



## Azioni aerodinamiche

Per esprimere la generica forza  $F$  e il generico momento aerodinamico  $M$  in modo semplice si ricorre alle espressioni

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_f$$

$$M = \frac{1}{2} \rho v^2 S l C_m$$

si suppone cioè che essi siano proporzionali alla pressione dinamica della corrente indisturbata  $\frac{1}{2} \rho v^2$ , a una superficie di riferimento  $S$  (nell'espressione del momento compare anche una lunghezza  $l$ ) e a un coefficiente adimensionale da determinare sperimentalmente.

Con i metodi dell'analisi dimensionale si può dimostrare che i coefficienti che compaiono nelle due formule sono funzione, oltre che della forma del corpo e della sua posizione relativa alla direzione della corrente, solamente di due parametri adimensionali: il numero di Reynolds e l'indice di Mach.

Il numero di Reynolds è definito come

$$R_e = \frac{\rho v L}{\mu}$$

ove  $\rho$  e  $\mu$  sono rispettivamente la densità e la viscosità dinamica del fluido. Per i veicoli si sceglie in generale come lunghezza caratteristica  $L$  la lunghezza della vettura.

La dipendenza dei coefficienti aerodinamici dal numero di Reynolds non è grande se il valore di quest'ultimo è sufficientemente elevato.

I coefficienti aerodinamici ricavati sperimentalmente sono da ritenersi costanti se il numero di Reynolds è superiore ad alcuni milioni.

L'indice di Mach, già definito, non ha alcun interesse nel campo dei veicoli se si escludono alcune vetture da record di velocità assoluto.





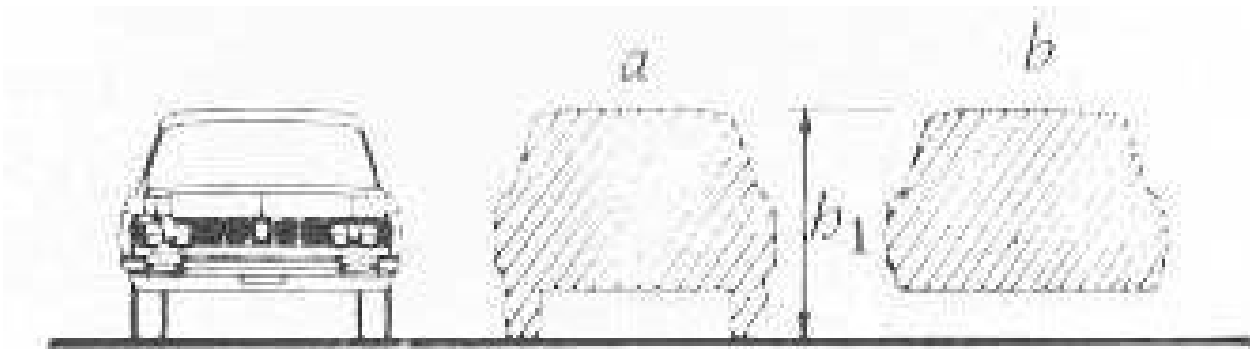
$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_f$$

$$M = \frac{1}{2} \rho v^2 S l C_m$$

La superficie  $S$  e la lunghezza  $l$  di riferimento possono essere qualsiasi: esse esprimono solamente la dipendenza delle forze e dei momenti rispettivamente dal quadrato e dal cubo delle dimensioni lineari del corpo.

E' però evidente che il valore dei coefficienti aerodinamici dipende dalla scelta della superficie e della lunghezza di riferimento.

In campo automobilistico si usa scegliere quale superficie di riferimento l'area della superficie trasversale del veicolo, anche se una certa confusione può essere ingenerata dal fatto che taluni usano l'area della proiezione frontale  $a$ ) e altri l'area della massima sezione trasversale  $b$ ).



La lunghezza di riferimento  $l$  è in generale il passo anche se alcuni si riferiscono alla carreggiata





Nella tecnica automobilistica la forza aerodinamica viene scomposta secondo gli assi del corpo e le due componenti  $F_x$  e  $F_z$ , dirette, rispettivamente, longitudinalmente e verticalmente alla vettura prendono impropriamente il nome di resistenza e portanza.

