

**Appunti di Costruzioni di Strade, Ferrovie e
Aeroporti**

RESISTENZE AL MOTO DEI VEICOLI STRADALI

Prima Edizione

Sandro Colagrande

Sandro Colagrande
Docente di ‘‘Costruzioni di Strade, Ferrovie e Aeroporti’’
c/o l’Università degli Studi dell’Aquila

ISBN 978-88-87182-89-7

I Edizione Ottobre 2024

Copyright © 2024 Libreria Universitaria Benedetti
Via Strinella 2D – 67100 L’Aquila
Tel. 0862 27400
Email: benedetti.libreria@gmail.com

Con il contributo di



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DELL’AQUILA



DICEAA
Dipartimento di Ingegneria
Civile, Edile-Architettura
e Ambientale

Ogni diritto è riservato. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta, memorizzata o trasmessa in alcun modo mediante fotocopie, registratori, ecc., senza il permesso scritto dell’Editore.

Appunti di Costruzioni di Strade, Ferrovie e Aeroporti

RESISTENZE AL MOTO DEI VEICOLI STRADALI

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. RESISTENZE ORDINARIE	1
1.1 Resistenza al rotolamento	1
1.2 Resistenza aerodinamica	3
1.2.1 Resistenza di forma	4
1.2.2 Resistenza tangenziale	5
2. RESISTENZE STRAORDINARIE	7
2.1 Resistenza dovuta alla pendenza	7
2.2 Resistenza in curva	8
2.3 Resistenza di inerzia	10
3. EQUAZIONE DELLA TRAZIONE	11
BIBLIOGRAFIA	13

RESISTENZE AL MOTO DEI VEICOLI STRADALI

INTRODUZIONE

Con la denominazione generica di resistenze al moto si intendono quelle forze che un veicolo deve vincere per muoversi e per spostare un eventuale convoglio da esso trainato.

Affinché il moto possa compiersi l'apparato motore, installato sul veicolo, deve essere capace di generare una forza, detta **sforzo di trazione**, capace di uguagliare, in ogni istante, le resistenze al moto.

Per poter paragonare queste resistenze tra di loro, si riferiscono al peso unitario; si parla in questo caso di resistenze specifiche e si esprimono in kg/t.

Le resistenze al moto si dividono principalmente in due categorie:

- **resistenze ordinarie**, sono quelle che si manifestano in piano e in rettilineo e sono fortemente influenzate dalla velocità.
- **resistenze straordinarie**, si manifestano per una variazione di pendenza, di velocità o in curva.

1. RESISTENZE ORDINARIE

1.1 RESISTENZA AL ROTOLAMENTO

Essa dipende da diverse cause, nel dettaglio:

- dall'attrito ai perni delle ruote,
- dagli urti e moti anormali delle ruote,
- dalla deformabilità degli pneumatici,
- dal tipo di pneumatico,
- dalla superficie di contatto tra battistrada e pavimentazione.

Ma con gli attuali veicoli e le attuali pavimentazioni stradali, l'attrito ai perni si può ritenere trascurabile e attribuire la resistenza al rotolamento, quasi interamente alla deformabilità degli pneumatici.

Uno pneumatico durante il moto varia continuamente la sua configurazione, perché si va spostando la parte di esso a contatto con la strada.

Ora, sia per effetto dell'inerzia meccanica delle parti soggette a deformazione, sia per l'isteresi a cui è soggetto il materiale, l'energia elastica spesa per la deformazione viene solo in parte restituita.

