drato della velocità: è la tipica resistenza incontrata da un oggetto che si muove in acqua, non per nulla viene denominata resistenza ***idraulica***[13].

Per velocità ancora più elevate anche questo modello decade, la resistenza del mezzo cresce più rapidamente del quadrato della velocità: si chiama, con richiamo al caso dei proiettili, resistenza ***balistica***.

4. Nel caso della resistenza viscosa, proporzionale alla velocità, possiamo ritenere valida la sovrapposizione degli effetti: se la resistenza opposta al moto di un corpo K è $\vec{F}_1$ quando la sua velocità è $\vec{v}_1$ ed è $\vec{F}_2$ quando la sua velocità è $\vec{v}_2$, una velocità $\vec{v}_1 + \vec{v}_2$ incontrerebbe una resistenza $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Quanto meno, per velocità ugualmente dirette: dipendendo infatti la resistenza del mezzo anche dalla geometria del corpo in movimento, quando $\vec{v}_1$ e $\vec{v}_1$ hanno direzioni diverse sarà in genere diverso anche il coefficiente di proporzionalità tra forza e velocità, cosicché ad esempio la resistenza potrà avere valore diverso nelle due direzioni anche per uguali valori delle velocità (la spinta di un vento laterale su un'automobile è chiaramente diversa da quella esercitata da un vento frontale di uguale velocità).

5. Supponiamo ora che la resistenza si possa ritenere proporzionale al quadrato della velocità, e supponiamo che le differenze di forma abbiano effetti trascurabili. Consideriamo una situazione concreta: un ciclista che sta per mettersi in moto in direzione y (fig. 16) è investito da un vento laterale che spira in direzione x con velocità costante $\vec{v}_0$ di valore 10 km/h esercitando sul ciclista una forza $\vec{F}_0$ equiversa a $\vec{v}_0$ (controversa quindi alla velocità $\vec{v}_x = \vec{v}_0$ del ciclista rispetto all'aria). Se il ciclista si mette in moto e raggiunge una velocità $\vec{v}_y$ di 20 km/h, subirà ovviamente per questo da parte dell'aria una spinta supplementare controversa alla direzione y di marcia. Se studiamo separatamente gli effetti di resistenza delle due velocità e poi li sovrapponiamo, otteniamo (frecce a tratteggio in fig. 18) che parallelamente a x la spinta dell'aria resta immutata ($F_x = F_0$) e che parallelamente a y (velocità doppia) la spinta è quattro volte più grande ($F_y = 4\,F_0$): complessivamente, otteniamo una forza di valore $\sqrt{F_0^2 + 4F_0^2} = \sqrt{5}\,F_0$. Ma siamo in errore: in particolare, la spinta laterale non resta immutata ma diventa più che doppia! In effetti, la velocità del ciclista rispetto all'aria, inizialmente uguale a 10 km/h parallelamente a x, è adesso uguale a 10 km/h parallelamente a x e a 20 km/h parallelamente a y: complessivamente, $v = \sqrt{(v_0)^2 + (2v_0)^2} = \sqrt{5}\,v_0$.

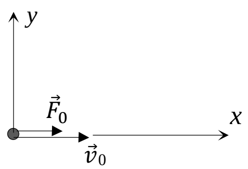

Fig. 16 – *La situazione iniziale.*

[13] Per velocità non sufficientemente basse, una più realistica valutazione della resistenza al moto di una sfera si ottiene aggiungendo al termine di Stokes, che tiene conto soltanto delle forze tangenziali di attrito, un termine con cui si tiene conto delle forze normali alla superficie, proporzionale al quadrato della velocità, al quadrato del raggio e alla densità del fluido. Per la dipendenza dal quadrato di v, tale termine finisce per prevalere sul primo col crescere della velocità.

Dunque la spinta del vento, proporzionale al quadrato della velocità, dal valore iniziale F_0 è passata al valore $5\,F_0$. Se allora φ (fig. 17) è l'angolo tra velocità iniziale e velocità finale del ciclista rispetto all'aria, parallelamente a x la forza, inizialmente uguale a F_0, vale ora

$$F_x = 5F_0 \cos\varphi = 5F_0\, v_0/(\sqrt{5}\,v_0) = \sqrt{5}\,F_0 = 2{,}236\,F_0$$

e parallelamente a y vale

$$F_y = 5F_0 \,\mathrm{sen}\varphi = 5F_0\, 2v_0/(\sqrt{5}\,v_0) = 2\sqrt{5}\,F_0 = 4{,}472\,F_0.$$

Si noti in fig. 18 che la resistenza al moto è parallela alla velocità $\vec{v}$ del ciclista rispetto all'aria, a differenza della resistenza più sopra calcolata come somma degli effetti separatamente prodotti dai componenti x e y della velocità.

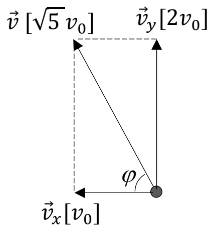

Fig. 17 – *Le velocità del ciclista rispetto all'aria con i relativi moduli.*

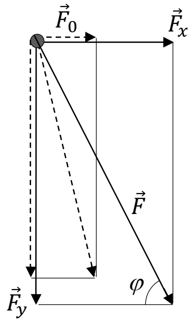

Fig. 18 – *La resistenza $\vec{F}$ con i suoi componenti x e y. A tratteggio le stesse forze calcolate sovrapponendo gli effetti.*