

Capitolo 1

Considerazioni generali

1.1 Cenni storici

La ferrovia o “strada ferrata” ha origini remote: gli antichi Egizi trasportavano pesanti carichi su guide di bronzo, mentre i Romani costruivano le “vie ferree” con file di pietra dura. Nel 1500 in Tirolo, e successivamente in Inghilterra, le miniere erano servite da carri le cui ruote scorrevano su tavole di legno aventi la funzione di guida per il movimento nei ristretti spazi sotterranei e di regolarizzazione del piano di rotolamento. Successivamente, le tavole di legno furono rivestite di lamiera e le ruote furono ricoperte di cerchioni metallici per ottenere una consistente diminuzione della resistenza all’avanzamento. Nel 1802 in Inghilterra fu brevettata una motrice a vapore con ruote a gola su rotaie. L’esperienza insegnò che il bordo esterno della gola costituiva un impedimento all’avanzamento in curva e fu eliminato, mentre un ulteriore perfezionamento fu costituito dall’introduzione del bordino interno sulla ruota. Si può affermare che, fondamentalmente, le moderne ferrovie derivano da questa intuizione (vedi figura 1.1). Successive modifiche del profilo della ruota e della rotaia migliorarono progressivamente le condizioni di rotolamento. Nei diversi paesi europei si svilupparono rotaie con profili simili (vedi figura 1.2), la cui caratteristica comune era la sezione a T o doppio T per garantire la resistenza flessionale e l’arrotondamento della parte superiore per facilitare la funzione di supporto e guida per la ruota.

Comunque la prima ferrovia considerata tale è la linea di 14 km inaugurata in Inghilterra nel 1825¹. La linea a servizio viaggiatori era servita

¹Da questo primato inglese deriva che, internazionalmente, la circolazione ferroviaria adotta la marcia a sinistra.

dalla celebre locomotiva a vapore² “locomotion”, opera di George Stephenson³ (gli schemi di figura 1.3 ripercorrono l’evoluzione dei veicoli a vapore). Benché il primo tentativo di applicazione della trazione a vapore avesse riguardato carri stradali, la leggerezza della loro struttura, paragonata alla massa della caldaia, ed il pessimo stato delle strade dell’epoca, avevano reso tali mezzi soggetti a continui malfunzionamenti. Per questo motivo in campo stradale la trazione a vapore non ebbe mai grande sviluppo⁴. In verità, anche i primi tentativi di applicazione della trazione a vapore alle ferrovie furono scoraggianti, perché la notevole potenza prodotta dalla locomotiva a vapore non poteva essere utilizzata a causa della scarsa aderenza esistente tra ruota e rotaia. Per risolvere tale problema, la locomotiva a “stampelle” di Brunton tentava, in modo bizzarro, di riprodurre il movimento delle zampe del cavallo. Le locomotive di George e Robert Stephenson risolsero, invece, in modo definitivo il problema dell’aderenza mediante l’accoppiamento delle ruote motrici e non motrici di due o più assi. In particolare, nella locomotiva del 1828 notiamo la distinzione tra la biella motrice inclinata e la biella di accoppiamento.

Risolti i problemi tecnici iniziali, il nuovo modo di trasporto si presentò subito come “rivoluzionario”. Richiese una radicale rifondazione degli studi ingegneristici, i quali, in breve tempo, permisero la maturazione delle tecniche di costruzione delle strade ferrate e lo sviluppo tecnico

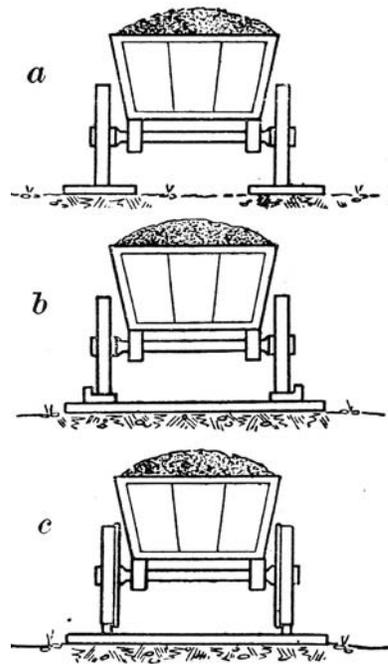


Figura 1.1 Evoluzione della ruotaia

² La prima macchina a vapore su strada carrabile era stata quella di Cugnot nel 1769. La prima macchina Diesel risale, invece, alla fine del 1800.

³ George Stephenson, riconosciuto come il più “grande” ingegnere ferroviario, era un povero giovane minatore che imparò a leggere e a scrivere, frequentando la scuola serale, all’età di 18 anni.