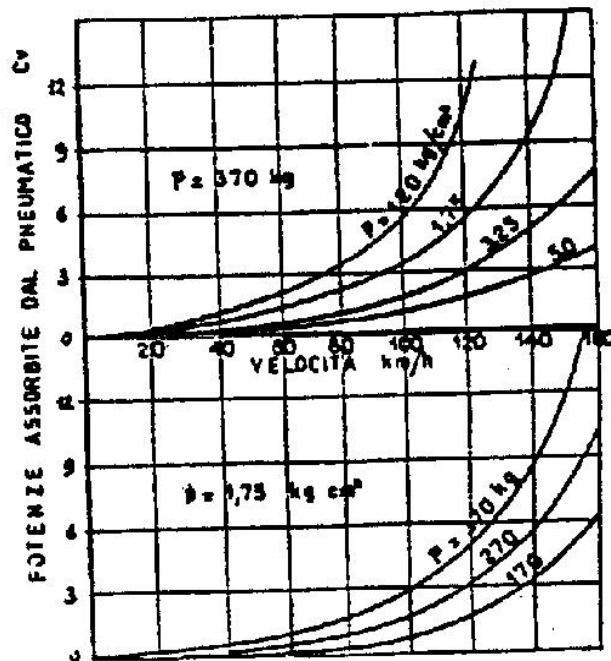
Ci sarà per cui una potenza assorbita dagli pneumatici che, come vediamo dai seguenti diagrammi (Fig. 1), varia in funzione della velocità, per un dato carico $P=370$ kg a ruota e per varie pressioni di gonfiaggio (in alto); nonché per una data pressione di gonfiaggio del valore di $p=1.75$ kg/cm², per vari carichi a ruota (in basso).

I diagrammi evidenziano il fatto che la resistenza al rotolamento aumenta con la deformabilità dei pneumatici, cioè col diminuire della pressione di gonfiaggio e con l'aumentare della velocità del veicolo.

Quando la pressione dello pneumatico è alta, è vero che la resistenza al rotolamento è bassa, ma il comfort della marcia è peggiore.

Questa potenza assorbita dai pneumatici, comporta un innalzamento della loro temperatura in quanto l'energia dissipata si trasforma in energia termica.

Fig. 1- Potenze assorbite dal rotolamento dello pneumatico in funzione della velocità, per dato carico (370 kg a ruota) e varie pressioni di gonfiaggio (in alto) e per data pressione di gonfiaggio (1.75 kg/cm²) per vari carichi a ruota (in basso).



Con pneumatici e veicoli in condizioni normali e pavimentazioni stradali in buone condizioni la resistenza al rotolamento assume valori pari a:

15-20 kg/t per le autovetture,

20-30 kg/t per gli autocarri.

Per ottenere risultati più precisi si può utilizzare la seguente espressione valida per velocità $v > 50 \text{ km/h}$:

$$r_{rot} = 15 + 0.00003(v - 50)^3$$

Per $v \leq 50 \text{ km/h}$ r_{rot} assume valore costante.

1.2 RESISTENZA AERODINAMICA O DELL'ARIA

L'altra resistenza al moto di tipo ordinaria è quella dovuta al mezzo (aria) in cui si muove il veicolo. Essa assume per cui una importanza rilevante per i veicoli terrestri ed è l'unica per gli aeromobili. La resistenza aerodinamica dipende da diverse cause, nel dettaglio:

- dalla sovrappressione che si genera sulla parte anteriore,
- dall'attrito lungo le pareti laterali,
- dalla depressione sulla parte posteriore,

Risulta proporzionale -al quadrato della velocità del veicolo (v),

- alla densità dell'aria (ρ),
- alla proiezione su un piano perpendicolare alla direzione del moto della superficie investita (S),
- alla aerodinamicità del mezzo (C).

Data una superficie di area S , che si muove normalmente in un fluido di peso specifico γ (kg/m^3), chiamando v (m/s) la velocità relativa, sperimentalmente si è trovato:

$$R_{aer} = C\left(\frac{\gamma}{g}\right)Sv^2 = C\rho Sv^2$$

avendo indicato con ρ la densità ($\text{kg sec}^2/\text{m}^4$) del fluido e con C il coefficiente di aerodinamicità.

Nel caso di veicoli terrestri, considerando $\rho = \text{cost}$ (alla pressione di 760 mm di Hg ed alla temperatura di 15°C si ha $\gamma = 1.225$ e quindi $\rho = 0.125$) la resistenza aerodinamica assume la forma:

$$R_{aer} = KSv^2$$

Dove:

S varia tra 1.2 e 2.2 m^2 per le autovetture,
tra 3 e 7 m^2 per gli autocarri.