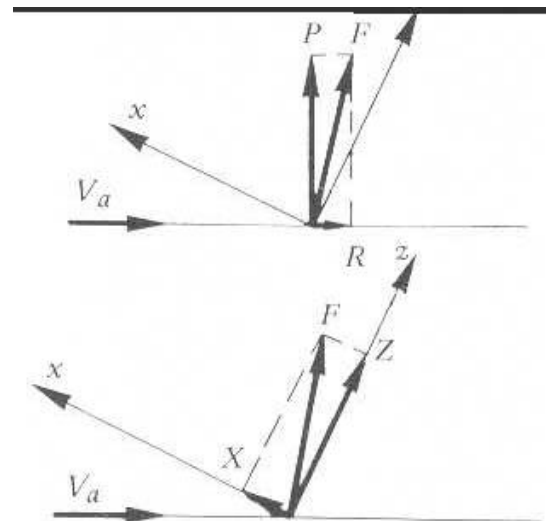
$$F_x = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_x$$

$$F_z = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_z$$

e sono analoghe alla forza di drag e lift.

Propriamente la forza di resistenza aerodinamica è la forza diretta secondo la velocità relativa  $V_a$  ed è quindi la forza che si oppone al moto del corpo nel fluido.

Nel caso in cui la velocità relativa sia contenuta nel piano di simmetria del veicolo (marcia con deriva nulla e senza vento laterale) la differenza tra la resistenza aerodinamica  $R$  e la  $F_x$  è molto piccola. Ciò è dovuto al fatto che l'angolo tra l'asse  $x$  e il piano stradale è in genere nullo o molto piccolo e che il valore dell'efficienza aerodinamica, ossia del rapporto tra portanza e resistenza, è, nel caso degli autoveicoli, molto piccolo se non addirittura nullo.



Il sistema di riferimento aerodinamico definito dalla SAE (Society of Automotive Engineering) americana per le prove in galleria del vento.