⁴ Solo l’avvento del motore a scoppio, alla fine del secolo, diede un nuovo impulso alla trazione meccanica in campo stradale.

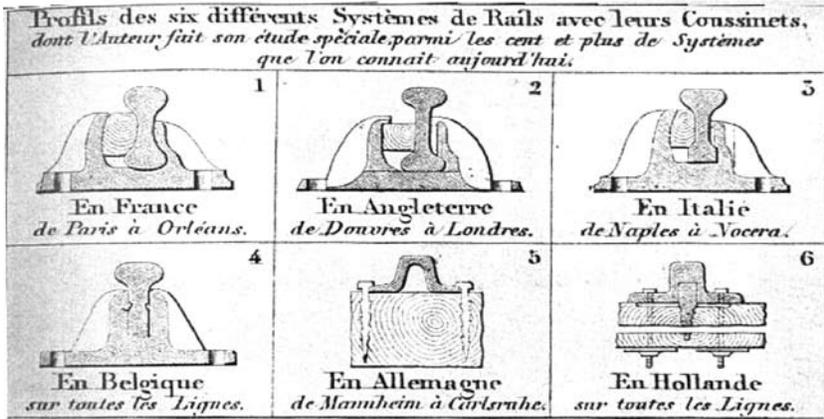


Figura 1.2 Profili di antiche rotaie

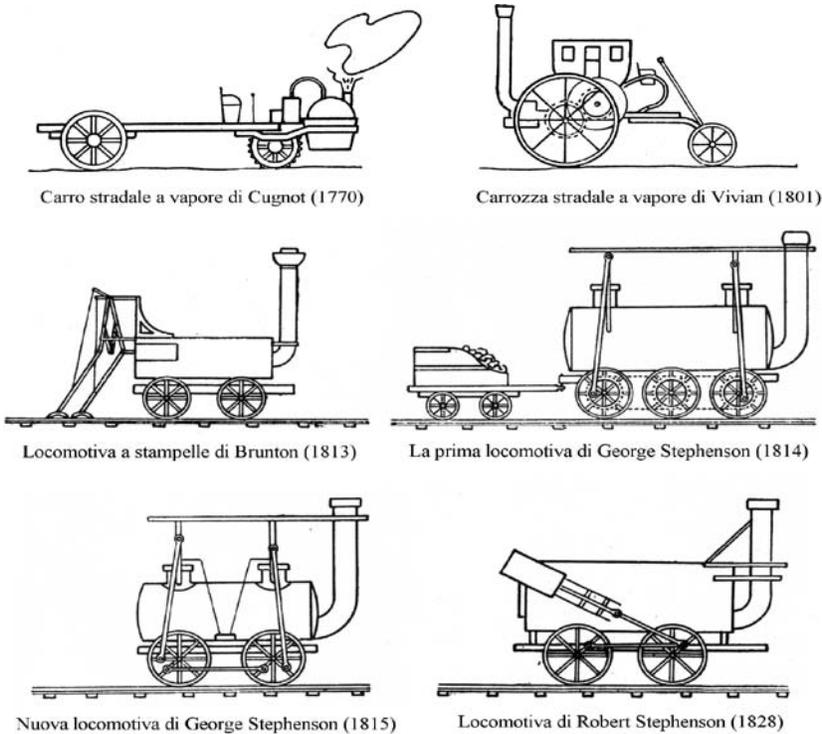


Figura 1.3 Evoluzione dei veicoli a vapore

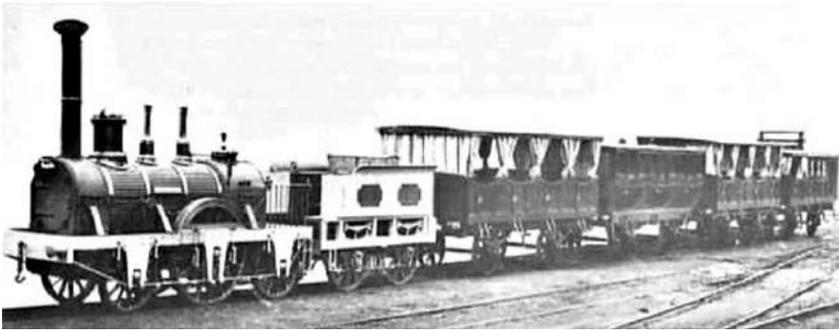


Figura 1.4 La ferrovia Napoli-Portici (in un modello ricostruito nel 1939)

dei materiali a cominciare dalle rotaie, dapprima di ghisa e, subito dopo, di acciaio profilato. In molti casi la ferrovia precedette la costruzione di moderne strade carrozzabili.