Mentre, esprimendo R_{aer} in kg; S in m^2 e v in Km/h, K vale:

- 0.005 e 0.004 per autovetture vecchio modello e autocarri,
- 0.003 e 0.002 per autovetture chiuse con sagoma aerodinamica,
- 0.0015 per autovetture particolarmente studiate.

Ma tale formula, è una approssimazione della realtà, poiché non da un'idea completa del fenomeno. Infatti la resistenza aerodinamica è originata da due cause diverse, tra loro indipendenti:

- una resistenza frontale o di forma
- una resistenza tangenziale

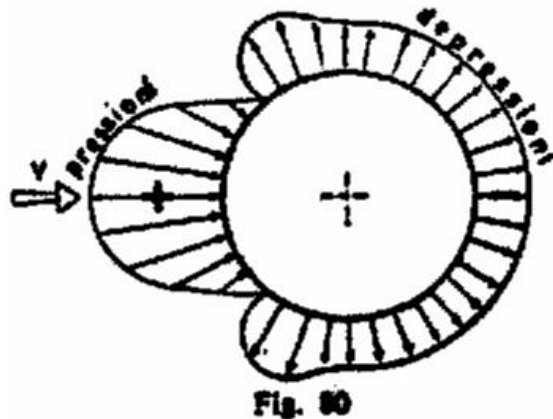
$$R_{AER} = R_F + R_{TANG}$$

1.2.1 RESISTENZA DI FORMA

La resistenza di forma nasce come risultante delle pressioni e depressioni aerodinamiche che si creano sulla superficie del veicolo in conseguenza del moto relativo tra il veicolo e il fluido ambiente (aria).

Essa è data dall'imperfetto richiudersi dei filetti a poppa, cioè alla formazione della scia, che impedisce il perfetto recupero totale di pressione; infatti i filetti fluidi formano dei vortici che dissipano di conseguenza energia.

Fig. 2 - Andamento delle pressioni e depressioni.



La Fig. 2 mostra l'andamento delle pressioni e depressioni sulla superficie esterna di una sfera liscia investita da una corrente d'aria alla velocità v . Quanto più è larga la scia in relazione allo spessore, tanto più elevata è la resistenza di forma.

Adoperando l'espressione di Bernoulli possiamo scrivere:

$$R_f = C_{rf} \frac{1}{2} \rho S v^2$$

dove R_f è la resistenza di forma

C_{rf} è il coefficiente di forma.

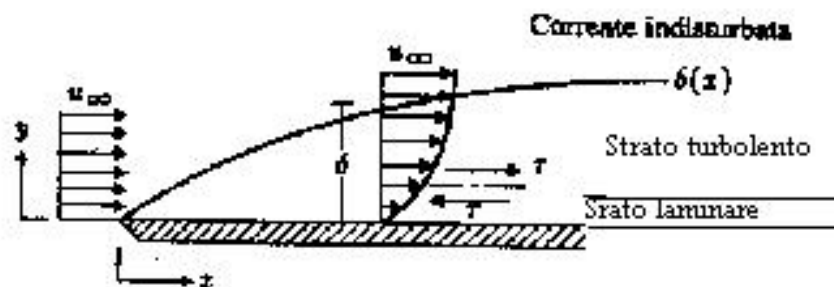
1.2.2 RESISTENZA TANGENZIALE

La resistenza tangenziale esiste anche se il corpo ha una superficie perfettamente levigata, in quanto è dovuta allo scorrimento viscoso del mezzo ambiente (aria). Sarebbe quindi nulla se il fluido in cui avviene il moto fosse un gas perfetto, perché la viscosità in tal caso sarebbe nulla.

Il sottile strato di fluido che contorna il corpo e nel quale la velocità relativa tra filetti e superficie subisce i più rapidi decrementi, prende il nome di strato limite. Nello strato limite il moto può essere laminare o turbolento; la resistenza di attrito assume quindi forme diverse: nel caso di moto laminare dipende dalla potenza 1.5 della velocità, nel caso di moto turbolento dipende dalla potenza 1.8 della velocità.

