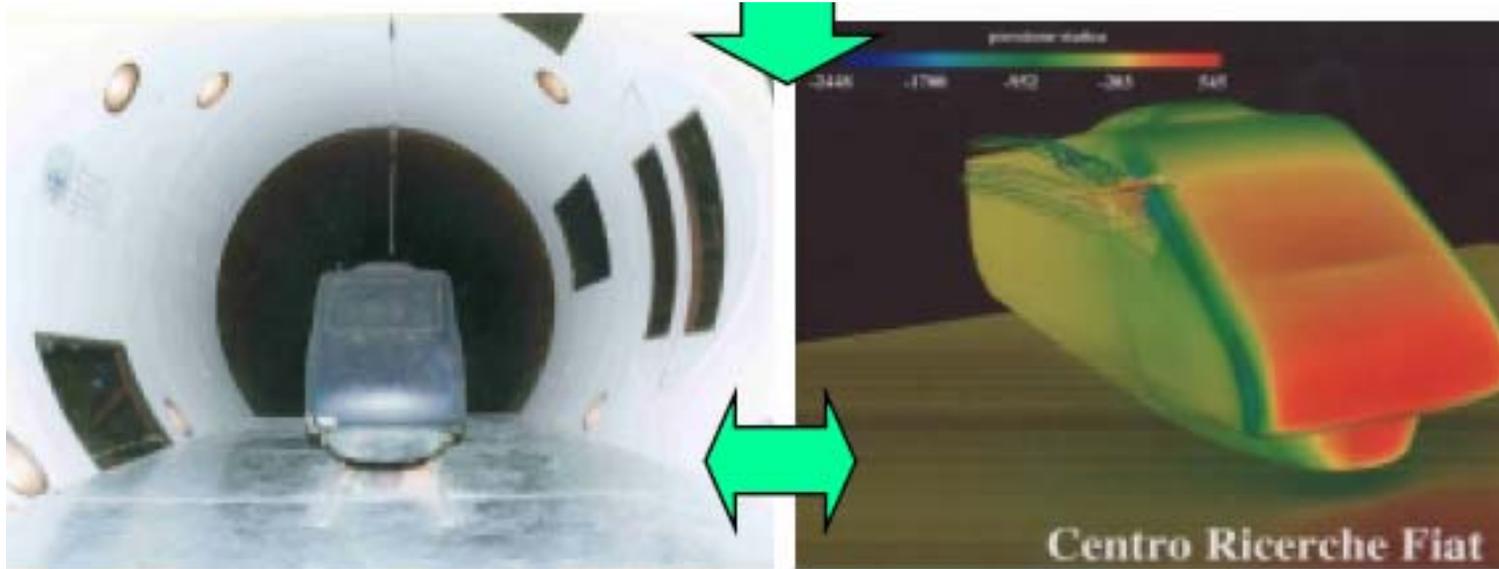
DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI FORMA

I progressi compiuti dalla ricerca nel settore della fluidodinamica numerica hanno fatto sì che attualmente tali studi aerodinamici vengono condotti per simulazione all'elaboratore.

Questa opportunità consente di simulare il funzionamento del sistema aria-veicolo in condizioni non riproducibili in galleria del vento specie nel settore ferroviario o aereo in cui si è costretti ad utilizzare modelli in scala ridotta.

Gli studi sui modelli sono comunque indispensabili per calibrare i modelli matematici di simulazione

DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI FORMA





PROTOTIPO FERRARI IN GALLERIA DEL VENTO

CONFIGURAZIONE DI PROVA IN GALLERIA DEL VENTO



*Viadotto/
rilevato*



Diverse tipologie di treno (motrice + 2 rimorchiato)