$WB$  = passo

$PM$  = momento di beccheggio

$RM$  = momento di rollio

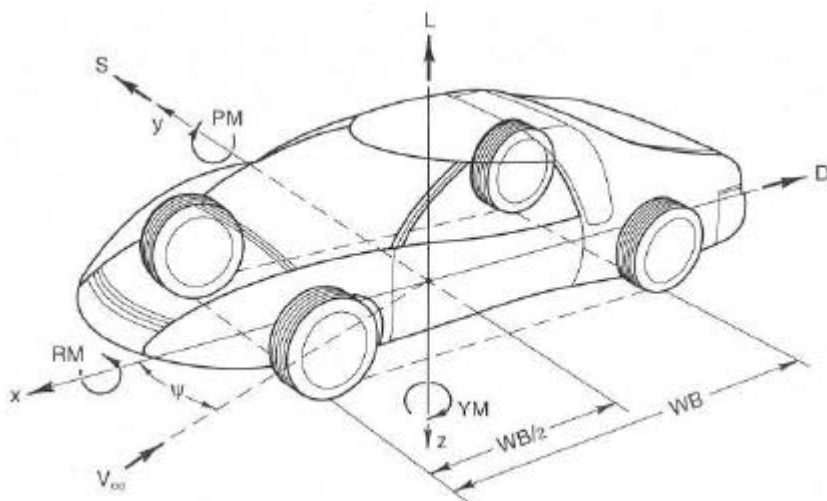
$YM$  = momento d'imbardata

$D$  = resistenza

$L$  = portanza

$S$  = spinta laterale

$V_\infty$  = corrente indisturbata

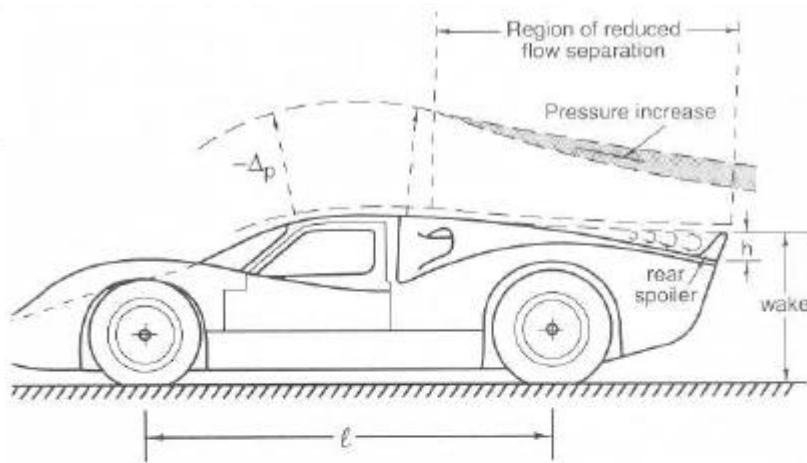




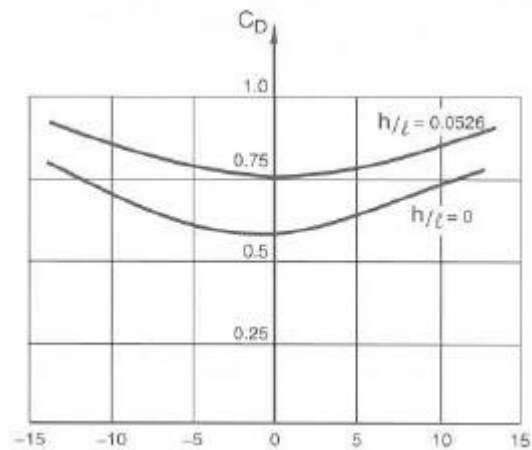
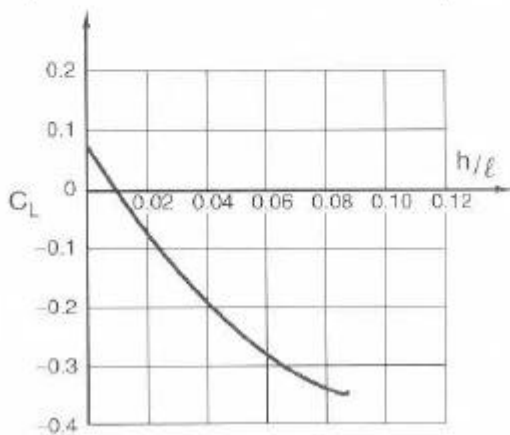
La resistenza aerodinamica di un veicolo può essere considerata la somma di tre contributi: resistenza di attrito, resistenza di forma e quella impropriamente chiamata resistenza indotta.

La resistenza d'attrito è praticamente impossibile da misurare su un corpo di forme complesse. Può essere misurata solo in piastre disposte parallelamente alla corrente in quanto su di esse è dovuta solo alla viscosità ed è relativamente facile calcolare il profilo di velocità nello strato limite e quindi le tensioni tangenziali agenti sulla piastra:

La resistenza indotta è quella indotta dalla portanza ed è fondamentale in aeronautica dove gioca un ruolo simile a quello della resistenza al rotolamento dei pneumatici: il lavoro in resistenza dovuto al sostentamento.



