

# Resistenze al moto



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Prof. Ing. Mattia Strangi

Università degli Studi di Bologna

Dipartimento DICAM – Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali – [www.dicam.unibo.it](http://www.dicam.unibo.it)

e-mail [mattia.strangi@unibo.it](mailto:mattia.strangi@unibo.it)

Ricevimento dopo le lezioni



# DEFINIZIONE DELLE PRESTAZIONI DEL VEICOLO

- Per poter definire le prestazioni adeguate che un veicolo deve avere per adempiere alle sue funzioni, bisogna innanzitutto conoscere il contesto in cui esso è destinato ad operare.
- Ad esempio, bisogna conoscere quali sono le resistenze da vincere durante il viaggio, per poter stabilire potenza, coppia e velocità che il propulsore deve essere in grado di erogare.



# RESISTENZE AL MOTO

- dipendono da veicolo, ambiente, percorso;
- Le resistenze al moto sono forze equivalenti, dal punto di vista energetico, alle dissipazioni non conservative (ex: aerodinamica, rotolamento ecc.) o forze conservative (ex: pendenza, frenatura rigenerativa ecc.);
- tutte le resistenze al moto hanno verso opposto all'avanzamento del veicolo dunque provocano decelerazione.



# RESISTENZE AL MOTO

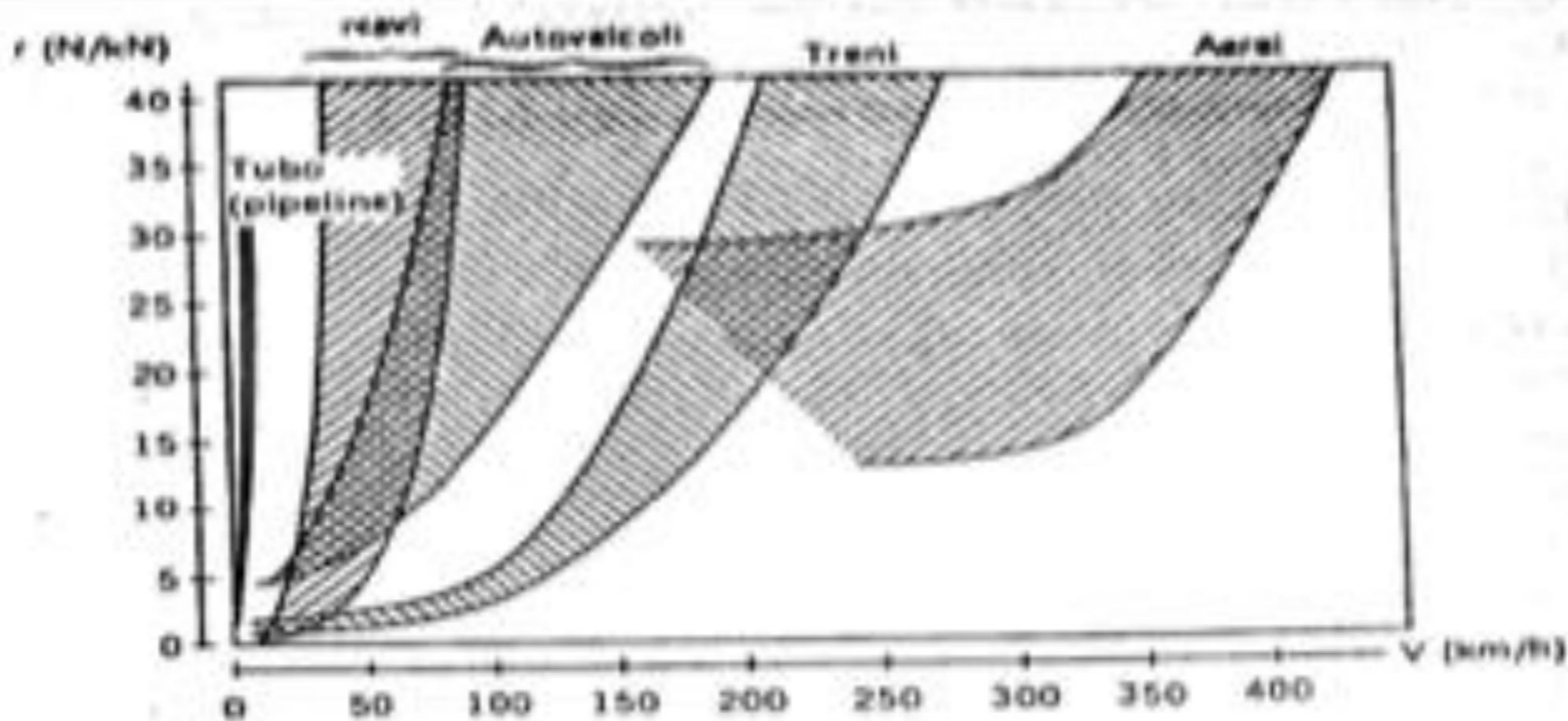
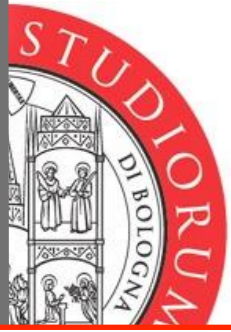


Figura 26.1. Resistenze al moto dei diversi sistemi di trasporto.

— sistemi a tubo	:	10	+	15	km/h
— natanti	:	40	+	90	"
— autoveicoli	:	90	+	200	"
— treni	:	200	+	300	"



# Resistenze al moto

✓ La potenza impiegata in un mezzo di trasporto è principalmente dissipata nelle resistenze all'avanzamento

- **Resistenza al rotolamento**

Zona di appoggio non puntiforme, dipende dai materiali a contatto

- **Resistenza del percorso (pendenze e curve)**

Energia che generalmente si recupera nei tratti discendenti

- **Resistenza aerodinamica**

L'aria si oppone all'avanzamento del veicolo



# La decelerazione

- Il moto perpetuo non esiste
- Decelerazione
  - ☑ Freno a disco
  - ☑ Freno motore
  
  - ☑ Resistenza al rotolamento
  - ☑ Resistenza aerodinamica
  - ☑ Resistenza del percorso