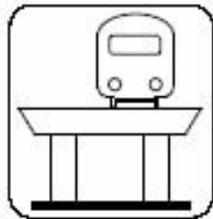
UIC-Z1

ETR 500

ETR 480

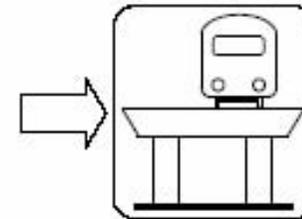


Sopravento / Sottovento



*Vento da
sinistra*

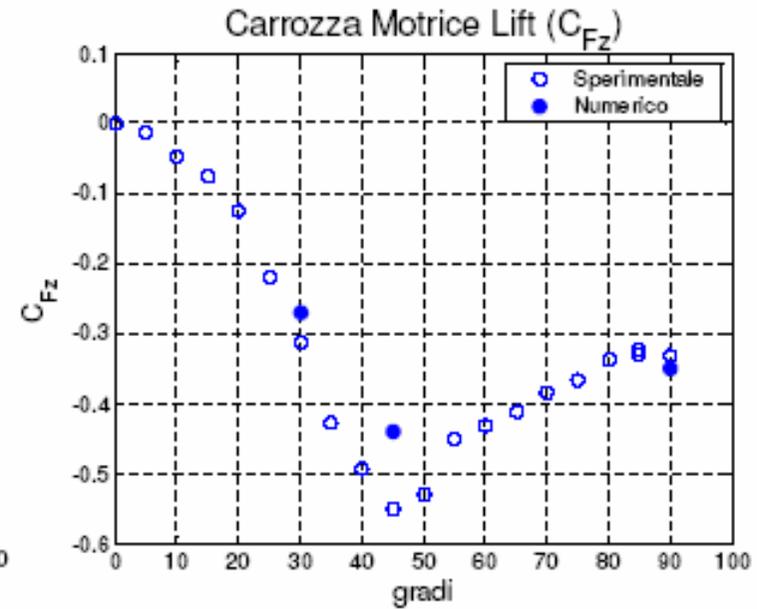
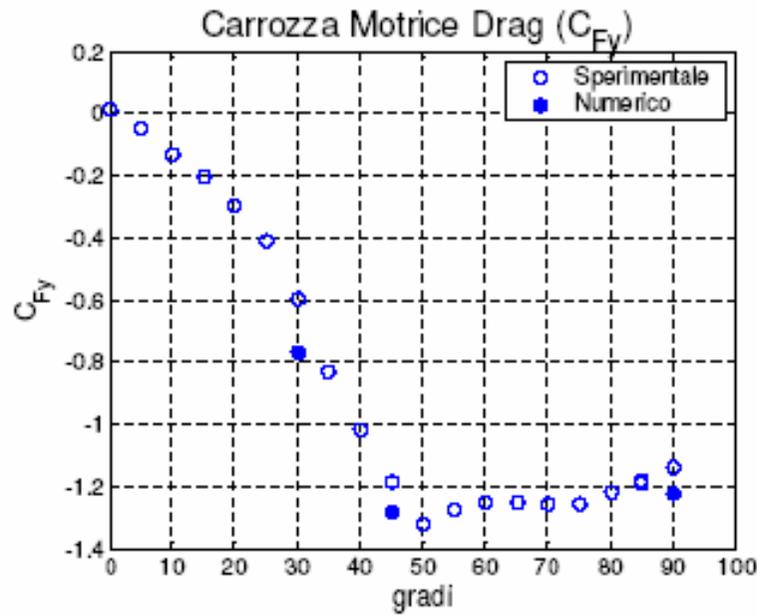
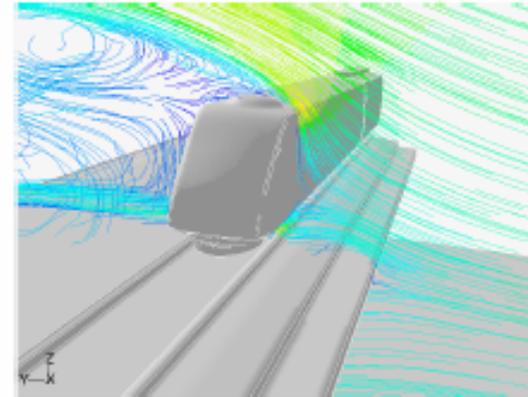
*Vento da
destra*



(SCALA :20)

- Carrozza motrice ETR480 – viadotto - sopravvento**

Vento



ERRORI NELLA VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI FORMA

In galleria del vento non è possibile riprodurre esattamente il fenomeno reale
Quindi il valore del coefficiente di forma calcolato è affetto da errore.