Resistenza indotta da uno spoiler su una vettura GT da competizione

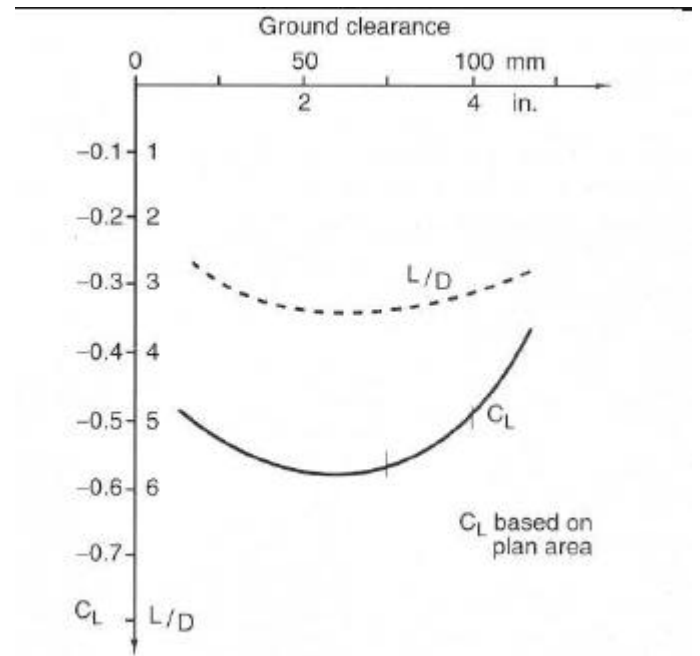
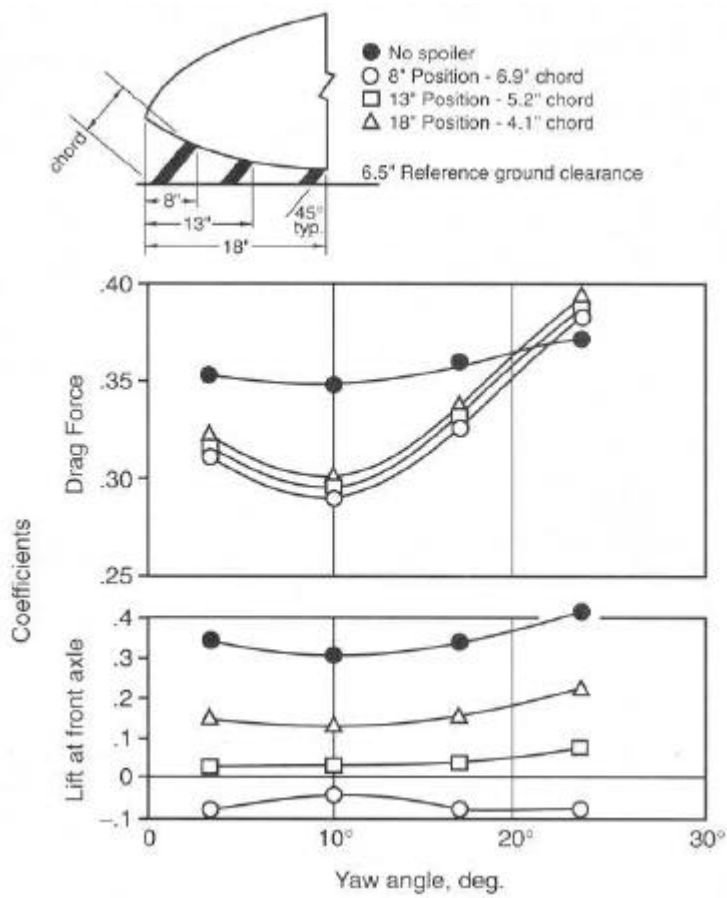


Angolo d'imbardata





### Non necessariamente la resistenza indotta è positiva



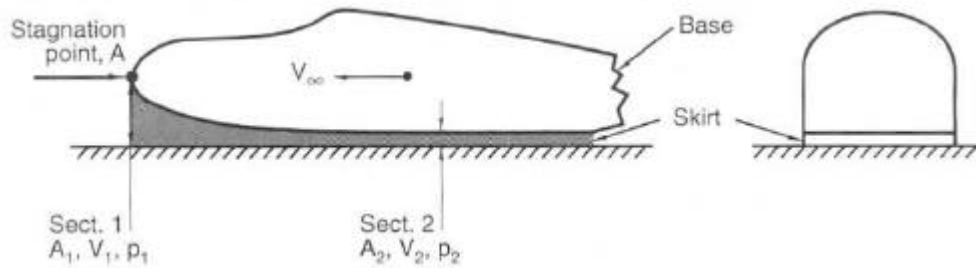
Caso vettura NASCAR americana

Caso effetto suolo con minigonne





## Effetto suolo



Per ipotesi si assuma che  $A$  sia un punto di ristagno, per cui la velocità  $V_1$  dell'aria nella sezione  $1$  sia pari a  $V_\infty$  e la sua pressione  $p_1$  sia quindi pari a  $p_\infty$ . Il fluido sia considerato incomprimibile e trascuriamo qualsiasi effetto di bordo (strato limite). Si supponga infine che le minigonne sigellino perfettamente il sottoscocca.