# Resistenze al rotolamento

## ☑ Zona di contatto

### ☆ Diagramma delle pressioni

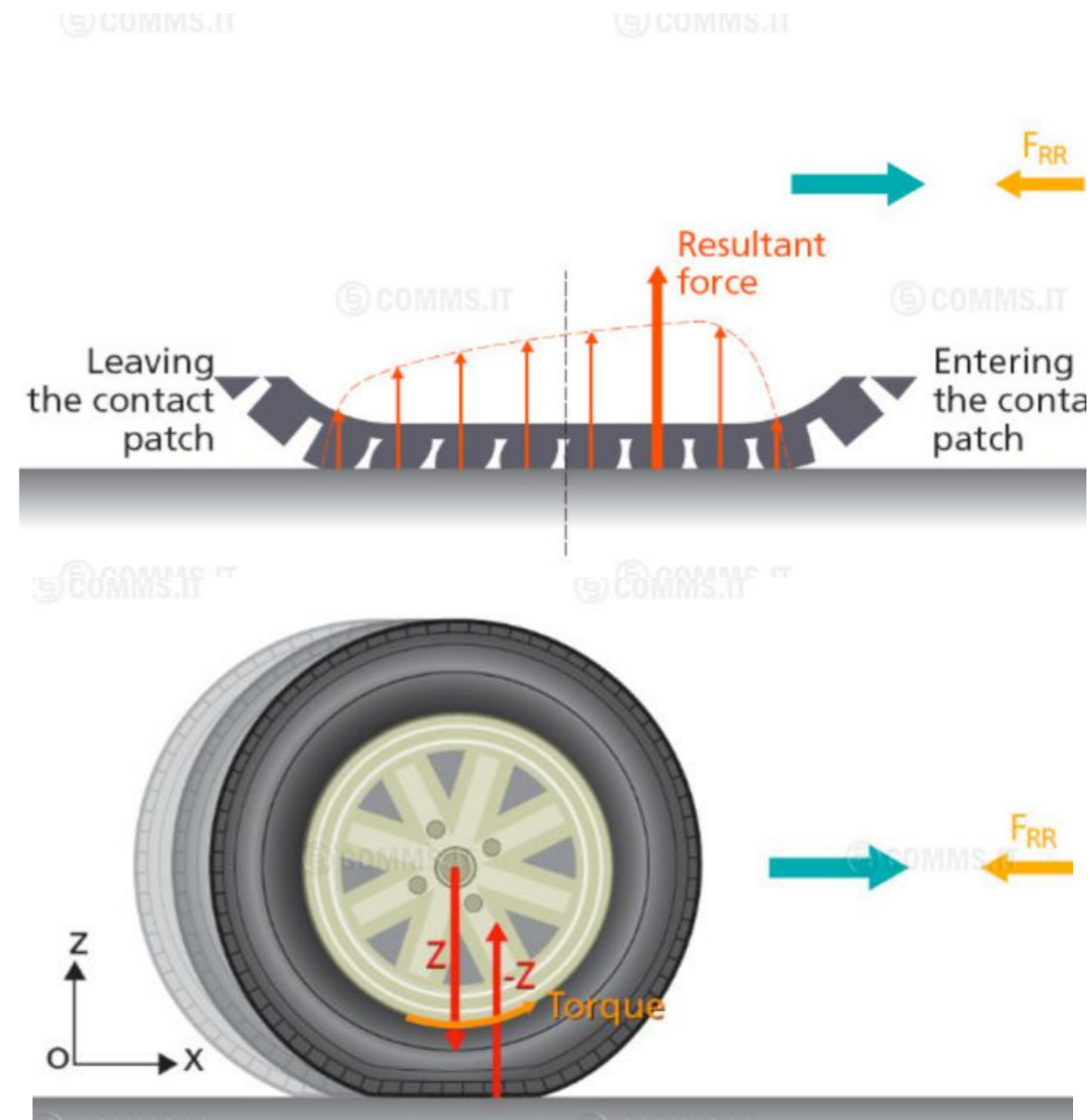
Teoria di Hertz

### ☆ Condizioni statiche

Non determina alcun momento rispetto al centro della ruota

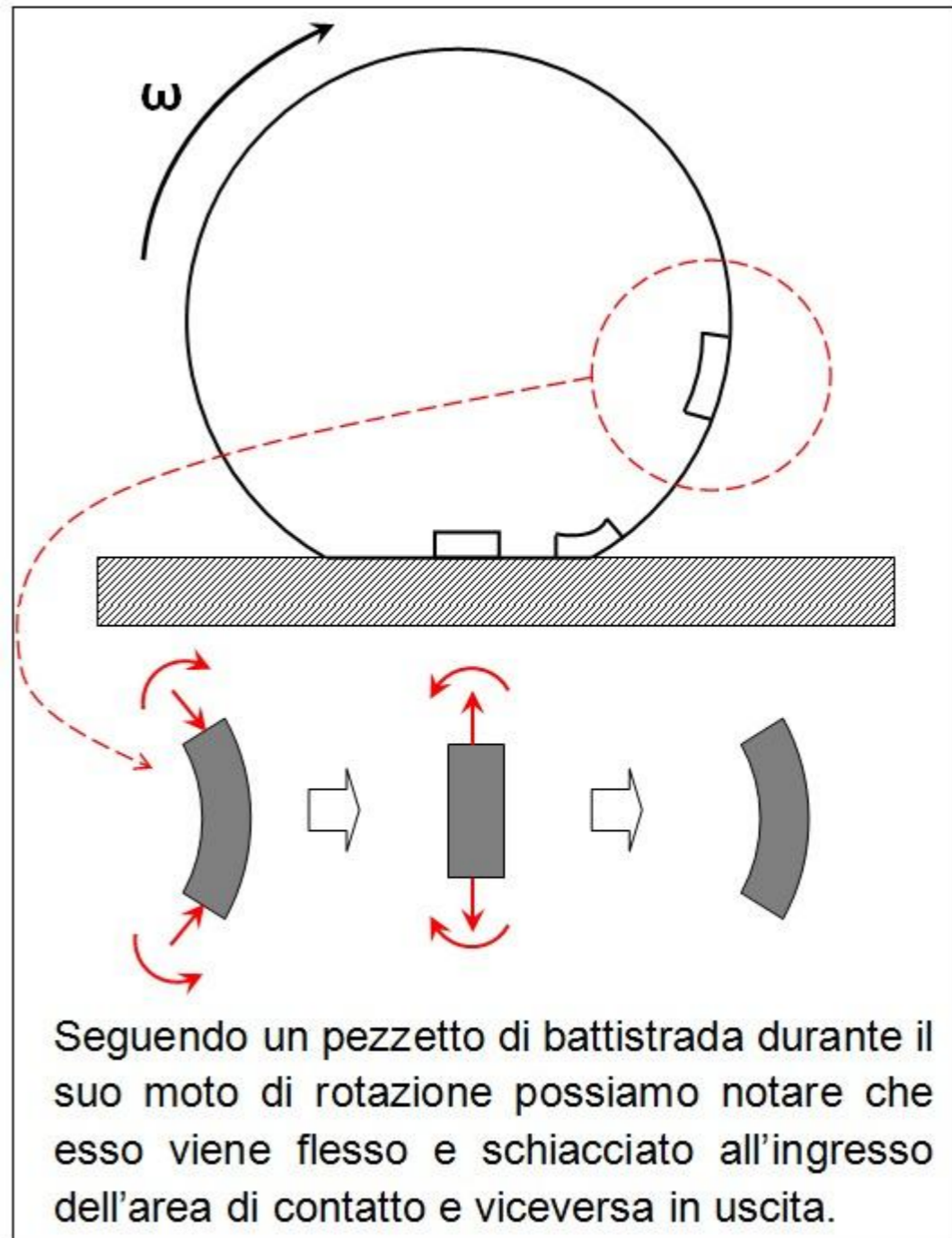
### ☆ Condizioni dinamiche

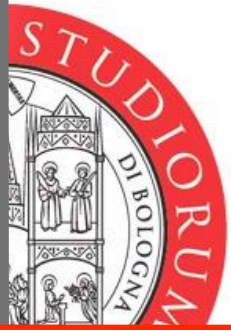
Si manifestano deformazioni elastiche, essendo l'elasticità dei corpi generalmente imperfetta, una quota dell'energia scambiata terminerà in dissipazioni. Questo fenomeno è in particolare evidenziato dall'asimmetria che viene ad assumere la distribuzione delle pressioni tra i due corpi durante il moto, tale da ammettere risultante spostata rispetto al centro della ruota.



# Resistenze al rotolamento

Durante il rotolamento di uno pneumatico le perdite per isteresi elastica derivano dai continui cicli deformativi a cui è soggetta la struttura dello pneumatico e si verificano per il 70% in corrispondenza del battistrada, per il 15% a livello del fianco e per il rimanente 15% sul tallone





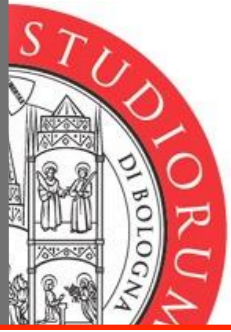
# RESISTENZA AL ROTOLAMENTO

---

Dipende dalla deformazione del suolo, dallo schiacciamento dello pneumatico (quindi anche dalla sua pressione di gonfiaggio), dall'attrito nei perni e dalla ventilazione.

RESISTENZA UNITARIA AL ROTOLAMENTO ( $r_r$ ):

$$r_r = r + 5 \cdot 10^{-4} \cdot v^2 \quad R_{rot} = r_r \cdot P$$

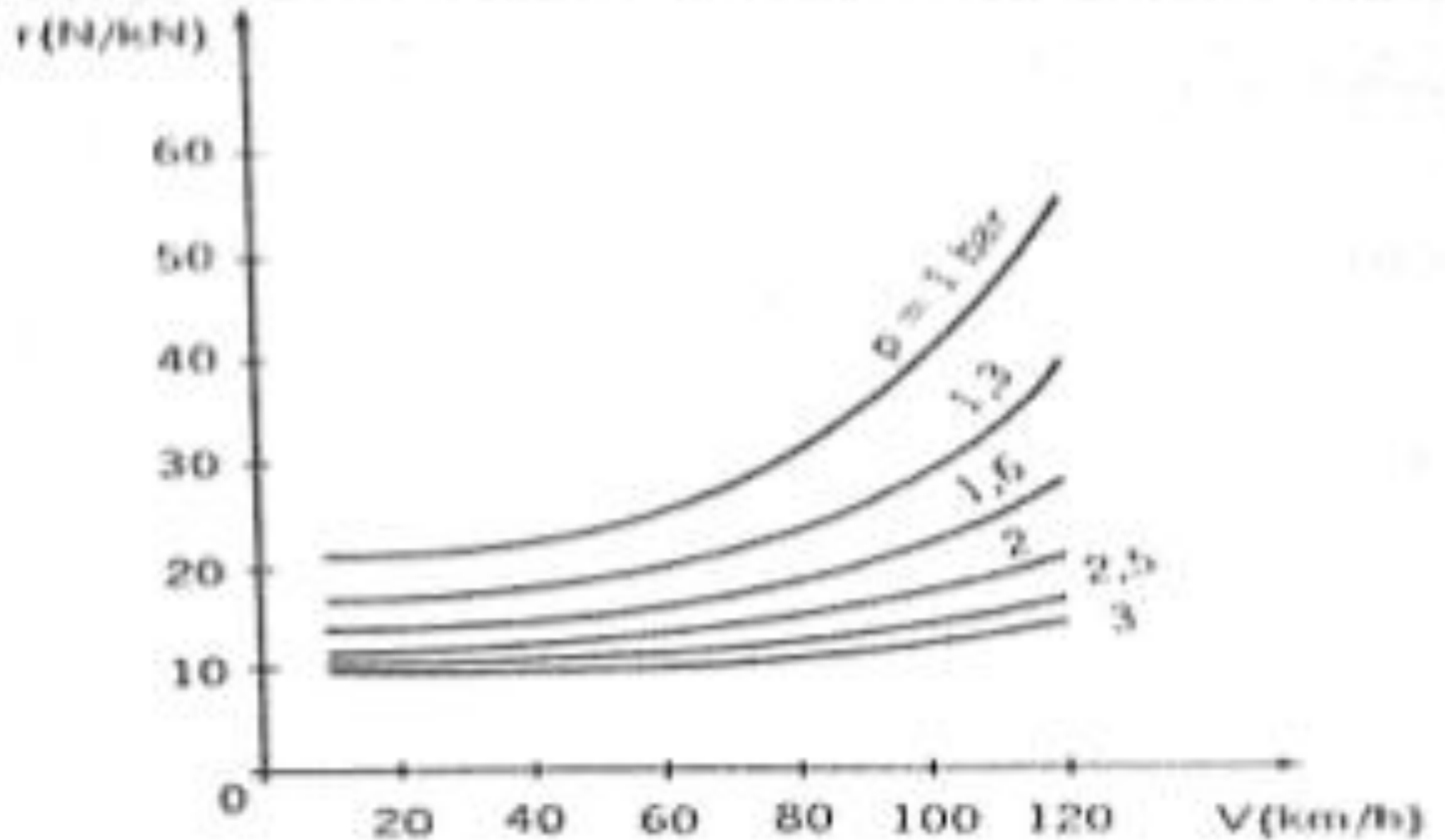


# VALORI TIPICI

<i>Coppia organo/sede</i>	<i>r</i> (N/kN)	<i>V</i> (km/h)
<b>Ruota pneumatica su strada:</b>		
– in cemento	10 + 15	< 150
– in asfalto	12 + 18	
– in macadam	20 + 25	< 100
<b>Ruota pneumatica fuori strada:</b>		
– su terreno naturale	80 + 100	< 60
– su sabbia	150 + 200	
<b>Ruota in ferro su rotaia:</b>	1 + 2	< 100
	1,5 + 2,5	100 + 150
<b>Cingolo su strada</b>	30 + 50	< 40