L'errore può avere almeno due cause:

- 1) **ERRORE PER EFFETTO SCALA** (scala ridotta, rugosità)
- 2) **ERRORE PER EFFETTO TERRA** ($V_{veic} = 0$; $V_{aria} \neq 0$)

ERRORE PER EFFETTO SCALA

E' dovuto al fatto che, se si utilizzano modelli in scala ridotta, non è mantenuta l'uguaglianza del numero di Reynolds N_{reale} relativo al fenomeno e veicolo reale e quello $N_{modello}$ relativo al modello riprodotto in scala $\lambda < 1$.

Infatti:

$$N_{reale} = L \rho v / \mu; \quad N_{modello} = (\lambda L) \rho v / \mu \quad (\text{relativo al modello})$$

Quindi, essendo $\lambda < 1$ il fattore di scala di riduzione, in galleria del vento si ha:

$$N_{reale} > N_{modello}$$

$N_{modello}$ è λ volte più piccolo di N_{reale} , ciò comporterebbe il calcolo di un $C(N)$ inferiore a quello reale.

Ricordiamo che C è una funzione di N

Il problema, si potrebbe risolvere aumentando la velocità dell'aria $1/\lambda$ volte, $v' = \lambda v$:

$$N_{modello} = (\lambda L) \rho v' / \mu = (\cancel{\lambda} L) \rho v / \cancel{\lambda} \mu = L \rho v / \mu = N_{reale}$$

PROBLEMI CONNESSI

- difficoltà di realizzazione velocità prossima a quella del suono c

Inoltre per indice di Mach $M > 0.5$ si talune ipotesi sulle caratteristiche dell'aria non vengono verificate

$$R_2 = f(M) \quad [M = v/c] \quad c \cong 1100 \text{ Km/h}$$

Impossibilità di ottenere $N_{\text{ORIG}} = N_{\text{MOD}}$ pertanto si evidenzia come l'utilizzo del mezzo in scala comporti la valutazione di C errato

Si opera con N inferiori ammettendo l'errore in $C(N)$ in eccesso.

2) **RUGOSITÀ SUPERFICIALI** $C(N)$ ECCESSO

Altro errore per effetto scala è l'impossibilità di riprodurre, in scala, le **RUGOSITÀ SUPERFICIALI**

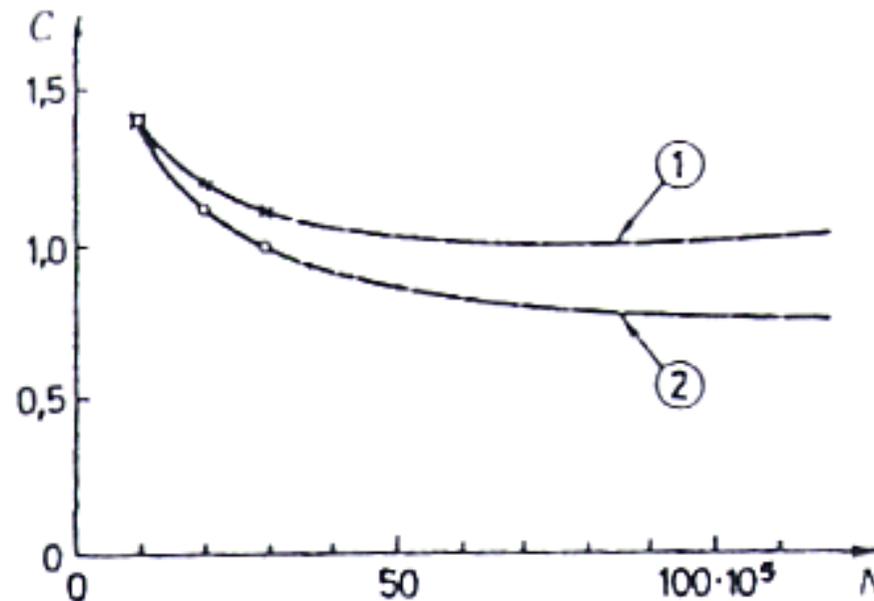
Il modello ha rugosità maggiore per la minore levigatezza

