

SULLA
ROTTURA DEGLI ASSI DEI VEICOLI FERROVIARI

CONSIDERAZIONI E CALCOLI

GIOVANNI SACHERI

*Memoria letta nell'adunanza 1° aprile
approvata per la stampa nella successiva dell'11 maggio 1872.*

Signori,

Le frequenti rotture avvenute negli assi dei veicoli ferroviari in questi ultimi mesi hanno giustamente destato nel pubblico una seria apprensione, e diedero più d'una volta occasione ad animare il discorso di tutti i privati convegni.

Anche la pubblica stampa non tardò di adempiere replicatamente al suo compito di popolarità; e convien dire come in questo caso le bastasse ricorrere alla semplice eloquenza dei fatti, per indirizzare le sue abituali e generiche accuse alle Amministrazioni ed al Governo.

Ed il Governo a sua volta si affrettò di nominare la indispensabile Commissione d'inchiesta.

Ma poiché tutti si accinsero al compito loro, ho divisato che la nostra Società non poteva in questo argomento restarsene muta; ma doveva trarre ancor essa occasione dalle attualità, per porsi innanzi la insorta questione, ed occuparsene fin dove solamente le spetta, ma con quella premura

che l'amore del pubblico bene e l'interesse delle scienze applicate concordemente richiedono.

I. È bensì vero che la rottura di un asse ha raramente cagionato disgrazie, e che su tutte le ferrovie del mondo si annoverano a centinaia le rotture avvenute senza alcuna pericolosa conseguenza (1); essendoché la cassa del veicolo rimane quasi sempre sospesa alle catene di trazione della vettura vicina, e molte volte strisciando sulle rotaie cagiona alla trazione una resistenza sì grande, che l'accorto macchinista riesce in tempo a fermare il convoglio e ad evitare disgrazie.

Ma ciò non toglie che alcuna volta alla rottura di un asse tenga dietro un generale disvio del convoglio, e che per fortuita combinazione di sfavorevoli circostanze abbiansi poi da deplorare le più gravi disgrazie.

Epperò non ho creduto fuori proposito di presentarvi, o signori, alcune osservazioni qui riunite, con uno scopo che mi affretto a dichiarare puramente accademico, se così vuoi; e le quali varranno nondimeno a motivare la frequenza constatata nella rottura degli assi, senza che sia d'uopo ricorrere a cause estrinseche, ipotetiche o reali, di negligenza o di frode in tutte quelle operazioni complesse che si succedono per la fabbricazione e la prova, l'accettazione e la posa, il servizio e la manutenzione, la sorveglianza ed il congedo degli assi.

II. E fra le probabili cause di così frequenti rotture credo utile dapprima fermarmi sulla più speciosa di tutte e più antica ad un tempo, quale sarebbe la supposta alterazione molecolare del ferro che dallo stato fibroso dicevasi passasse col tempo e per le continue vibrazioni allo stato granulare e cristallino. È cosa curiosa che questa tesi generale aveva poi trovato precisamente negli assi dei veicoli ferroviari le sue più belle prove. Ne seguiva intanto che la rottura di un asse, cui nessun indizio esterno valeva a predire, era inevitabile appena oltrepassato un determinato periodo di tempo e di esercizio, per quanto tenui si fossero le por-

tate dei veicoli, e per quanto si supponessero grandi le dimensioni degli assi.

Il perché prescrivevasi prudentemente altre volte di registrare ad ogni giorno i chilometri di corsa per tutti i veicoli; ed il nuovo regolamento generale del 1° luglio 1868 per l'esercizio delle strade ferrate prussiane (2) stabilisce ancora all'art. 17 la registrazione anzidetta, e prescrive che dopo un percorso di 30 mila chilometri, ed in ogni caso dopo due anni di esercizio si debbano togliere gli assi per essere sottoposti ad esame.