# VALORI TIPICI - Pressione di gonfiaggio

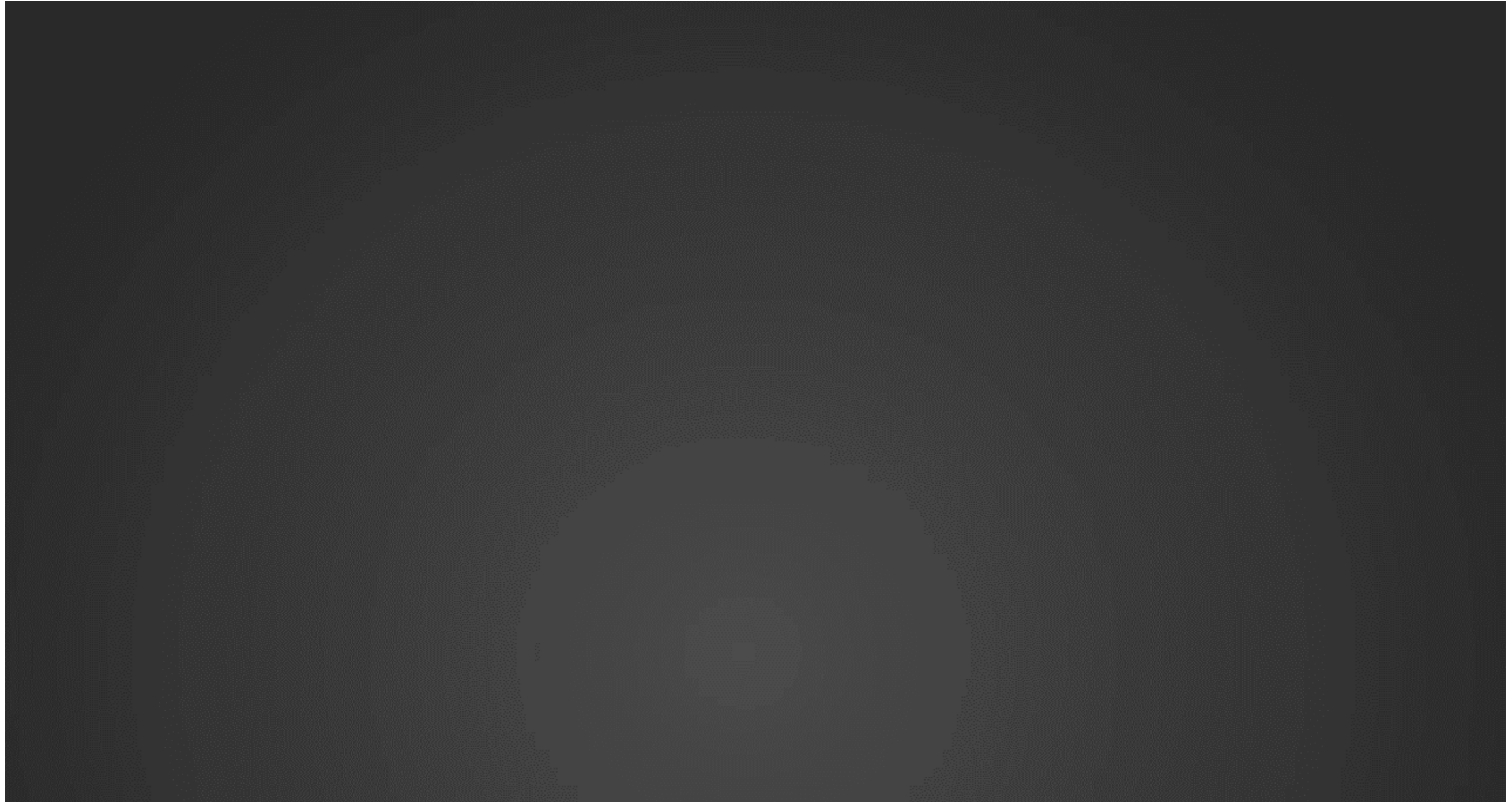


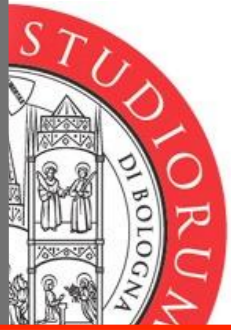
**Figura 26.8. Resistenza unitaria al rotolamento in funzione della velocità per varie pressioni di gonfiaggio.**



# Resistenze al rotolamento

---





# Resistenze al rotolamento

## ☑ Coefficiente di attrito volvente

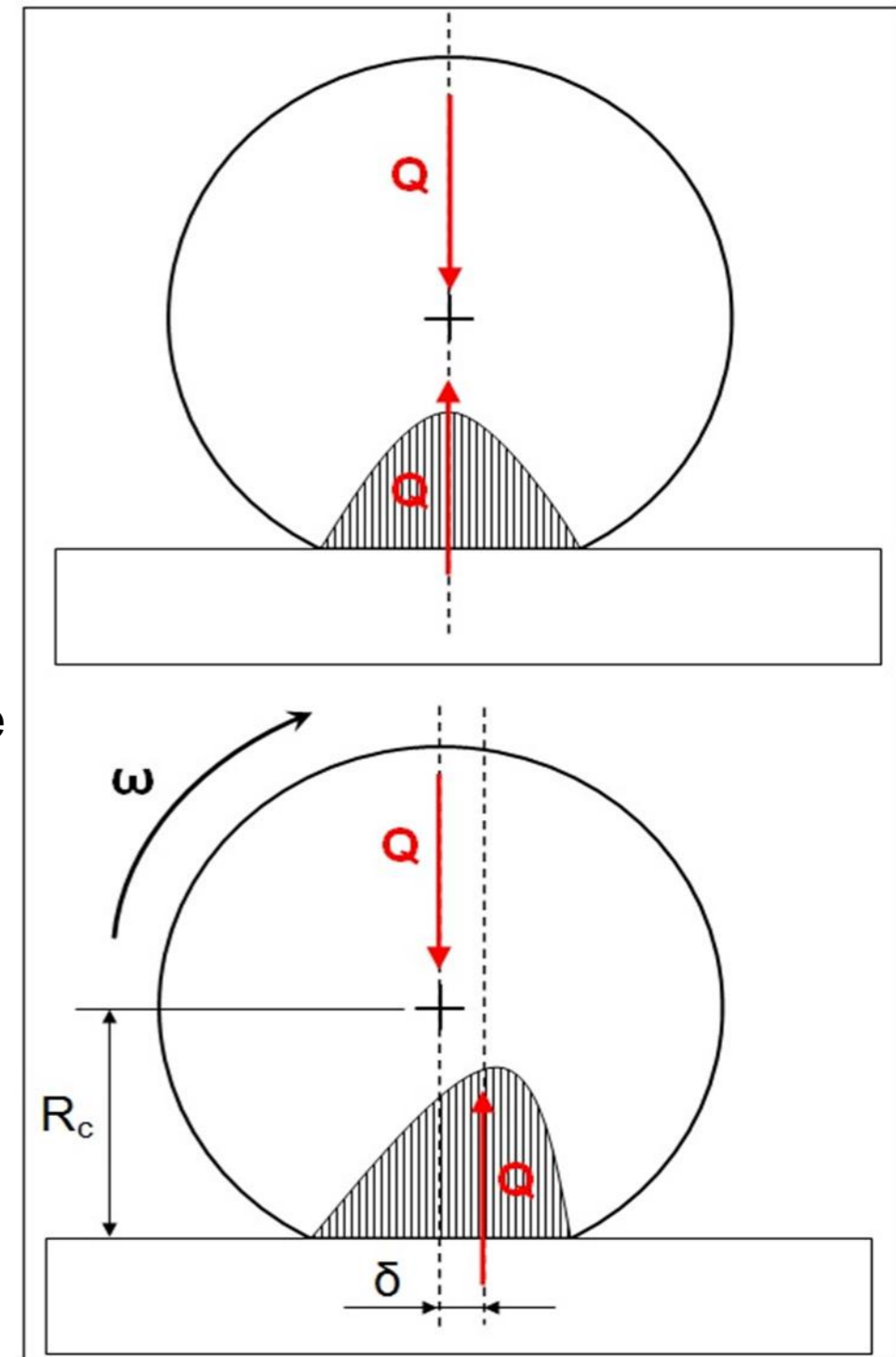
Coppia antagonista al moto di rotolamento, pari al valore del carico gravante sulla ruota per detto parametro

## ☑ Variabili di resistenza al rotolamento

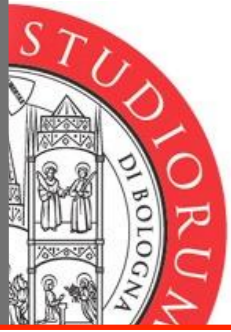
- ☆ La massa del veicolo gravante su ciascuna ruota
- ☆ La natura dei materiali a contatto, sia per le loro caratteristiche di elasticità che di qualità superficiale
- ☆ La velocità di rotazione per la ruota

☑ Si definisce **coefficiente d'attrito volvente** il rapporto tra *delta* ed il raggio della ruota

$$f = \delta / R_c$$



$R_c = \text{raggio}$



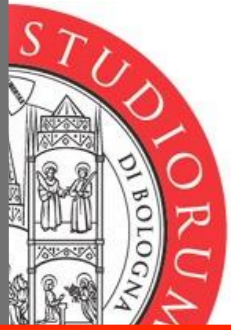
# Resistenze al rotolamento

---

L'attrito volvente è nullo quando:

- La strada e la ruota sono perfettamente rigidi
- La strada e la ruota sono perfettamente elastici

Naturalmente non esistono corpi perfettamente rigidi o perfettamente elastici.