Per stimare tale valore di $C(N)$ è possibile definire due modalità di prova e quindi estrapolare curve di variazione di C in funzione di N

curva 1) $\lambda = \text{cost}$ $v = \text{variabile}$ v_1, v_2, \dots

curva 2) $v = \text{cost}$ $\lambda = \text{crescente}$

Si estrapola C dalla curva 2) in quanto tiene conto di entrambi gli errori di una VALUTAZIONE IN ECCESSO di $C(N)$



Curve $C(N)$ per solidi allungati: diversa influenza

PROBLEMI CONNESSI

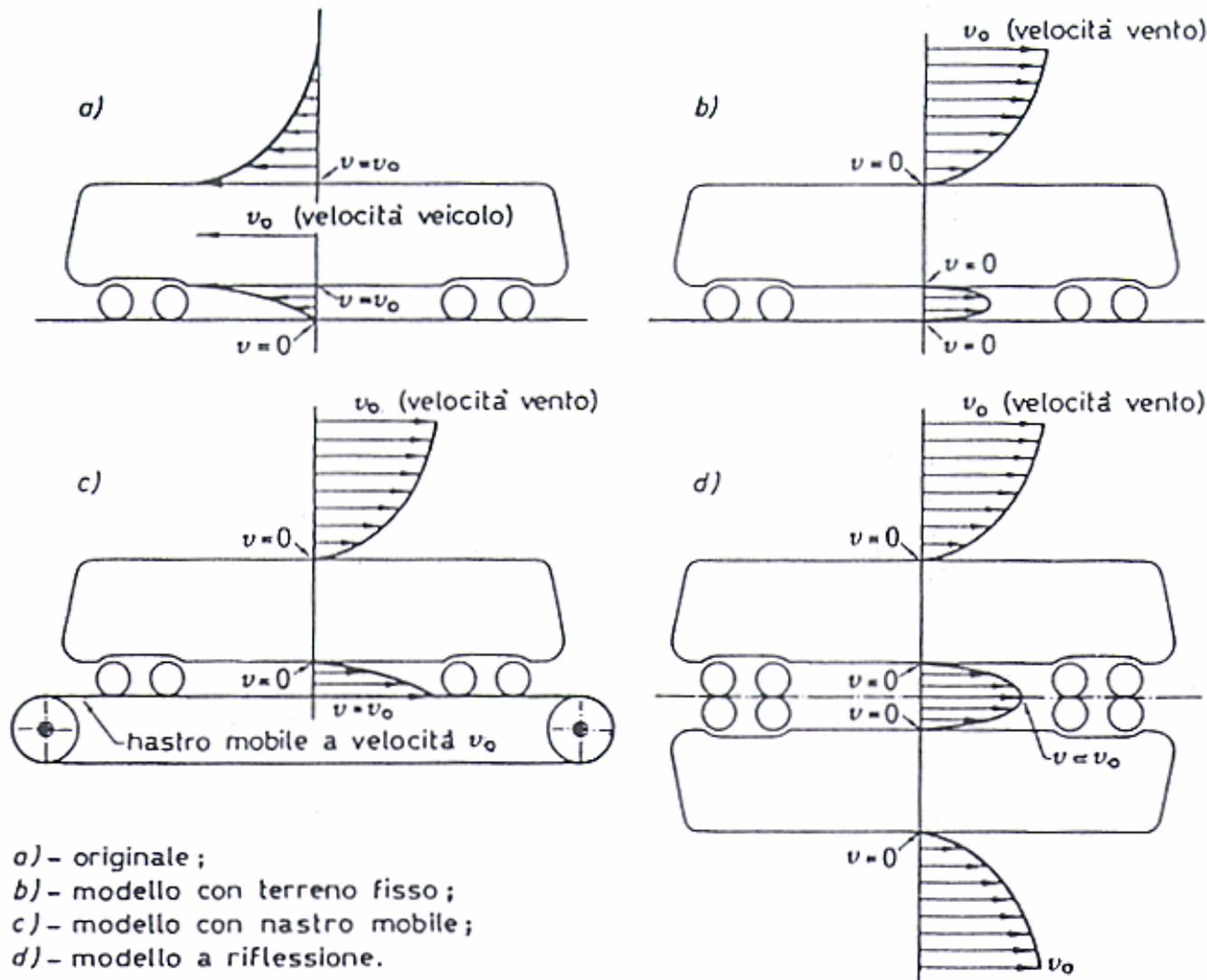
- **EFFETTO TERRA**
(errore in difetto)