Scrivendo l'equazione di continuità tra le sezioni  $1$  e  $2$  avremo

$$\rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \Rightarrow V_2 = V_1 \frac{A_1}{A_2}$$

l'equazione di Bernoulli dice

$$p_\infty + \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

e quindi

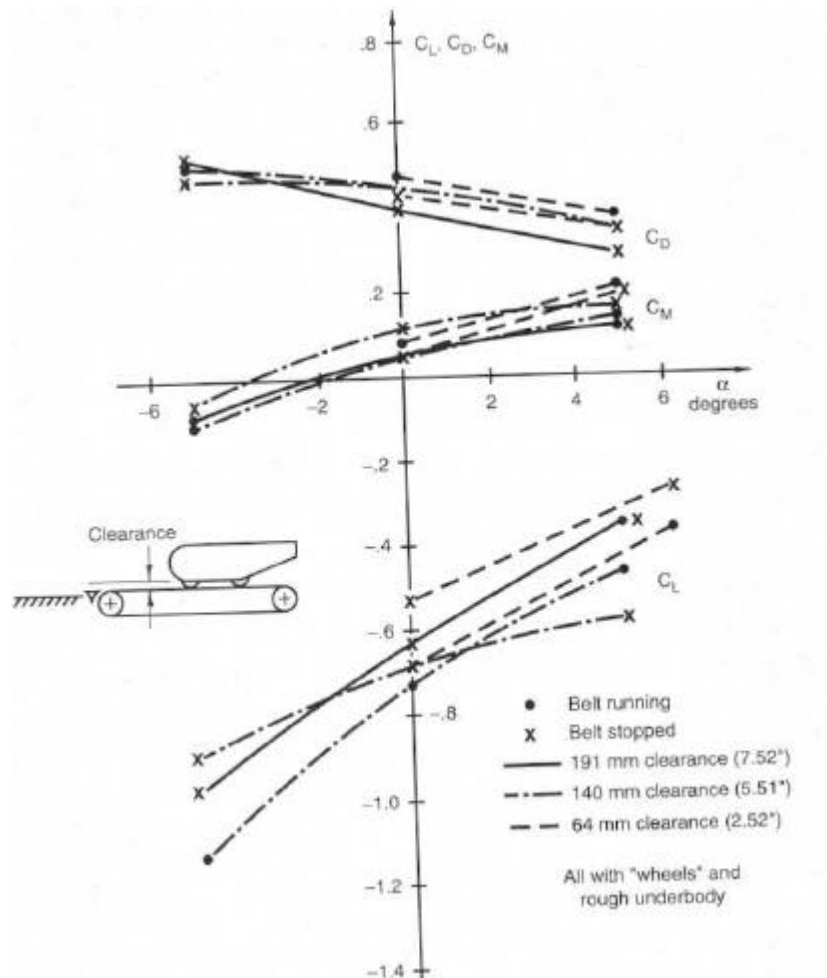
$$\Delta p = p_2 - p_\infty = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 - \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} = 1 - \frac{V_2^2}{V_\infty^2} = 1 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2$$





Ma i risultati risentono pesantemente delle condizioni di prova. Necessità di utilizzare un tappeto mobile



Da non dimenticare che prove sulla medesima vettura di formula (con ruote esposte alla corrente) in galleria hanno dato i seguenti risultati