# Resistenze al rotolamento

La resistenza al rotolamento  $F_r$  è direttamente proporzionale al carico verticale  $Q$  secondo il termine  $f$ , detto coefficiente di rotolamento. Per vincere tale resistenza posso applicare una coppia motrice (ruota motrice) o spingere la ruota con una forza orizzontale (ruota libera condotta)

$$C_r = Q \cdot \delta$$



$$F_r \cdot R_c = Q \cdot \delta$$



$$F_r = \frac{\delta}{R_c} \cdot Q$$



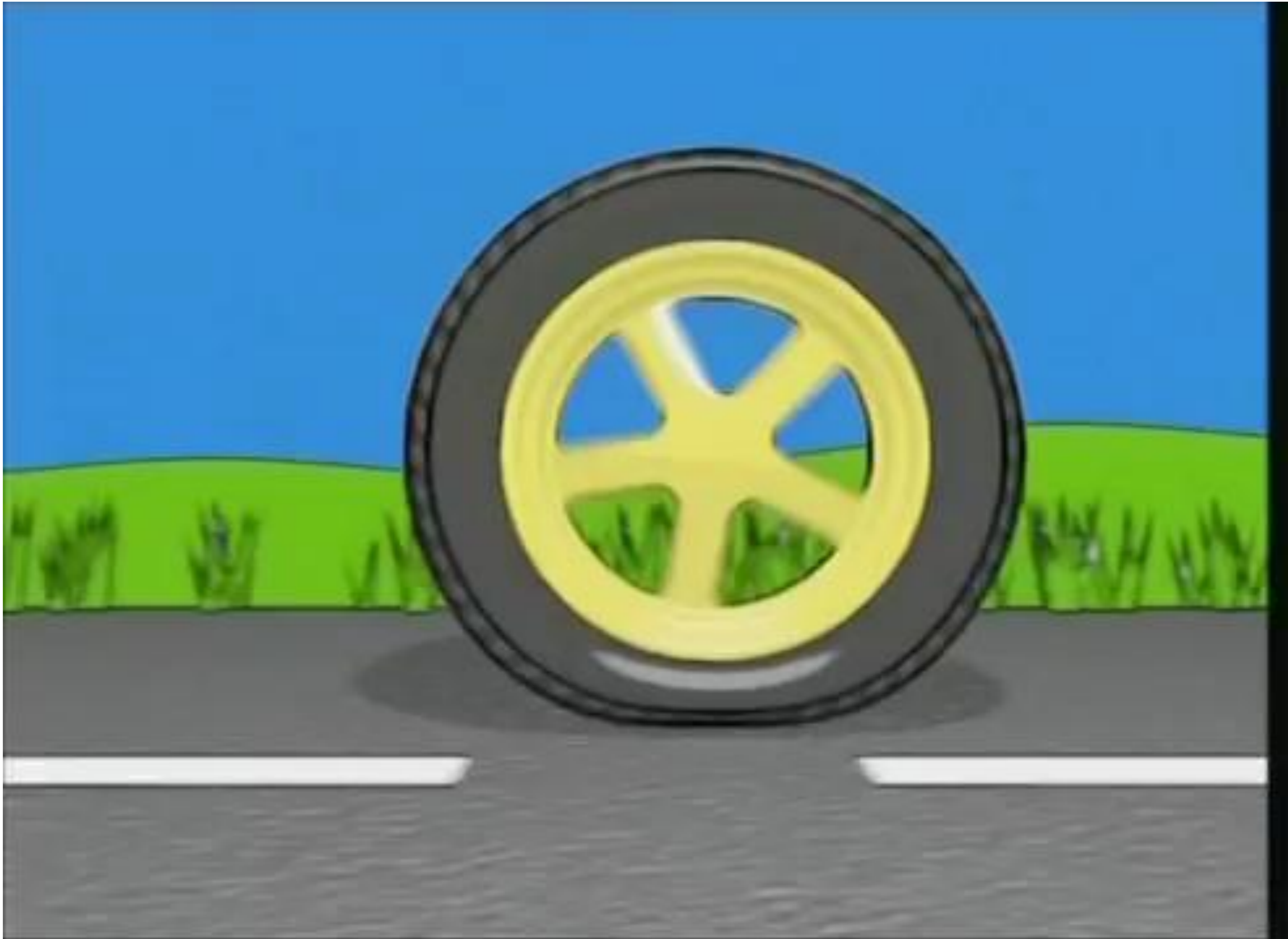
$$F_r = f \cdot Q$$

La coppia resistente  $C_r$  è equivalente ad una forza orizzontale  $F_r$  agente sul centro ruota moltiplicata per il raggio sotto carico  $R_c$

$F_r$  è la resistenza di rotolamento, mentre  $f$  è il coefficiente di rotolamento.



# Resistenze al rotolamento





# Resistenze al rotolamento

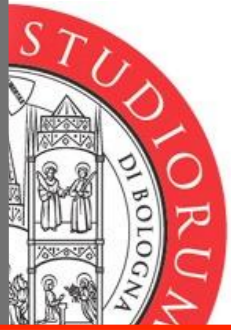
---

- ✓ Forza d'attrito è direttamente proporzionale alla forza premente, ha direzione parallela alle facce di contatto e verso tale da ostacolare il movimento

$$F_{\text{attrito}} = k \times F_{\text{premente}}$$

k= coefficiente d'attrito

k non dipende dalla estensione della superficie



# Resistenze al rotolamento

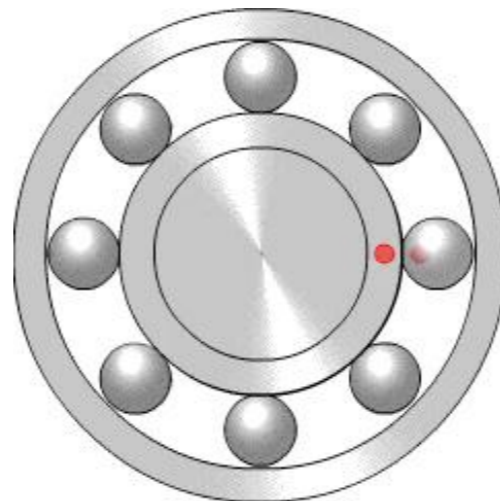
Si parla di:

- ✓ Attrito volvente quando un corpo rotola sull'altro
- ✓ Attrito radente se vi è strisciamento

L'attrito radente è sempre maggiore dell'attrito volvente, da cui il successo dell'invenzione della ruota