causa: **il modello è fermo, l'aria si muove $v_{\text{aria}} \neq 0$**

- L'errore è dovuto al fatto che durante la prova, al contrario della realtà, il modello è fermo rispetto al terreno, mentre l'aria si muove con velocità v .
Nella realtà:

$$V_{\text{terreno}} = V_{\text{aria}} = 0$$

quindi nella simulazione, poiché: $V_{\text{aria}} = v_0$
dovrebbe essere $V_{\text{terreno}} = v_0 \neq 0$



- a) - originale ;
- b) - modello con terreno fisso ;
- c) - modello con nastro mobile ;
- d) - modello a riflessione.

📍 Diverse disposizioni sperimentali per l'effetto terra

In generale :

- Effetto scala errore in eccesso
- Effetto terra errore in difetto

Quello in difetto solitamente prevale, portando così a coefficienti di forma più bassi

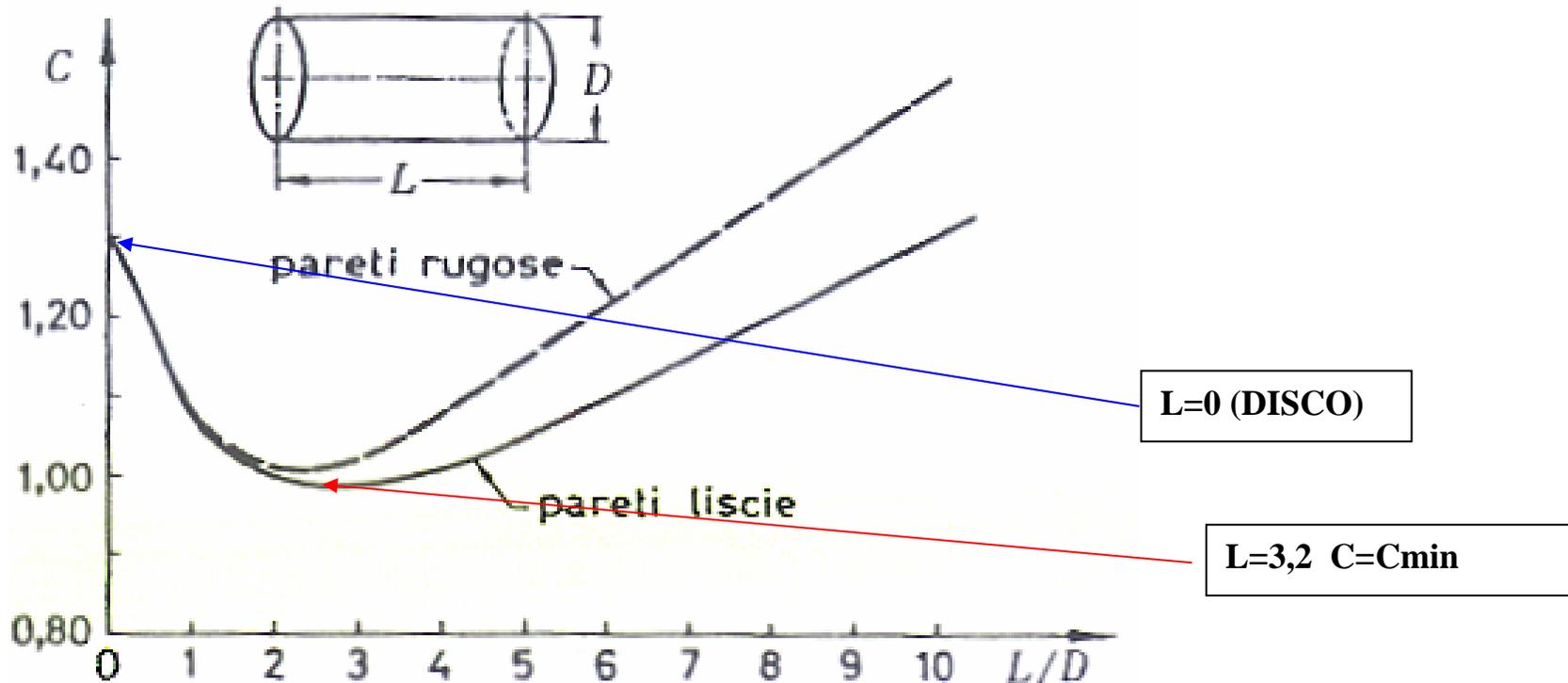
I modelli utilizzati vanno da 1:10 - 1:25, ma solitamente sono 1:20.