Ma la grande estensione e la suddivisione delle reti ferroviarie di tutte le nazioni, e l'aumento del traffico per una parte, ed anche un po' l'interesse non sempre inteso nelle Società ferroviarie per l'altra, potrebbero benissimo cospirare a rendere una siffatta prescrizione impraticabile affatto, o di non facile controllo; a meno che si volessero applicare anche agli assi dei veicoli quegli ingegni, che chiamati dapprima a dar prova di loro abilità in sostituzione dei sensi fallaci di uno sperimentatore disinteressato, furono grado a grado elevati eziandio a censori della pubblica cosa, in sostituzione della buona fede dei mugnai per riscuotere la tassa del macinato.

Fortunatamente le più accurate esperienze hanno messo oramai fuori dubbio, che una siffatta variazione di struttura molecolare non potrebbe avvenire nel ferro degli assi in esercizio, e che per essi la tesi della cristallizzazione deve essere affatto abbandonata. Tale è almeno l'autorevole asserzione del professore Couche (3).

Or questa cristallizzazione fu sempre combattuta e sostenuta da persone di molta competenza; ma perdette terreno in questi ultimi tempi, abbenchè fosse ancora nel 1864 sostenuta da Kuhlmann (4) il quale attribuisce decisamente ad essa la causa delle frequenti rotture degli assi dei veicoli ferroviarii; né dubita di soggiungere che le sale portanti delle locomotive ricevendo meno scosse dalle ineguaglianze del suolo che non quelle delle vetture sugli ordinarii selciati, cristallizzano meno rapidamente.

Sta invece il fatto, rispondono i più, che nessun asse cristallizza né in modo rapido né lento; e che tutte le alterazioni di struttura molecolare, quali sono costantemente osservate nelle frequenti rotture, indicano nettamente un difetto di fabbricazione e di omogeneità nella materia, indicano in sostanza il peccato originale dell'asse.

Con tuttociò non vuoi menomamente negare nel ferro il passaggio graduato dallo stato fibroso a quello cristallizzato; e tutti sanno che una temperatura corrispondente a quella della tempera dell'acciaio modifica rapidamente, e del tutto, la struttura fibrosa del ferro; che una temperatura anche di molto più bassa, purché sufficientemente prolungata, è capace di produrre il medesimo effetto; come incontestabilmente lo producono tutte quelle operazioni meccaniche che deformano a freddo i metalli.

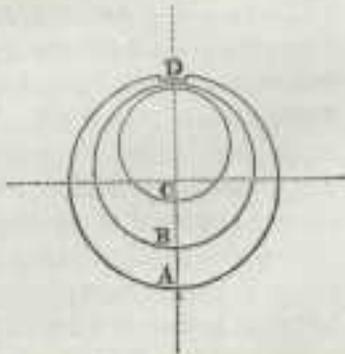
E poiché alcuni autori (5) asserirono che nessuna esperienza diretta ha mai potuto provare che le vibrazioni, per quanto si vogliano ripetute, siano state capaci di produrre una alterazione molecolare simile a quella che si ottiene modificando a più riprese la temperatura del ferro, o ricorrendo alle operazioni meccaniche di fabbricazione a freddo, non sarà fuori proposito accennare al risultato di alcune esperienze eseguite da una Commissione austriaca nominata dal Governo per aggiungere prove e meglio dilucidare la importante questione (6). In queste esperienze si ruppero, isolati, sette assi di locomotive, ripiegati a gomito, fissandoli a incastro per un estremo e cimentandone per l'altro la loro resistenza viva con ripetuti sforzi di torsione e di flessione. E ne avvenne che il più gagliardo di tutti finalmente si ruppe dopo avere ricevuto 128 milioni di scosse, ma più non presentava in sezione che cristalli molto bene distinti, ed ogni aspetto di ferro fibroso era affatto scomparso.

Negando adunque che negli assi dei veicoli in esercizio possa prodursi alcuna cristallizzazione, s'intende semplicemente di negare la esistenza di quelle circostanze che sarebbero capaci di produrre nella struttura molecolare del

ferro, supposta primitivamente fibrosa, la variazione in discorso.