$$k_{\text{attrito radente}} > k_{\text{attrito volvente}}$$

Attrito radente

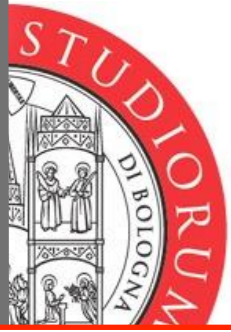


Attrito volvente

# Come si produce un cuscinetto a sfera

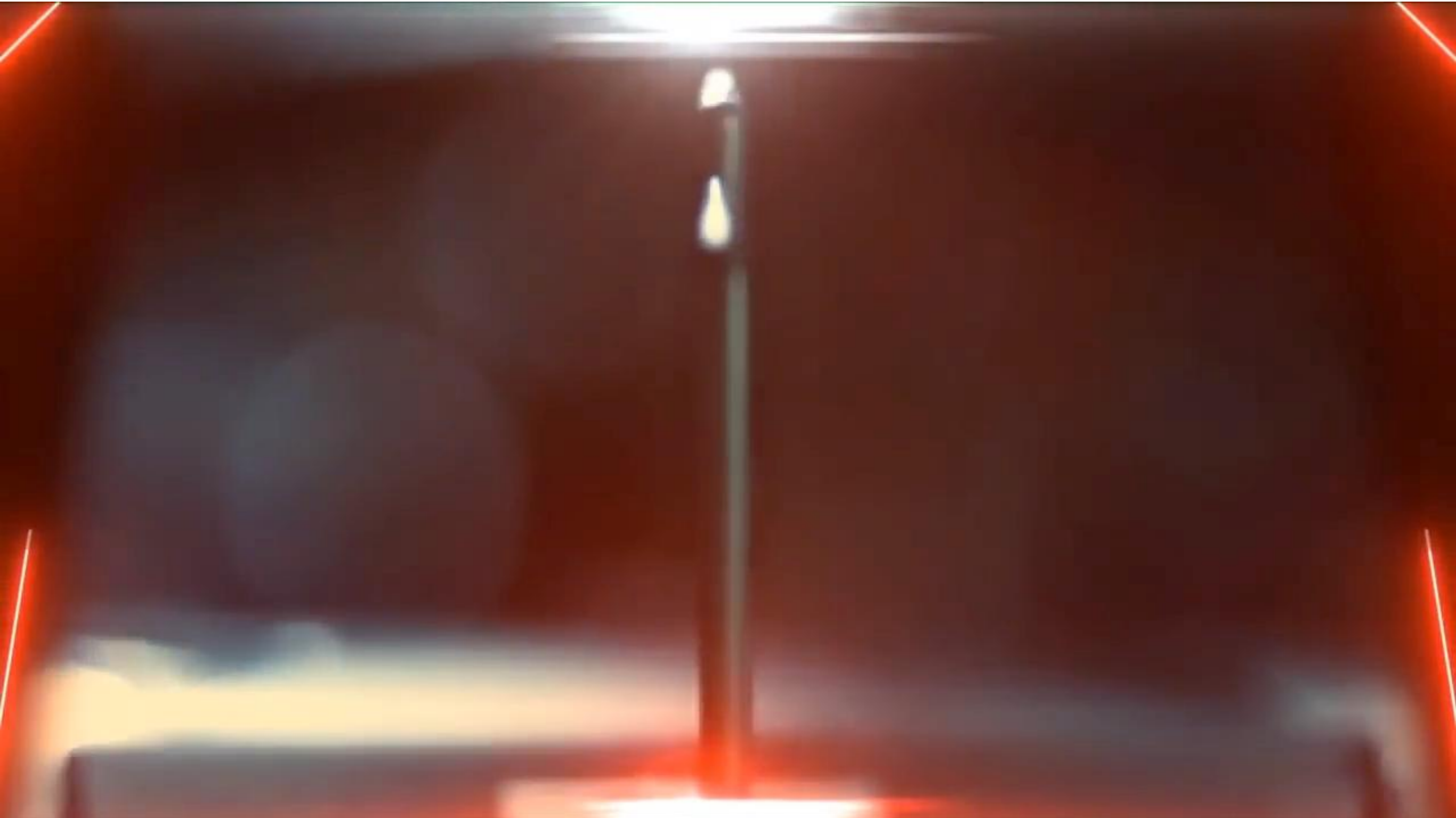






# Inizio lezione

---

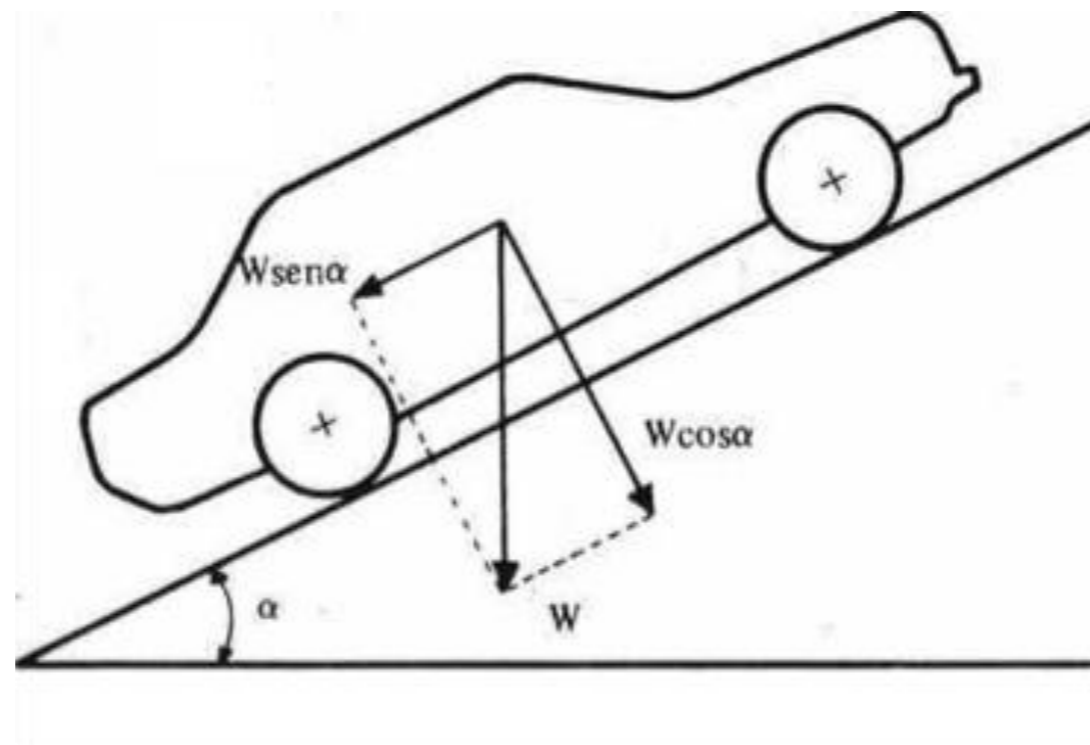


# Resistenze dovute alla strada

Per quanto riguarda i veicoli da noi trattati le resistenze dovute alla sede stradale sono dovute alla pendenza e alla curvatura del percorso.

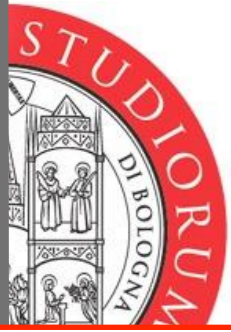
Pendenza del percorso (conservativa):

Come per un piano inclinato della meccanica classica, parte della massa del veicolo è artefice di una forza sul piano del moto, tramite il campo gravitazionale.



$$R_p = Mg \cdot \sin \alpha \approx Mg \cdot \tan \alpha = Mg \cdot \frac{H}{l} = Mg \cdot i / 1000$$

dove  $i$  è la pendenza della sede espressa usualmente in metri/chilometri (“per mille”).



# Resistenze dovute alla strada

Nel caso delle curve è di tipo dissipativo (non conservativo):  
dipende dal sistema sterzante, dal dislocamento del fluido,  
dall'inerzia del veicolo

$$r_{curva} = \text{costante} \cdot \frac{f_r \cdot l}{R} = 1 \div 2 \text{ N/kN}$$

Dove,  $f_r$  è il coefficiente di attrito radente,  $l$  è la lunghezza dell'ombra di contatto ed  $R$  è il raggio della curva. Nel caso stradale questo contributo incide poco rispetto alla resistenza al rotolamento, nel caso ferroviario tale contributo è rilevante.

# Resistenza aerodinamica

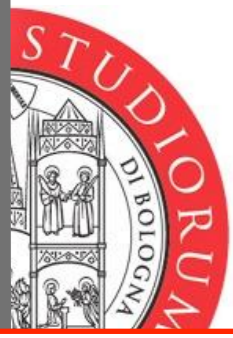
- ✓ La forza che si oppone all'avanzamento dei veicoli (su strada pianeggiante rettilinea) è la **somma della resistenza aerodinamica e di quella di rotolamento del pneumatico**
- ✓ Le forze resistenti originate dall'aria agiscono sulla vettura in due direzioni diverse: frontalmente e verticalmente. La prima si oppone all'avanzamento, la seconda (portanza) tenta di sollevare il veicolo da terra
- ✓ Vista la diversità delle forme tra il profilo della zona anteriore e di quella posteriore, le spinte verticali non coincidono mai sui due assi e la  $F_z$  (portanza totale) viene suddivisa tra avantreno e retrotreno.
- ✓ Si possono calcolare moltiplicando i fattori di forma ( $C_x$  e  $C_z$ ) per l'area delle rispettive sezioni



# Resistenza aerodinamica

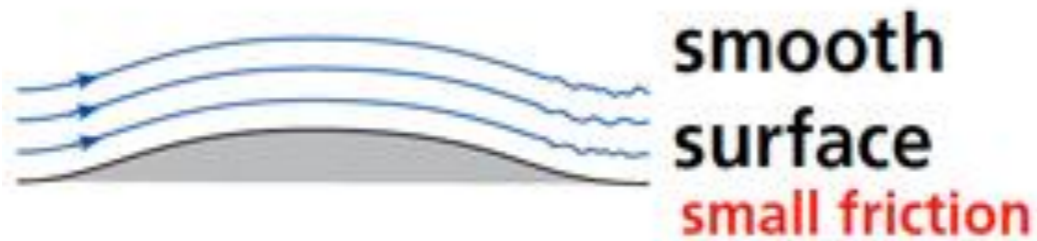
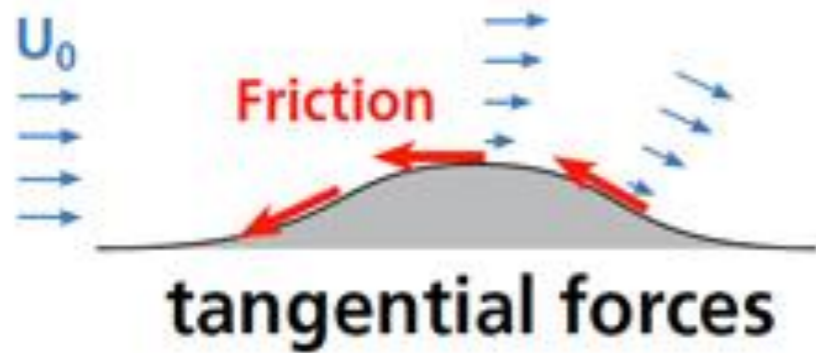
- Superficie liscia migliora l'efficienza aerodinamica.
- Al crescere della distanza dalla superficie del corpo l'aria aumenta di velocità. Idealmente a **contatto** con il **corpo l'aria è ferma**.



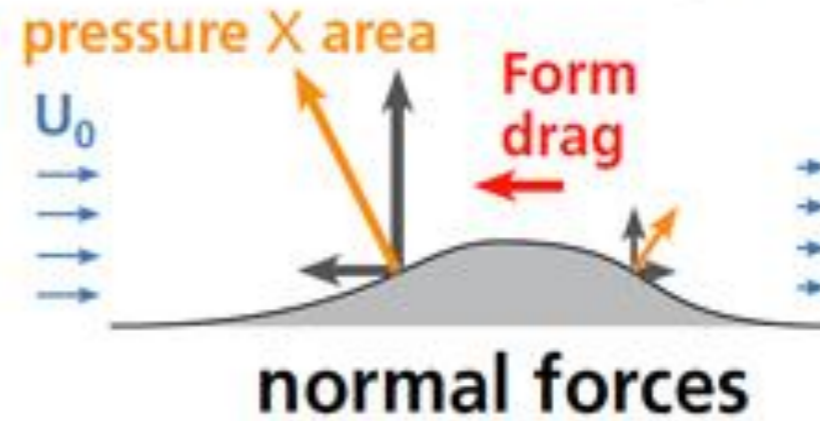


# Resistenza aerodinamica

## Frictional drag:



## Form drag:





# Resistenza aerodinamica Cx

**C<sub>x</sub>** è un numero che esprime la resistenza aerodinamica di una forma senza considerare la superficie. Più è basso, migliore è la **penetrazione aerodinamica**, ovvero minore è la resistenza opposta all'aria, a parità di superficie.