con lo schema a doppio modello per auto o motrici isolate, per composizioni si usa il tipo b.

RISULTATI DELLE PROVE

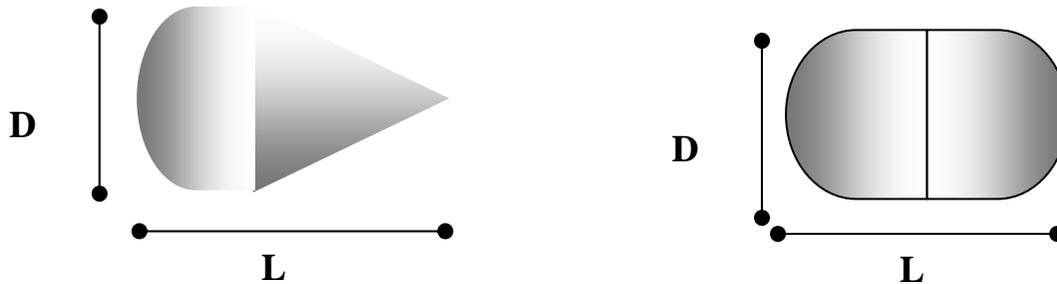
Dalle prove condotte su un cilindro di lunghezza L e diametro D , risulta che la resistenza complessiva è dovuta a:

- EFFETTO TESTA, pressioni esercitate sulla testata anteriore
- EFFETTO CODA, depressioni in coda al cilindro
- EFFETTO PARETI, resistenze lungo le pareti laterali (rugosità materiali e irregolarità concentrate)



IL CASO DEI CONVOGLI FERROVIARI

- Le prove dimostrano che il minimo C si ha per un solido a goccia ($C=0.08$): effetto coda nullo.