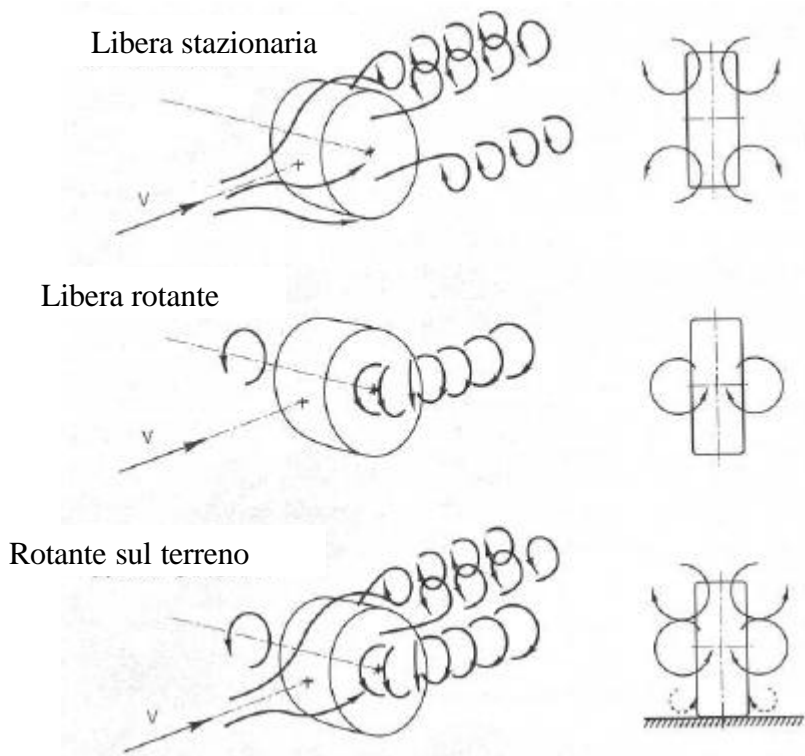
	Con ruote ferme	Con ruote in movimento
$C_L$	0,101	0,042
$C_D$	0,402	0,412
$C_M$ rispetto al baricentro	-0,062	-0,045

L'incremento di  $C_D$  spiega il perché si usino ruote a disco rispetto a quelle a raggi in quanto con esse i coefficienti aerodinamici variano molto meno tra la condizione a ruote ferme e quella con ruote in moto.





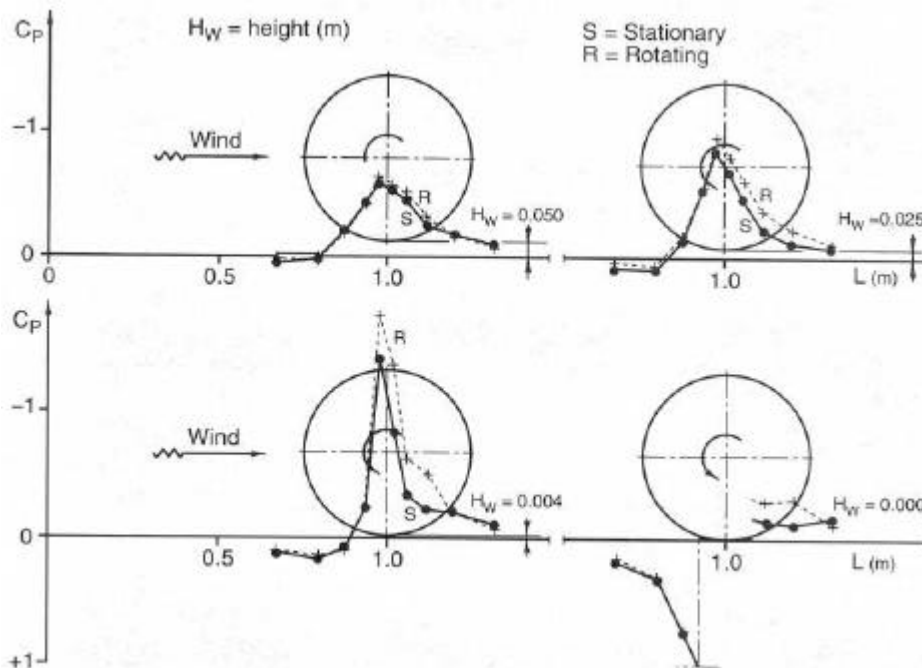
Questo fenomeno è dovuto anch'esso alla resistenza indotta e più in particolare all'effetto di scia



Possiamo quindi definire un coefficiente di pressione

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2}$$

dove il pedice  $\infty$  si riferisce come al solito alla corrente indisturbata mentre  $p$  è la pressione che si crea tra la ruota e il terreno per il solo effetto aerodinamico.