Moltiplicato per la superficie trasversale dell'auto permette di confrontare realisticamente la resistenza aerodinamica dei vari modelli

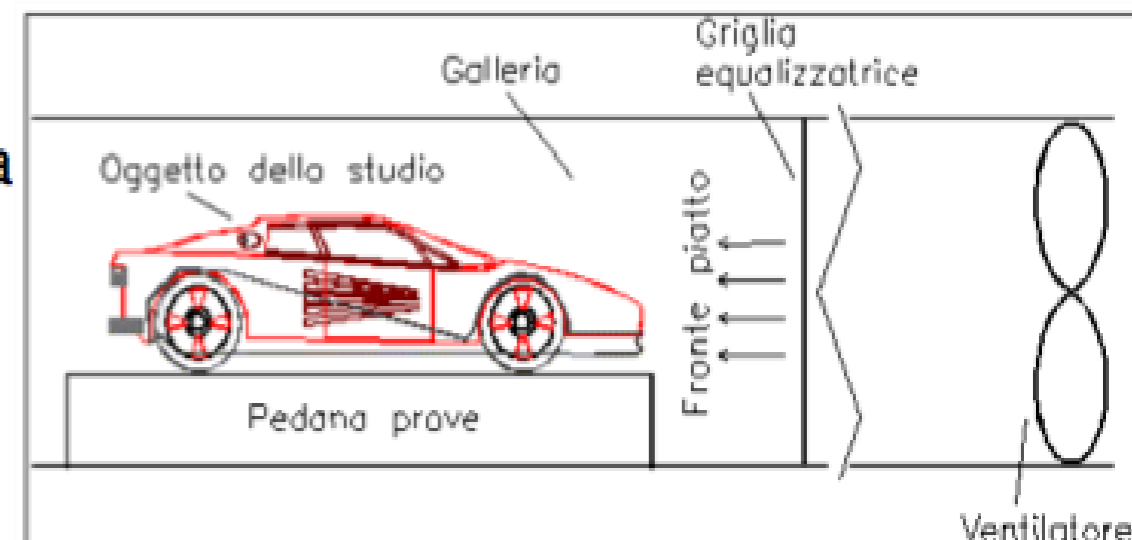
$$R_a = \frac{1}{2} \delta S v^2 C_x$$

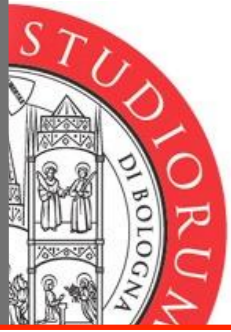
con  $\delta$  densità dell'aria ( $\sim 1.22 \text{ kg}_m/\text{m}^3$ )

**S**: superficie della sezione frontale della vettura










**v**: velocità del baricentro

**C<sub>x</sub>**: coefficiente aerodinamico complessivo della vettura



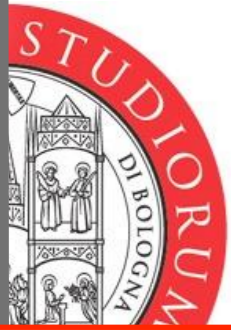


# Resistenza aerodinamica Cx

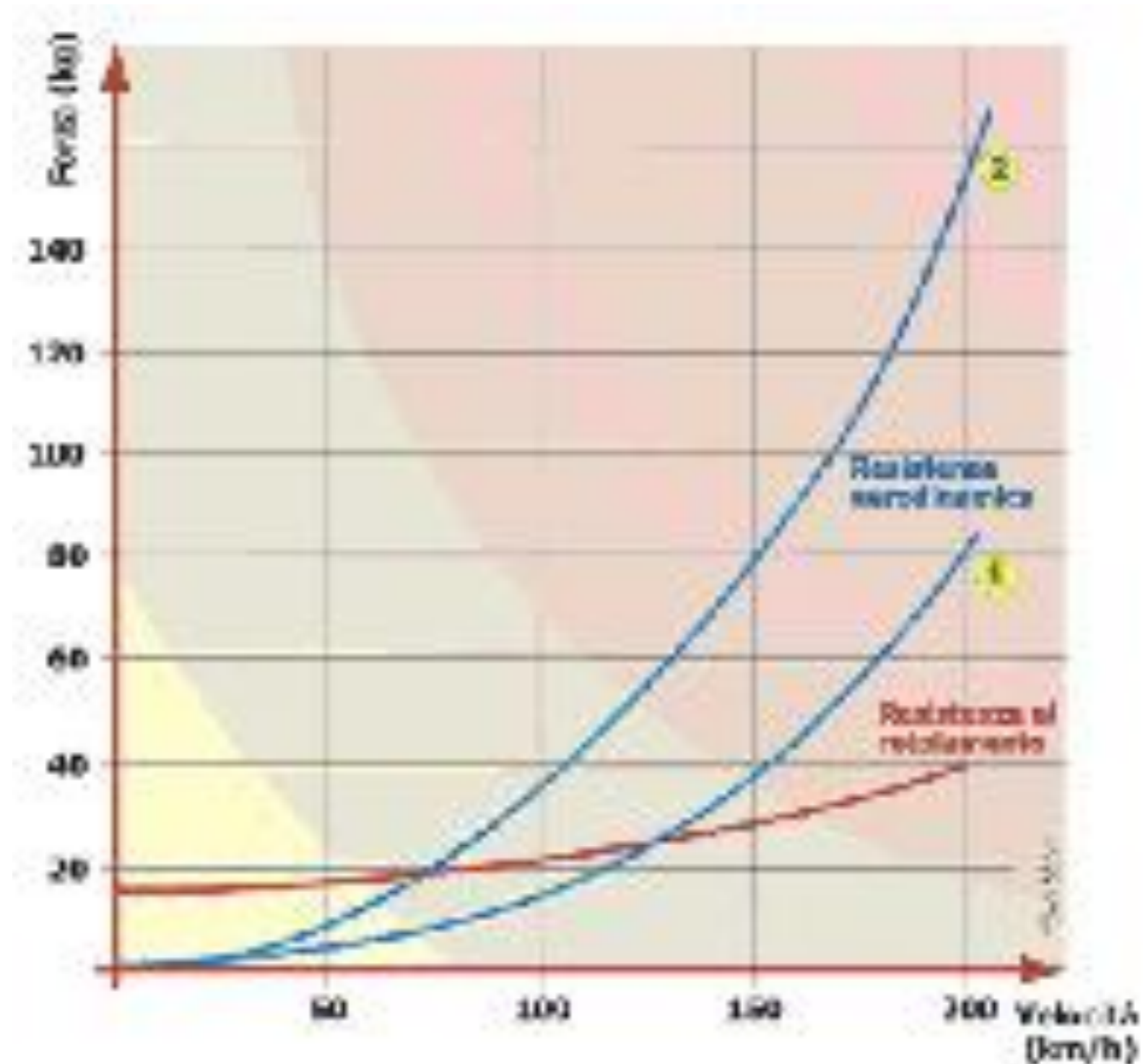
Forma		Coefficiente di resistenza
Sfera	→ 	0.47
Semi-sfera	→ 	0.42
Cono	→ 	0.50
Cubo	→ 	1.05
Cubo inclinato	→ 	0.80
Cilindro lungo	→ 	0.82
Cilindro corto	→ 	1.15
Corpo affusolato	→ 	0.04
Semi-corpo affusolato	→ 	0.09



Misure di coefficienti di resistenza



# Resistenza aerodinamica Cx

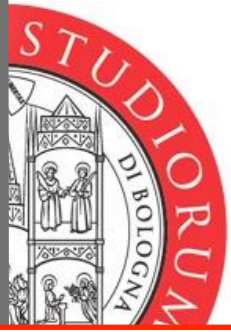


Rossa= Resistenza rotolamento

Blu1= R. aerodinamica con veicolo  $C_x=0,34$

Blu2= R. aerodinamica con veicolo  $C_x=0,44$

**Una Formula1 ?**

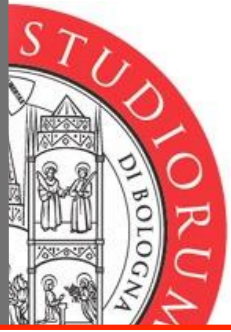


# Resistenza aerodinamica Cz

Il principio di funzionamento delle ali può essere ricondotto al teorema di Bernoulli per la fluidodinamica, secondo il quale lungo una linea di flusso **la pressione è inversamente proporzionale al quadrato della velocità**. Nella figura in basso a sinistra sono indicati due profili, uno curvilineo ed uno piano. Facendo scorrere un fluido su queste superfici si nota come la linea di fluido che scorre sul profilo superiore debba percorrere più strada, nello stesso tempo, rispetto al profilo inferiore. L'aria è quindi più veloce sopra l'ala ed in questo punto risulta minore la pressione. Questa differenza di pressione fa sì che l'ala subisca una spinta verso l'alto detta PORTANZA (freccia verticale blu) mentre la freccia orizzontale indica la resistenza all'avanzamento. Rovesciando il profilo (come si realizza in F1) si ottiene DEPORTANZA. Inclinando il profilo aumenta la depressione ed aumenta di conseguenza la deportanza, ma aumenta anche il freno dell'aria (la sezione frontale è maggiore)