Come si vede nella Fig. 3, su di una lastra lambita da un fluido sono presenti entrambi gli strati, ma nel caso di marcia veloce è maggiore lo spessore dello strato turbolento.

Fig. 3 - Strato limite di velocità su una lastra piana.



Strato limite di velocità su una lastra piana.

Scrivendo anche la resistenza tangenziale in forma quadratica si ha che:

$$R_{\text{tang}} = C_{ra} \frac{1}{2} \rho S' v^2 \quad \text{dove} \quad S' \text{ è la sezione bagnata dal fluido}$$

C_{ra} è il coefficiente di resistenza aerodinamica.

Sperimentalmente si è visto che il coefficiente C_{ra} dipende dal numero di Reynolds.

Si ricorda che il numero di Reynolds è un parametro adimensionale pari al rapporto tra le forze di inerzia e le forze viscosi, cioè:

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

Dove:

ρ = densità del fluido,

v = velocità,

μ = viscosità dinamica,

L = dimensione caratteristica del corpo.

Allora riassumendo le due resistenze otteniamo:

$$R_{AER} = R_F + R_{TANG} = C_{rf} \frac{1}{2} \rho S v^2 + C_{ra} \frac{1}{2} \rho S' v^2 = (C_{rf} + C_{ra} \frac{S'}{S}) \frac{1}{2} \rho S v^2$$

Segue che:

$$R_{AER} = C_r \frac{1}{2} \rho v^2 S$$

dove $C_r = C_{rf} + C_{ra} \frac{S'}{S}$ è il coefficiente di resistenza.

Nel caso dei veicoli terrestri la superficie bagnata dal fluido è trascurabile rispetto alla superficie maestra, per cui il termine $C_{ra} \frac{S'}{S}$ è piccolo ed è lecito dunque utilizzare la forma vista inizialmente.

$$R_{aer} = C \left(\frac{\gamma}{g} \right) S v^2 = C \rho S v^2 \quad \text{con } C \text{ che dipende dalla forma del veicolo.}$$

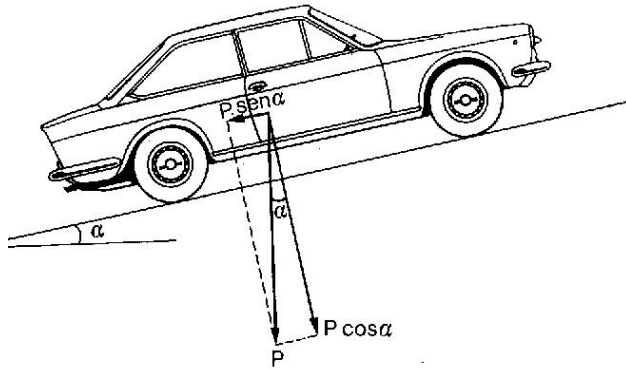
Diamo ora una idea delle grandezze assunte da questa resistenza.

Per vetture con resistenza al rotolamento di 20 kg, la resistenza offerta dall'aria a $v = 100$ km/h vale 50 kg, mentre per $v = 120$ km/h supera i 70 kg.

2. RESISTENZE STRAORDINARIE

2.1 RESISTENZA DOVUTA ALLA PENDENZA

Fig. 4 - Veicolo in salita



Detto α l'angolo di inclinazione della strada con l'orizzontale e P il peso applicato nel baricentro del veicolo (Fig. 4), vediamo che il peso si scompone in due parti:

- $P \sin \alpha$ componente che si oppone al moto ed è quindi la resistenza dovuta alla pendenza,
- $P \cos \alpha$ componente normale al piano stradale.