La conclusione interessante è che esiste una pressione negativa in tutti i casi in cui la ruota non tocca il terreno ed essa aumenta (ricordando Bernoulli) man mano che la ruota si avvicina al terreno.

Quando la ruota è posata sul terreno, nasce una pressione positiva che genera portanza sulla ruota indipendentemente dal fatto che giri o sia stazionaria. In scia si genera una depressione maggiore se la ruota gira.







Dal punto di vista meccanico hanno importanza le vibrazione indotte per distacco di vortici.

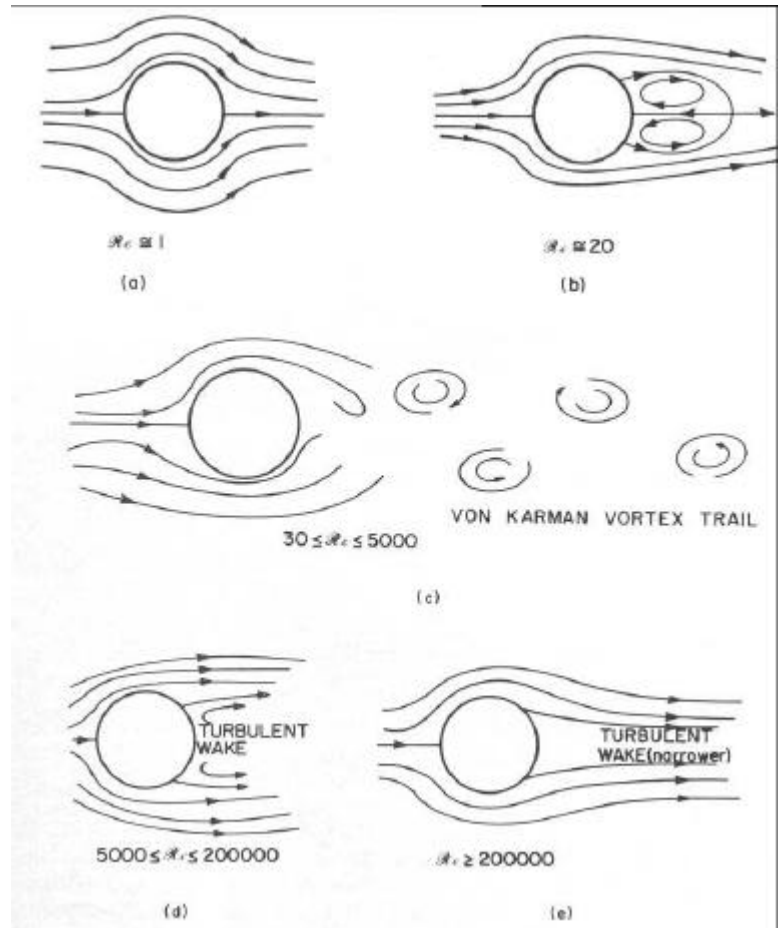
Se il corpo immerso nella corrente non è a profilo alare, lo strato limite si separa e il forte gradiente di velocità che si ha nello strato limite si diffonde a valle con formazioni di vortici.

La formazione di vortici a valle e il distacco della vena sono responsabili della formazione di una depressione sulla superficie posteriore del corpo stesso rispetto all'anteriore, con relativi alti valori del coefficiente  $C_D$ .

Strouhal si accorse per primo della pronunciata periodicità del fenomeno di distacco di vortici descrivendolo in termini di un coefficiente adimensionale detto coefficiente di Strouhal  $S$

$$S = \frac{fD}{v_\infty}$$

dove  $f$  è la frequenza di distacco di vortici e  $D$  è una dimensione caratteristica del corpo proiettata sul piano normale alla corrente.





Il coefficiente di Strouhal assume valori diversi per forme diverse del corpo investito

Wind	Profile dimensions, in mm	Value of $f$	Wind	Profile dimensions, in mm	Value of $f$
		0.120			0.147
		0.137			
		0.120			0.150
		0.144			0.145
					0.142
					0.147
		0.145			0.131
					0.134
					0.137
		0.140			0.121
		0.153			0.143
		0.145			0.135
		0.168			
		0.156			0.160
		0.145			
		0.200			0.114
					0.145