III. Ma a che serve dimostrare od ammettere che alcuna cristallizzazione non può avvenire negli assi in esercizio? Ciò non dispensa di accuratamente studiare in quali condizioni di stabilità essi si trovino, ed essenzialmente di cercare se queste condizioni non riescano ancora, e di molto, peggiorate col tempo. Che altrimenti con un veicolo il quale avesse per un poco servito, senzachè i suoi assi si siano rotti, o senzachè abbiano manifestato un pelo di probabile rottura, comprovandosi col fatto che nessuna cristallizzazione e nessun vizio di fabbrica vi esiste, si ispirerebbe nei viaggiatori una confidenza tanto maggiore quanto è più grande il tempo dell'esercizio; ed allora nessun rigetto negli assi più non dovrebbero fare, finché almeno non avesse raggiunto il suo limite estremo la compatibile usura dei perni.

Disgraziatamente succede che anche quegli assi, i quali provarono in modo incontestabile la bontà di loro fabbricazione con un più o meno lungo esercizio, danno luogo ancor essi a non pochi casi di rottura. Egli è bensì vero che in tali circostanze gli assi si rompono più difficilmente d'un tratto, ma che la rottura avviene invece poco alla volta facendosi per zone che assecondano (veggasi la figura qui inserita nel testo) certi circoli eccentrici *A*, *B*, *C*, quasi fra loro tangenti in *D* presso la cattedatura della chiavetta. E la frattura si scorge di grana finissima come quella dell'acciaio, per la zona esterna *A B*, la si riconosce gradatamente più grossa avvicinandosi alla zona interna *C*, finché verso il mezzo di questa ritrovasi ancora simile in tutto alla primitiva struttura del ferro. Ed il colore caratteristico di ruggine che scorgesi diminuire



gradatamente in intensità verso *B* e manca affatto nella zona *C* denuncia abbastanza chiaramente la preesistenza d'una prima fessura che fu successivamente e col tempo ingrandita fino all'istante della completa rottura dell'asse (7).

Sarà perciò una massima buona, e di non dubbio successo, quella di cercare attentamente questi peli negli assi e trovandoli, porre all'istante fuori servizio quei pezzi, anziché contentarsi di diminuirne la carica, come alcuna volta si suole; e sarà pure ottima cosa il concedere premi alle persone incaricate della sorveglianza di quel materiale, quando ne scoprono per tempo i difetti. Ma ciò non toglie che si manifestino sempre alcune rotture impreviste, e motivate da circostanze fortuite, tra le quali la variazione notevole e continua del traffico, e la confusione non sempre evitabile in qualche istante di sì complesso servizio, esercitano naturalmente le principali influenze.

Che se d'altronde le rotture si verificano, come spesso succede, contro la faccia del mozzo che riguarda il fusto dell'asse, od in una sezione della portata posta un po' nell'interno del mozzo, per cui le fessure accusatrici rimangono nascoste, allora non si ha più altro mezzo che sentire il suono di percossa d'un martello, il quale riesce, massime in questo caso, impotente a dimostrare una sufficiente coesione molecolare del ferro.

IV. Anziché studiar mezzi di predire le rotture per evitarne gli effetti, sarà più semplice cosa e più sicura evitare le cause che quelle rotture producono. Or bene la vera *causa prima* della rottura frequente degli assi, supposti ben inteso di buona fabbricazione, non devesi menomamente cercare nella più o meno lunga durata del loro esercizio, ma bensì ed unicamente nel troppo grave carico a cui sono stati sottoposti foss'anche una sola volta e per pochi chilometri di corsa.