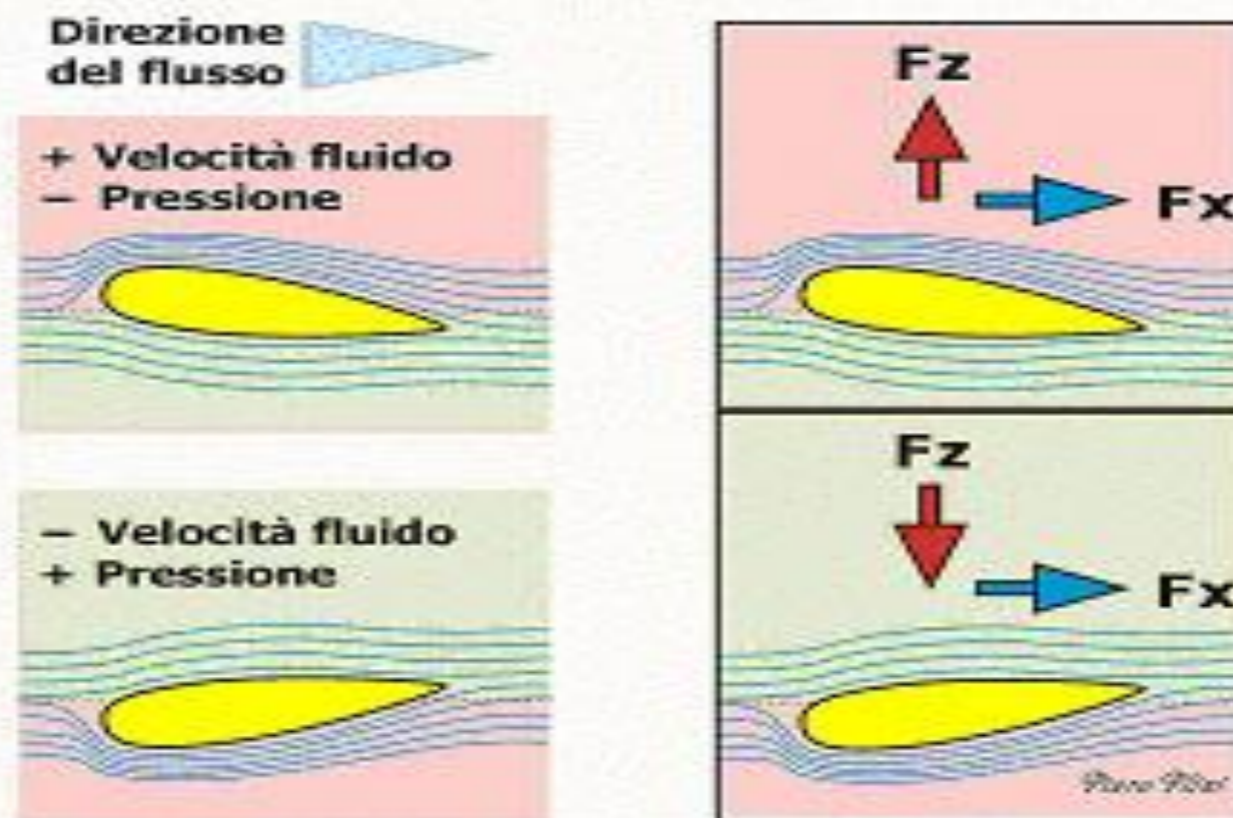
Maggiore velocità = minore pressione

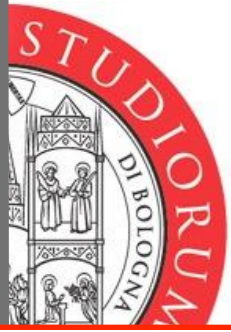




# Resistenza aerodinamica

La Figura mostra come, **inclinando il corpo in basso nasce una Forza ( $F_z$ ) perché è stato modificato il coefficiente di forma  $C_z$** . L'ala inclinata obbliga la vena fluida che scorre superiormente a compiere un percorso più lungo rispetto a quella inferiore, prima di ricongiungersi con essa. Affinché ciò avvenga, l'aria sovrastante deve muoversi più velocemente di quella sotto, **compie orizzontalmente la stessa distanza nello stesso tempo ma il tragitto effettivo è più lungo**. Per il noto effetto Venturi se cresce la velocità diminuisce la pressione, si nota che la pressione sopra all'ala risulta inferiore a quella sottostante, dando vita alla Forza verso l'alto  $F_z$  definita "**portanza**". La figura illustra anche il caso opposto, in cui la spinta  $F_z$  è rivolta verso il basso (portanza negativa o **deportanza**), come quella generata dagli alettoni di una monoposto di Formula 1.

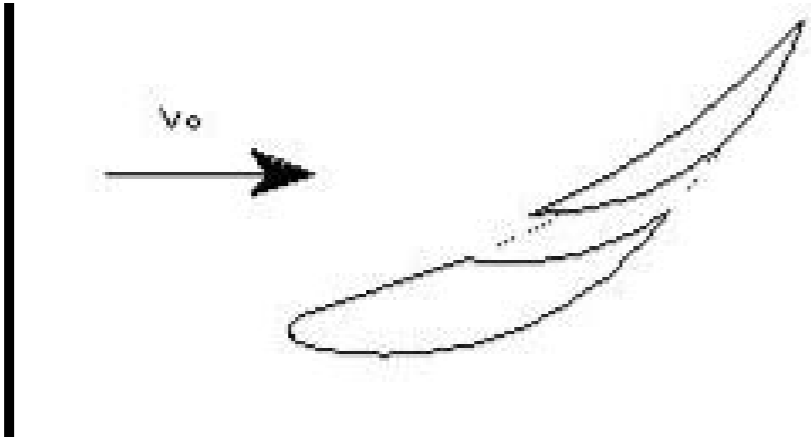




# L'AERODINAMICA

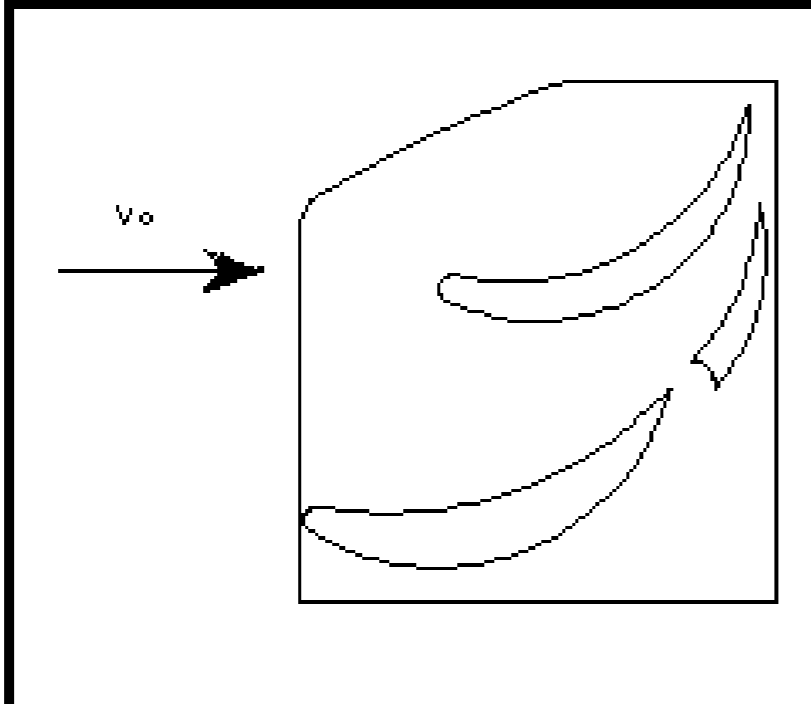


# Deportanza: le ali



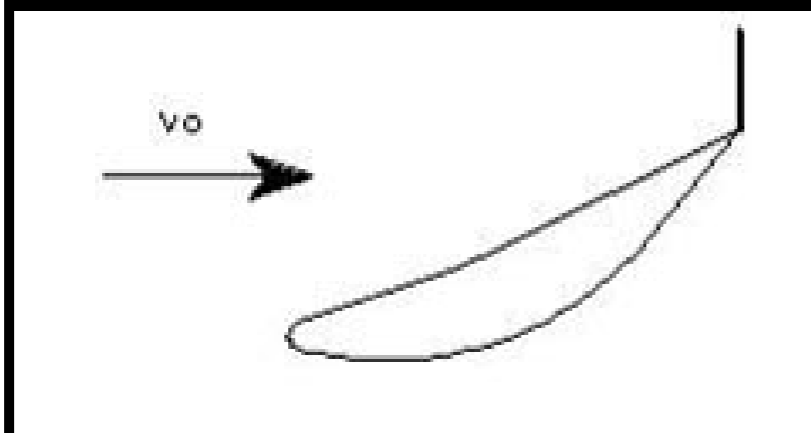
## **Ala a flap multipli**

E' una derivazione e perfezionamento del flap Fowler, che inizialmente era singolo. Si possono superare valori CZ dell'ordine 3