L'avvento della ferrovia contribuì molto al successo della rivoluzione industriale, non solo per la maggiore economicità, sicurezza e regolarità del trasporto ma anche per la mentalità d'impresa industriale che riuscì ad introdurre nel settore dei trasporti.

In pochissimi anni si assistette ad uno sviluppo straordinario della ferrovia sia in Europa che nel continente americano.

Il primo tronco di ferrovia in Italia (Regno delle Due Sicilie) da Napoli a Portici, fu aperto all'esercizio nel 1838 (vedi figura 1.4) e, successivamente, nel 1840 quello nel Lombardo-Veneto, da Milano a Monza.

Subito dopo l'unità d'Italia, nel 1861, si avevano ben 2.100 km di ferrovia in esercizio e oltre 1.900 km in costruzione! Già nel 1857 era stata emanata una legge per la costruzione del tunnel del Frejus che doveva collegare alla Savoia i domini sabaudi in Italia. In genere i vari rami ferroviari erano realizzati e gestiti da concessionari privati spesso con capitale straniero. Nel 1905-1906 furono trasferiti allo Stato circa 12.000 km di linea, pur rimanendo molti rami di proprietà e gestione privata. Nel 1931 le Ferrovie dello Stato gestivano una rete di circa 14.000 km ma nel corso della II guerra mondiale ne andarono perduti circa 5.000 km.

1.2 Consistenza attuale di alcune infrastrutture ferroviarie in Italia e cenni sull'attuale sistema di gestione

Attualmente la rete ferroviaria italiana è costituita da circa 16.000 km di linee ferroviarie, di cui il 65% elettrificato ed il 40% a doppio binario. Lo sviluppo delle linee in concessione è di circa 3.600 km. Il traffico si svolge per il 60% su meno del 20% della rete ferroviaria, per l'8% su circa il 45%

(i cosiddetti “rami secchi” che in prevalenza furono costruiti ai primi del ‘900 in assenza di ogni tipo di concorrenza di trasporto alternativo). Ogni anno sulla rete ferroviaria sono trasportate più di 400 milioni di persone (con un percorso medio per passeggero di 90 km) e 50 milioni di tonnellate di merci, con un percorso medio di 500 km. Rispetto agli anni ‘70 si è verificato un basso aumento del traffico viaggiatori e, addirittura, una diminuzione del traffico merci. Ciò è dovuto alla concorrenza del trasporto su gomma, per il trasporto merci, e dell’automobile privato e dell’aereo (per grandi distanze) per il traffico viaggiatori.

Lungo i 16.000 km di linea F.S. si contano (anno 2000) oltre 61.500 ponti e viadotti per una lunghezza complessiva di 510 km e oltre 2.000 gallerie, per una lunghezza complessiva di 1.270 km. In figura 1.5 è riportato lo schema della rete italiana attuale.

L’Italia ha recentemente recepito le direttive comunitarie finalizzate alla liberalizzazione del trasporto ferroviario. Tale normativa è incentrata sul principio della sostanziale separazione tra le attività di gestione dell’infrastruttura ferroviaria e l’attività di trasporto ferroviario: essa prevede



Figura 1.5 Rete italiana attuale (Fonte RFI)

che le funzioni relative all'accesso dell'infrastruttura siano attribuite a enti o società che non prestino, a loro volta, servizi di trasporto ferroviario. In sintesi, la norma prevede che il gestore dell'infrastruttura ferroviaria (RFI) sia autonomo e indipendente, sia sul piano giuridico che su quello organizzativo e decisionale, dalle imprese operanti nel settore dei trasporti (Trenitalia ed altri possibili operatori).

1.3 Caratteristiche del sistema di trasporto ferroviario

Prima di inoltrarci nella descrizione delle infrastrutture ferroviarie, appare utile soffermarci su due aspetti peculiari che caratterizzano e condizionano il sistema di trasporto ferroviario sia per quanto riguarda la geometria dei tracciati di linea sia per quanto riguarda l'esercizio della circolazione: l'aderenza ruota-rotaia e la resistenza all'avanzamento.