Ed a provare l'asserto io potrei, o signori, citarvi le statistiche annuali ed i risultati d'inchieste di tutte le ferrovie del mondo; non già riportandone alla lettera e per tutti

i singoli casi le molteplici cause ultime ed apparenti di rottura state registrate, ma rilevando un solo fatto innegabile, e che indistintamente concorda con tutti i registri; essere cioè le rotture degli assi ben più frequenti (salvi i casi eccezionali) nei veicoli da merci che non in quelli dei viaggiatori (8). Ed è chiaro come il sole, che la maggior carica degli assi nei veicoli da merci, ed il maggior numero di scosse ch'essi provano in viaggio e nelle frequenti manovre, massime quando si fanno passare su binari di scambio con ristretto accordamento, sono le vere ed uniche cause di sì frequenti rotture; ma riuscirà ben più splendida la prova calcolando direttamente ed a dovere il vero grado di stabilità che gli assi riconosciuti buoni presentano nelle ordinarie condizioni del servizio.

V. Ritengasi anzitutto che quel ferro il quale dicesi *forte e duro*, e che come tale prescriveasi per la fabbricazione degli assi, ancorché sottopongasi solamente a prove statiche regolari e distinte, si dimostra bensì capace di resistere a considerevoli sforzi, ma non si allunga che di quantità piccolissime e tostamente si snerva, e si rompe. Poi aggiungasi che se il medesimo ferro è sottoposto ad estensioni e compressioni succedentisi in tempi relativamente brevi, la sua elasticità, come fu riconosciuta sperimentalmente da Wöhler (9) è di assai diminuita, bastando 170 mila flessioni successive e nel medesimo senso, per rompere una sbarra quadrata di centim. 3,25 di lato del miglior ferro fibroso tratto dagli assi della Società Phoenix, senzachè siansi mai cimentate le fibre di massima fatica nella sezione di rottura con uno sforzo maggiore di 40 chilogrammi per millimetro quadrato; e dovendosi ritenere l'anzidetta resistenza al di sotto di 22 chilogrammi per essere sicuri che la rottura non sarà per avvenire anche dopo 14 milioni di successive flessioni.

Né ciò basta; che gli assi girano con qualche rapidità; ed il piano di sollecitazione non gira con essi; quindi le fibre che contornano l'asse sono sottoposte ad uno sforzo

massimo in quell'istante nel quale passano per il piano di sollecitazione, e dovranno sostenere alternativamente uno sforzo di trazione o di compressione, secondochè saranno al disopra od al disotto dell'asse neutro.

Contentandoci pure di una velocità nel convoglio di 70 chilometri l'ora, le ruote che come quelle dell'Alta Italia, avessero m. 1,02 di diametro darebbero più di 6 giri al secondo ancorché fossero nuove, e le fibre sottoposte alla massima tensione si troverebbero dopo un dodicesimo di secondo già sottoposte al massimo sforzo di compressione; e dall'istante in cui le fibre sono maggiormente stirate a quello in cui incomincia uno sforzo contrario di compressione, non potrebbero passare quattro centesime parti di minuto secondo.

Non occorre certamente che io dica, come in queste circostanze la elasticità del ferro sia ancor più diminuita; e -su questo fatto più facile ad ammettersi che ad essere spiegato io potrei tutto al più ripetere ciò che ne disse Poncelet (10) il quale attribuisce la causa della elasticità alterata al troppo rapido alternarsi delle forze sollecitanti, sì che le molecole non avendo tempo di riprendere quella primitiva posizione di equilibrio, che senza dubbio ed esattamente riprenderebbero con un conveniente riposo, sono invece costrette a scostarsene e sempre più ad ogni oscillazione successiva. E potrei in appoggio citare alcuni fatti i quali recherebbero non poca sorpresa a chi non pensasse con quanta lentezza alcuni movimenti molecolari si compiono, massime quelli che riguardano gli spostamenti dovuti agli sforzi trasversali.

Anche questa influenza del movimento di rotazione sulla resistenza elastica alla flessione del ferro fu sperimentalmente trovata da Wöhler; ed operando dapprima su sbarre giranti ed inflesse secondo un piano costante, e poi addirittura sugli assi dei veicoli ferroviarii, trovò che novantanove mila giri bastavano a determinare la rottura, ancorché la tensione massima delle fibre estreme non avesse superato i 22 chilogrammi per millimetro quadrato, e dovette scendere-

poco alla volta in successive esperienze fino ad una tensione-massima di chilogr. 11,8 per terminare l'ultimo saggio (dopo 70 milioni di giri) senzachè la rottura si fosse avverata.