Visto che si parla di pendenze comunque piccole, in particolar modo nel caso ferroviario, è lecito confondere il $\sin \alpha$ con la $\tan \alpha = i$, ovvero la pendenza della strada. Esprimendo la pendenza i in per mille e P in tonnellate, si ha che la resistenza specifica (in kg) è proprio uguale ad i :

$$r_i = i$$

La resistenza sarà per cui; $R_i = P \cdot r_i = P \cdot \tan \alpha = P \cdot i$

Pertanto, se si esprime i in per mille, R_i misura la resistenza in kg per tonnellate di peso del veicolo. Se anziché in salita, siamo in discesa, la gravità fornisce una componente favorevole al moto. La resistenza di rampa diventa, cioè, una forza motrice che assume valore negativo; in questo caso essa va sottratta alle altre resistenze.

$$R_i = -P \cdot r_i = -P \cdot \tan \alpha = -P \cdot i$$

Per una pendenza del 20 per mille si ha una resistenza specifica pari a:

$$R_i = 1 \cdot 20 = 20 \text{ kg/t}$$

Ovvero considerando $1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$ e il valore reale della pendenza pari a $i = 0.02$ si ottiene lo stesso risultato precedente.

$$R_i = 1000 \cdot 0.02 = 20 \text{ kg / tonn}$$

2.2 RESISTENZA IN CURVA

Quando la marcia del veicolo avviene in curva le resistenze al moto aumentano per l'insorgere di una resistenza addizionale prodotta da due cause:

- l'inerzia del veicolo si oppone al cambiamento di direzione,
- tra ruote e rotaie o ruote e pavimentazione vengono a crearsi delle azioni di attrito che dipendono dal tipo di legame tra ruota e guida.

Quando il veicolo passa dalla marcia in rettilineo a quella in curva è come se ruotasse attorno all'asse z di un certo angolo (Fig. 5).

Se lo spazio percorso in curva è s, l'energia da fornire al veicolo per la sua rotazione è:

$$\frac{1}{2} j \omega^2 = \frac{1}{2} j \left(\frac{v}{R} \right)^2$$

dove $\omega =$ è la velocità angolare sia del veicolo rispetto al centro della curva, sia del veicolo rispetto all'asse z.

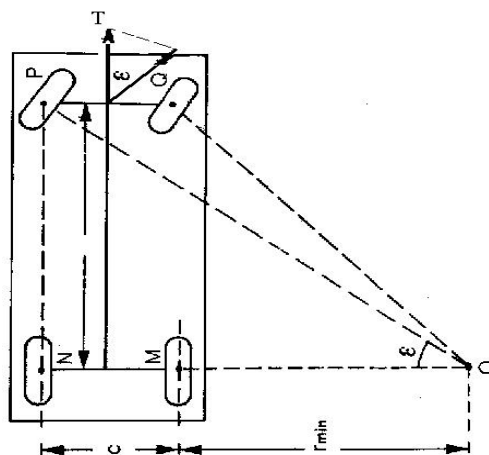
$j =$ è il momento di inerzia della massa del veicolo rispetto all'asse verticale z, nonché rispetto al centro della curva.

$R =$ raggio della curva.

Poichè per trovare l'energia abbiamo considerato una variazione di lavoro (in cui il lavoro iniziale è nullo), per ottenere la forza, e cioè la resistenza in curva, dividiamo per lo spazio percorso s ed otteniamo:

$$R_c = \frac{j}{2s} \left(\frac{v}{R} \right)^2 .$$

Fig. 5 – Veicolo in curva



Tale resistenza è da tenere in conto per curve a piccolo raggio; per curve a grande raggio essa si ingloba alla resistenza al rotolamento. Nel caso di curve a piccolo raggio (strade di montagna), si rende per cui necessario ridurre la pendenza sui tornanti, se non si vuole modificare eccessivamente il regime di marcia del motore.

Vediamo più in particolare il caso automobilistico. Le ruote motrici sono munite di differenziale, per cui sono indipendenti tra loro. Le ruote anteriori si dispongono obliquamente rispetto all'asse longitudinale. Ci sarà per cui una componente dello sforzo di trazione che va perduta, ma è una perdita comunque piccola, in quanto la resistenza in curva è circa 0.33 kg/t, ovvero tre etti per ogni tonnellata di peso del veicolo.