## **Schiera dei profili**

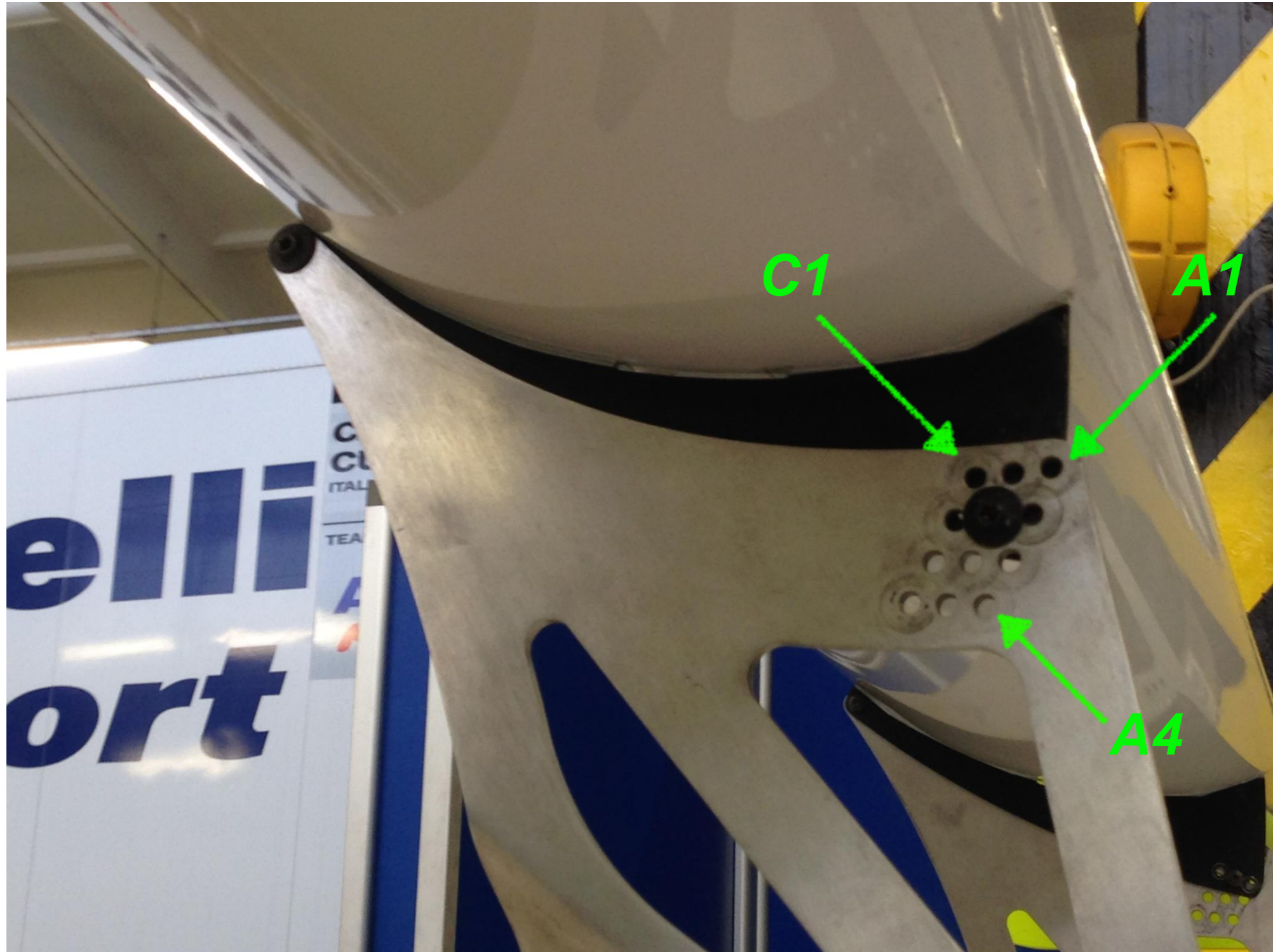
Il principio è ampiamente applicato sulle vetture da competizione: alettoni "biplani", triplani ecc. ciascuna ala può essere a sua volta del tipo a fenditura oppure a flap multipli.

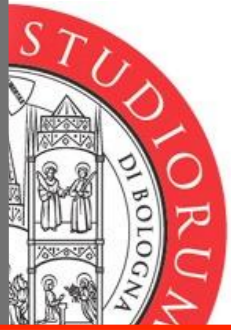


## **Aletta Nolder**

Si tratta di un a breve e sottile bandella, posta al bordo di uscita in posizione circa perpendicolare al flusso. E' un piccolo flap posto alla sua massima inclinazione. Permette di ottenere sensibili incrementi di CZ quando le ali hanno dimensioni limitate.

# Il set-up delle ali

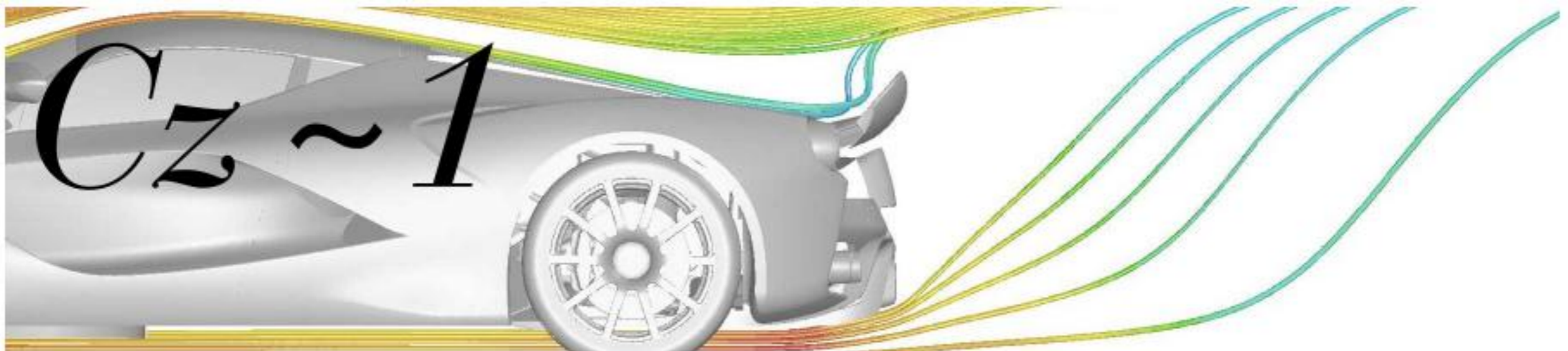




# Resistenza aerodinamica $C_z$

Una vettura trae **vantaggio** aerodinamico della **deportanza** principalmente **in curva** dove le forze di inerzia che causano le forze centrifughe tendono a renderne instabile sia la traiettoria sia l'aderenza, dunque un aumento del peso totale della vettura riesce a tenerla più aderente e schiacciata al suolo. Il vantaggio è anche in termini di stabilità in rettilineo: senza un alettone posteriore la vettura rischierebbe di decollare. Tuttavia lo svantaggio più comune è che più si aumenta l'incidenza degli alettoni, più **aumenta la forza di resistenza aerodinamica con diminuzione delle velocità di punta** nei tratti in rettilineo. È per questo che si adottano generalmente soluzioni di maggiore o minore compromesso (*trade-off*) in funzione delle caratteristiche del tracciato.

A 250 km/h '**LaFerrari**' assicurerà una deportanza di oltre 500 kg



# Resistenza aerodinamica $C_z$

La deportanza è proporzionale alla velocità, più precisamente alla velocità relativa tra la macchina e l'aria. Quindi, a bassa velocità, la deportanza è trascurabile. Questo va ricordato quando si impostano le regolazioni per le curve lente: la deportanza non avrà molto effetto. Ad alta velocità, invece, la deportanza è in molti casi dominante rispetto alle regolazioni meccaniche.



Monte Carlo



Monza

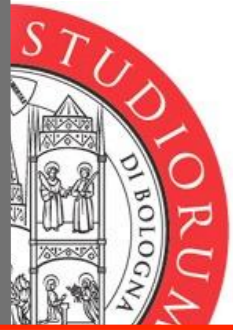


# Aerodinamica Ferrari 458

ferrari.com



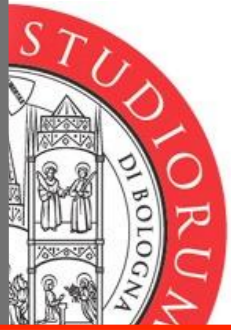
**AERODINAMICA ATTIVA**



# Ferrari SF90 - Mercedes F1W10

---





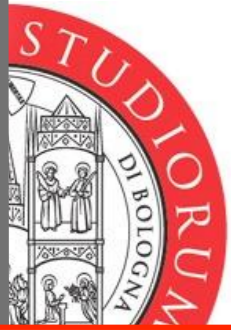
# ESERCIZIO

---

Si consideri il monopattino Xiaomi M365 Pro caratterizzato da:

- Peso  $P = 14,2 \text{ kg}$
- Velocità massima da progetto in piano  $v_{max} = 25 \text{ km/h} = 6,94 \text{ m/s}$
- Superficie frontale maestra  $S = 2,88 \text{ m}^2$
- Pneumatici con camera d'aria
- Coefficiente  $C_x = 0,9$
- Rendimento meccanico della trasmissione  $\eta = 0,95$
- Accelerazione di gravità  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Calcolare le resistenze al moto e la potenza all'albero motore.



# SOLUZIONE

Resistenza unitaria al rotolamento:  $r_r = r + k \times v^2 = 18 \frac{N}{KN} + 5 \times 10^{-4} \times 25^2 \frac{km}{h} = 18,31 \frac{N}{KN}$ ;

Resistenza al rotolamento:  $R_r = \frac{m \times g}{1000} [KN] \times r_r$

$$= \frac{84,2 \text{ Kg} \times 9,81 \frac{m}{s^2}}{1000} \times 18,31 \frac{N}{KN} = 0,83 \text{ KN} \times 18,31 \frac{N}{KN} = \mathbf{15,2 \text{ N}}$$

Resistenza aerodinamica:  $R_a = \frac{1}{2} \times \delta \times S \times v^2 \times C_x$

$$R_a = \frac{1}{2} \times 1,225 \frac{Kg}{m^3} \times 0,85 \text{ m}^2 \times 6,944^2 \frac{m}{s} \times 0,9 = \mathbf{22,6 \text{ N}}$$

Resistenza totale è:  $R_{tot} = R_a + R_r = 22,6 \text{ N} + 15,2 \text{ N} = 37,8 \text{ N}$

Si calcola la potenza necessaria alle ruote, per far muovere il veicolo in un piano con  $i = 0 \%$

$$N_{RUOTE} = R_{tot} \times v = 37,8 \text{ N} \times 6,944 \frac{m}{s} = 262,5 \text{ W}$$

$$N_{MOTORE} = \frac{N_{RUOTE}}{\eta} = \frac{262,5}{0,95} = \mathbf{276 \text{ W}}$$



# Resistenze al moto



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Prof. Ing. Mattia Strangi

Università degli Studi di Bologna

Dipartimento DICAM – Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali – [www.dicam.unibo.it](http://www.dicam.unibo.it)

e-mail [mattia.strangi@unibo.it](mailto:mattia.strangi@unibo.it)

Ricevimento dopo le lezioni.