I risultati ottenuti possono essere riportati alla realtà ferroviaria se il convoglio o il veicolo può essere assimilato ad un cilindro di lunghezza L e diametro D

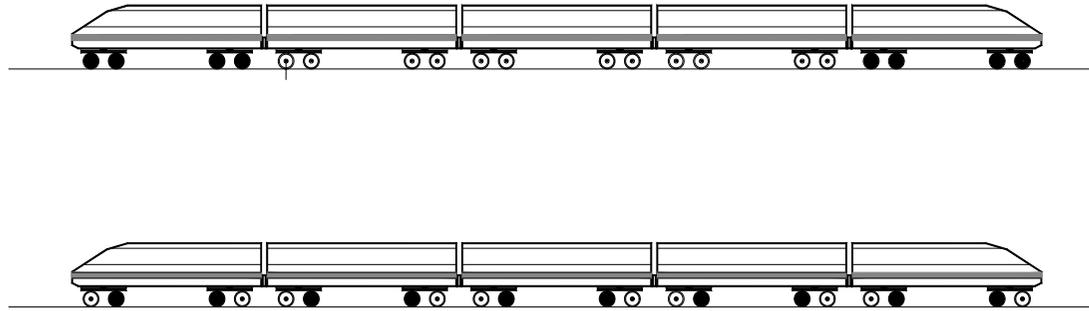
Lo scopo è quello di definire forme che minimizzano la resistenza aerodinamica.

- La forma a goccia non è praticabile nei veicoli ferroviari
- Occorre uno studio accurato della *forma aerodinamica della testata anteriore e posteriore* (in ferrovia sono identiche perché i convogli sono bidirezionali;
- Gli sforzi sono orientati alla *DIMINUIZIONE DELL'EFFETTO PARETI* mediante:
 - riduzione delle turbolenze nel sottotelaio, proteggendo le apparecchiature con carenature apposite. Analogamente si opera con le apparecchiature situate sul tetto;
 - riduzione dei vortici fra convogli, minimizzando le discontinuità delle pareti esterne;
 - riduzioni delle asperità delle superfici laterali.



Necessità di utilizzare **COMPOSIZIONI BLOCCATE** (finestrini chiusi + carenatura).

TRENI A COMPOSIZIONE BLOCCATA



Sono Treni per i quali sono adottate una serie di accorgimenti (assimilabile ad un cilindro)

Per **due unità a carrelli accoppiate** ($L = 20 \div 25$ m ciascuna) risulta **$C = 0.40 \div 0.45$**

Per ogni unità in più si ha un incremento di **$C' = 0.08 \div 0.1$** (contributo effetto pareti)

$$C_{\text{treno}} = C_0 + C' (m - 2) \text{ (per } m \text{ unità accoppiate)}$$

Nel caso in cui il treno non abbia carenatura inferiore e sia con finestrini apribili:

$C_0 + 25\%$

$C' + 50\%$

TRENI A COMPOSIZIONE VARIABILE

Quando l'ipotesi ed i risultati ottenuti per un cilindro non sono più validi?

Per treni costituiti da :

- Numero di carrozze diverso;
- Tipo di carri diverso;
- Dimensioni diverse.

IPOTESI: Il treno è assimilato ad un cilindro con L/D elevato (effetto coda trascurabile)

Il coefficiente di forma del treno viene diviso in due componenti

$$C_{\text{treno}} = C_{\text{loc}} + C_{\text{veic}}$$

$C_{\text{loc}} = 0.7 \div 0.9$ relativo alla resistenza frontale, costante al variare della composizione.

$C_{\text{veic}} = C_0 L/D$ rappresentativo della resistenza laterale, effetto pareti, irregolarità distribuite proporzionalmente a L/D.