La geometria di tracciato di una linea ferroviaria è per molti aspetti simile a quella stradale, con alcune sostanziali differenze. Come ordine di grandezza degli elementi geometrici (almeno nell'ambito delle velocità ferroviarie normali di 160 km/h), il raggio minimo delle curve planimetriche è dello stesso ordine di grandezza di quello autostradale (1.200 m) come anche il raggio minimo delle curve altimetriche (3.000 m). Le pendenze altimetriche normalmente utilizzate sono, invece, sostanzialmente diverse: in ferrovia si prevedono, in genere, pendenze massime del 1,5% mentre in autostrada del 4-5%. E ciò a causa del bassissimo valore dell'aderenza disponibile al contatto ruota-rotaia che, per il sistema di trasporto ferroviario, rappresenta un aspetto fortemente condizionante: lo sforzo di trazione applicabile, limitato dal valore dell'aderenza ($F \leq f P$)⁵ impone di ridurre, a parità di carico utile trasportato, le resistenze all'avanzamento dovute a pendenze e raggi di curvatura (rispetto a quelle stradali). Infatti, lo sforzo di trazione applicabile al contatto ruota-rotaia in pianura su ferro è circa 1/5 rispetto a quello su gomma, essendo l'aderenza ruota-rotaia molto minore rispetto all'analogia ruota gommata-strada. In figura 1.6 è

⁵ La coppia motrice applicata alla ruota si esplicita in una coppia di forze; una di esse F è la forza di trazione applicata al perno della ruota in direzione del moto, l'altra F è applicata alla superficie di rotolamento della ruota nel punto di contatto con la rotaia secondo la tangente alle due superfici di contatto.

Nel punto di contatto la rotaia deve essere in grado di offrire una reazione F a tale forza attiva per evitare che si abbia lo slittamento della ruota (in questo caso il centro di istantanea rotazione si sposterebbe dal punto di contatto ruota-rotaia al centro della ruota); la forza F che rappresenta lo sforzo di trazione applicabile, deve essere minore del valore $f * P$, ove P è il peso trasmesso dalla ruota alla rotaia ed f (variabile con le condizioni atmosferiche e la velocità) è un coefficiente variabile mediamente da 0,15 per locomotori diesel a 0,20 per locomotori elettrici (il maggior valore di f che si riscontra nella trazione elettrica rispetto a quella diesel è dovuta al fatto che nella trazione elettrica lo sforzo ai cerchioni è più costante).

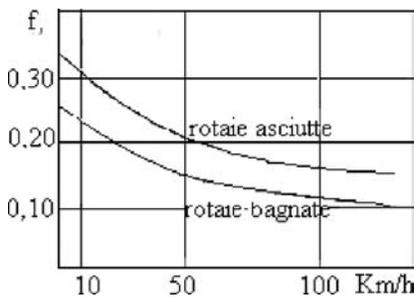


Figura 1.6 Variazione dell'aderenza della ruota ferroviaria con la velocità

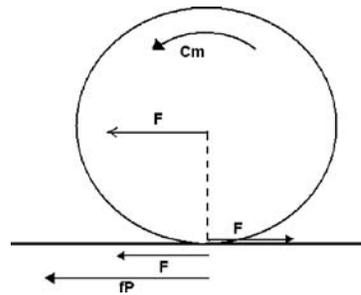


Figura 1.7 Coppia motrice e coppia di forze equivalenti

riportato l'andamento dell'aderenza ruota-rotaia in funzione dello stato della superficie della rotaia e della velocità.

C'è da aggiungere che la bassa aderenza ruota-rotaia impedisce di ottenere in ferrovia lo stesso sforzo di frenatura raggiungibile su strada. Per questo motivo, nelle ferrovie, le distanze per l'arresto risultano sempre molto maggiori di quelle stradali (p.e. a 100 km/h oltre 600 m contro 150 m) e, normalmente, maggiori dello spazio di visuale libera.

Di contro, la ferrovia è un sistema di trasporto caratterizzato da bassi valori delle resistenze all'avanzamento. Esso è quindi un sistema ad elevato rendimento perché permette il trasporto di notevoli quantità di carico utile per unità di sforzo di trazione. Infatti, alla velocità di 50 km/h, in pianura e in rettilineo, si richiede per l'avanzamento una forza di 2,5-3,0 kg ogni 1.000 kg trainati su ferro, mentre su strada si richiede una forza di 20-30 kg. Siamo cioè nel rapporto circa di 1/10 per la resistenza al moto (resistenza al rotolamento + resistenza dell'aria). Incrementandosi la velocità, il rapporto diventa ancora più favorevole alla ferrovia poiché la resistenza al rotolamento nel contatto ferro-ferro si incrementa meno di quanto non avvenga nel contatto pneumatico-asfalto; inoltre si incrementa meno anche la resistenza dell'aria⁶. Lo stesso rapporto si registra, mediamente, in termini di energia: per "produrre" una tonnellata/km occorrono 400 chilocalorie per un autocarro a gasolio e 60 per un mezzo diesel ferroviario⁷. La ferrovia è ulteriormente avvantaggiata se si considera una

⁶ Per il minore rapporto sagoma resistente (sezione maestra) / massa trasportata del trasporto ferroviario rispetto a quello stradale.