2.3 RESISTENZA DI INERZIA

Ogni volta che sul veicolo si manifesta una variazione di velocità positiva, cioè diretta nello stesso verso del moto, nasce una resistenza addizionale dovuta all'inerzia; essa può porsi nella forma:

$$F_i = -\frac{P}{g} \cdot \beta \cdot \frac{dv}{dt}$$

Dove: $g = 9.81m/sec^2$

P peso del veicolo in t

$\frac{dv}{dt}$ è l'accelerazione in direzione del moto

$\beta \cong 1.05 \div 1.08$ è un coefficiente che tiene conto del fatto che il veicolo non è un corpo rigido ma ci sono organi dotati di moto relativo rispetto al mezzo (pistoni, bielle...) e per cui occorre una forza maggiore della resistenza per imprimere una accelerazione.

La resistenza specifica stante a quanto detto è $-\frac{P}{g} \cdot \frac{dv}{dt}$

La forza di inerzia è quindi, una ulteriore resistenza da vincere nel caso in cui $\frac{dv}{dt} > 0$, è una forza motrice nel caso di decelerazioni in cui $\frac{dv}{dt} < 0$.

Essendo $\frac{P}{g} = \frac{1000}{9.81} = 102$ si può porre

$$F_i = -\frac{P}{g} \cdot \beta \cdot \frac{dv}{dt} = -102 \cdot \beta \cdot \frac{dv}{dt}$$

3. EQUAZIONE GENERALE DELLA TRAZIONE

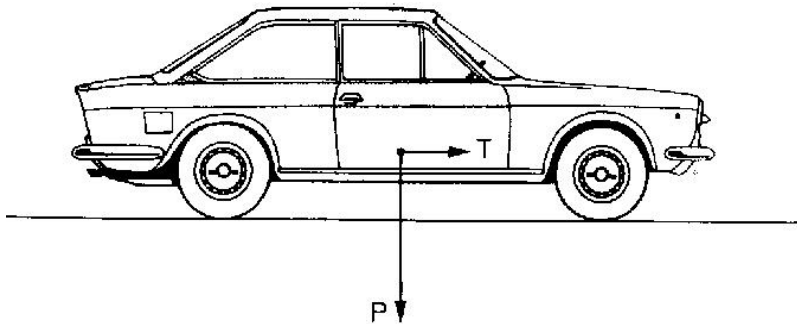


Fig. 6 - Veicolo in moto

Lo sforzo di trazione T , generato dal motore, deve essere tale da vincere tutte le resistenze al moto perché possa mettere in movimento il veicolo; perciò avrà la seguente espressione (Fig. 6):

$$T = P(\mu \pm i \pm 102\beta \frac{dv}{dt}) + kSv^2$$

dove T = sforzo di trazione in kg,

P = peso del veicolo in t,

μ = resistenza al rotolamento,

i = pendenza in per mille, positiva per le salite, negativa per le discese,

$\frac{dv}{dt}$ = accelerazione,

kSv^2 = resistenza all'aria.

La forza di inerzia è positiva in accelerazione, negativa in decelerazione.

In ogni caso, però, perché possa avvenire il moto del veicolo deve essere verificata la condizione di aderenza tra pneumatico e pavimentazione stradale; dunque T dovrà essere al tempo stesso:

$$T \leq P_a \cdot f_a$$

Dove:

P_a = peso aderente del veicolo,

f_a = coefficiente di aderenza pneumatico – pavimentazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] De Gregorio, “Meccanica della locomozione”, 1980.
- [2] Ferrari – Giannini, “Geometria e progetto di strade”, ISEDI, 1996.
- [3] Tesoriere, “Strade, ferrovie, aeroporti”, vol.1, “Il progetto e le opere d’arte” UTET, 1998.
- [4] Esposito – Mauro, “ La geometria stradale”, Hevelius Edizioni, 2001.
- [5] Santagata, “Strade - Teoria e tecnica delle costruzioni stradali”, vol.1, “Progettazione”, Pearson, 2016.