TRENI A COMPOSIZIONE VARIABILE

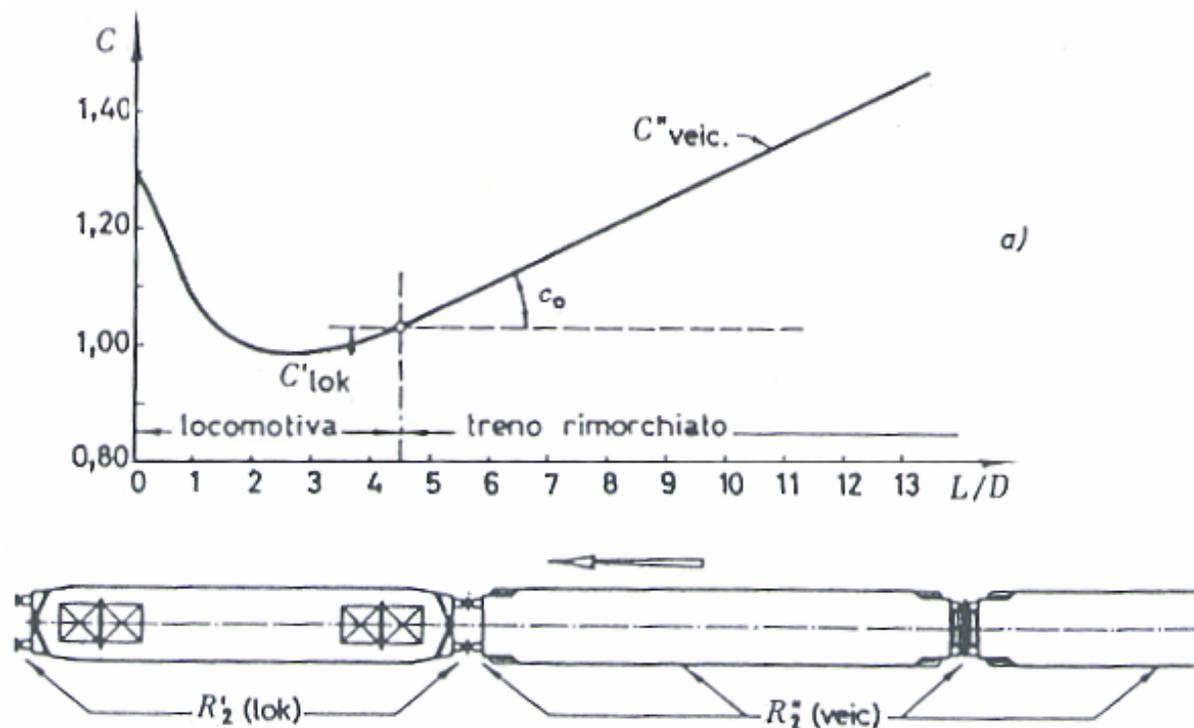
La resistenza sarà quindi, somma di due aliquote

$$R_{2 \text{ treno}} = R_{2 \text{ loc}} + R_{2 \text{ veic}}$$

con

$$R_{2 \text{ loc}} = 0.0048 C_{\text{loc}} S V^2 \quad [V] = \text{Km/h}$$

$$R_{2 \text{ veic}} = 0.0048 C_0 L/D S V^2$$



RESISTENZA DEL MEZZO

ALCUNI VALORI DEL COEFFICIENTE DI FORMA PER VEICOLI STRADALI SONO:

Autovettura	0.28 ÷ 0.40;
Furgone	0.55 ÷ 0.65;
Autobus	0.50 ÷ 0.70;
Autocarri	0.60 ÷ 0.80;
Autoarticolati	0.80 ÷ 1.00.

Le resistenze al rotolamento, ai perni e quella aerodinamica costituiscono le resistenze ordinarie relative al moto uniforme in piano e rettilineo.

Vengono definite mediante espressioni globali di tipo sperimentale:

Espressione	Campo di applicazione	
$r_0 = 1.9 + 0.00026 V^2$	[N/kN]	Treni viaggiatori leggeri
$r_0 = 2 + 0.00028 V^2$	[N/kN]	Treni viaggiatori di composizione normale
$r_0 = 2.5 + 0.00003 V^2$	[N/kN]	Locomotive isolate e treni merci
$r_0 = 1.2 + 0.025V + 0.00014 V^2$	[N/kN]	Materiale veloce giapponese

Resistenza specifica complessiva, al rotolamento e aerodinamica, in piano e rettilineo con V in km/h.

NB: 1N/kN = 1Kg/tonn