⁷ In termini energetici i soli modi di trasporto che presentano un rendimento più favorevole di quello ferroviario sono quello navale e quello via tubo (acquedotto, oleodotto o gasdotto).

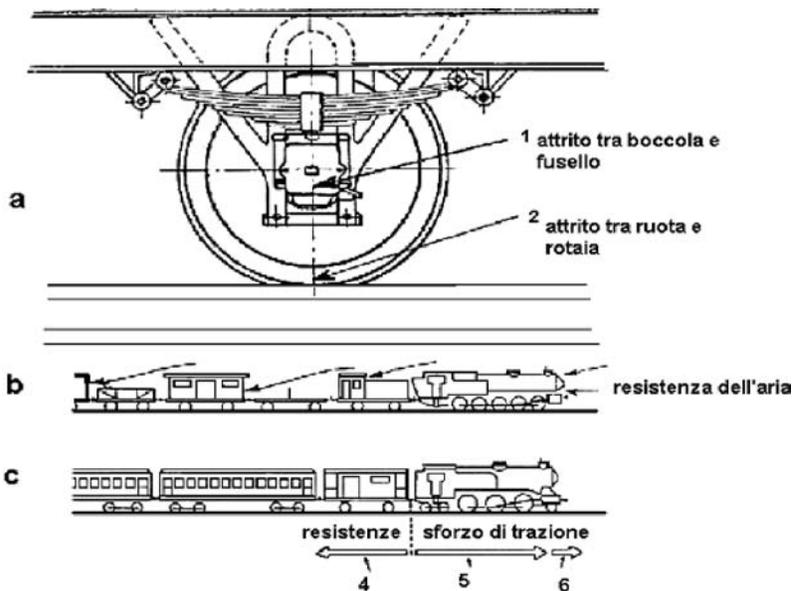


Figura 1.8 Le resistenze al moto opposte dai veicoli; a) Resistenza al rotolamento: 1. Attrito tra la boccola e il fusello. 2. Attrito tra ruota e rotaia. b) Resistenza dell'aria. c) Sforzo di trazione e resistenza dei veicoli: 4. Resistenze al moto di tutti i veicoli che compongono il treno. 5. Sforzo di trazione prodotto dalla locomotiva. 6. Sforzo di trazione speso per vincere le resistenze della locomotiva.

linea elettrificata⁸. In figura 1.7 sono schematizzate le resistenze al moto opposte dai veicoli ferroviari. Dalle cifre esposte e dalla considerazione che l'energia consumata in Italia per il trasporto risulta essere circa il 30% (lo 0,7% per il trasporto ferroviario) dell'energia totale consumata appare evidente la convenienza di spostare su ferro, da altri modi di trasporto, la massima quota possibile di traffico, sia merci che viaggiatori. Al risparmio energetico del sistema ferroviario andrebbe aggiunto il risparmio sui costi "esterni" che esso consente (i costi esterni del trasporto sono gli incidenti, l'inquinamento, il consumo di territorio)⁹. Una giusta politica tariffaria che

⁸Nel caso di linea elettrificata si ha, anche, l'ulteriore (possibile) vantaggio ecologico dell'utilizzo di una fonte energetica più "pulita" di quella del petrolio.

⁹L'incidentalità e l'inquinamento acustico e atmosferico del sistema mobilità producono ogni anno, in Italia, costi sociali e sanitari stimati in 110 miliardi di euro (circa il 10% del P.I.L.) imputabili per il 95% alla strada ed in modo trascurabile alla ferrovia.

tenesse conto anche dei costi esterni aumenterebbe l'efficienza economica del sistema ferroviario. Il nuovo assetto istituzionale delle ferrovie italiane¹⁰, che separa la gestione dell'infrastruttura dall'impresa di trasporto, potrebbe consentire, in futuro, l'applicazione di tariffe che tengano conto sia dei costi esterni che dei costi interni.

Per concludere la breve panoramica sulle caratteristiche del trasporto ferroviario, è necessario ricordare che, grazie alla possibilità di comporre treni con numerosi veicoli di elevata portata, si può raggiungere una capacità di trasporto (fino a 30.000 tonnellate per ora e direzione) molto superiore a quella di un'autostrada, con un'occupazione di territorio e dimensioni delle opere nettamente inferiori.

¹⁰Vedi D.L. 8-7-2003 n° 188 in attuazione delle direttive 2001/12/CE, 2001/13/CE e 2001/14/CE.