E notisi ancora che in tutte queste esperienze trattavasi solamente di vibrazioni ed oscillazioni prodotte da forze nei più moderati limiti della elasticità non alterata, e non ancora di quelle scosse così poco graziose, e di quegli urti inevitabili nei convogli in movimento, e che tanto si accrescono col crescere delle velocità.

Anche il freddo d'inverno parve avere una pernicioso influenza sulla rottura degli assi. Ed è un fatto che il numero delle rotture che si verificano nell'inverno supera generalmente quello dell'estate. L'Unione delle ferrovie tedesche segnalava nel 1867 60 rotture nei tre mesi più freddi, e 36 solamente nel trimestre d'estate; e nell'anno stesso le ferrovie prussiane, secondo le statistiche governative succitate, noveravano 35 rotture in inverno e 25 in estate.

Ciò vorrebbe da qualcuno attribuire ad una diminuzione di resistenza viva nel ferro, ed alcune esperienze (11) eseguite dal signor Sandberg, ispettore del materiale delle ferrovie svedesi pei ferri maggiormente adoperati in Europa per la fabbricazione delle rotaie, avrebbero dimostrato che alla temperatura di 12° centigradi sotto zero quei ferri oppongono agli urti una resistenza che è soltanto il terzo od il quarto di quella che essi oppongono alla temperatura di 29°; e questi limiti di temperatura non di rado si oltrepassano nei nostri climi. Tuttavia altri esperimenti eseguiti dal signor Styffe su ferri di prima qualità e sottoposti a forze lente di tensione e pressione avrebbero invece dimostrato che la resistenza assoluta del ferro di ottima qualità non deve essere alterata dai più forti freddi.

Altri invece attribuiscono più plausibilmente la causa alla minore elasticità che presenta la strada durante l'inverno, ed alle maggiori ineguaglianze prodottesi dall'azione del gelo. E ciò proverebbe ancor più i terribili effetti delle scosse, e come convenga ritenersi più prudenti nel cimentare le fibre

degli assi in esercizio agli sforzi limiti fissati dalle surriferite esperienze.

Trattandosi adunque di ferro forte e duro, come quello che serve per gli assi, comincio a stabilire che non si dovrebbe mai calcolare sopra una resistenza maggiore di chilogrammi 10 per millimetro quadrato tanto per la estensione che per la compressione; e ciò non ostante bisognerà pure (anche evitando i cambiamenti bruschi di sezione e gli spigoli vivi) tener calcolo in qualche modo delle scosse accidentali sì frequenti e sì grandi, e degli effetti del riscaldamento sulla rapida usura dei perni, coll'introdurre un coefficiente di sicurezza, che generalmente per le buone costruzioni meccaniche si dovrebbe assumere eguale a 4; ma quando non riesce possibile di farlo, come nel caso nostro, non dovrebbe almeno far discendere mai al disotto di 2.

VI. Stabilita così la resistenza massima cui conviene assoggettare le fibre del ferro perche la durata dell'esercizio non possa avere una sensibile influenza sullo snervarsi degli assi, passo a considerare quali forze agiscano effettivamente su di essi quando il convoglio è in movimento, cercandone la loro intensità e calcolandone gli effetti.

Finché un veicolo è in riposo, il carico che si suppone simmetricamente distribuito sul fondo della cassa, ed il peso di questa danno luogo ad una pressione verticale, la quale pesando su Ciascun asse, ed in due parti uguali ripartita sui perni, uguaglierebbe quella reazione verticale opposta dai regoli della strada, e che per mezzo delle ruote si trasmette all'asse. In questa supposizione il calcolo delle dimensioni da darsi al fusto dell'asse, che così diremo quella parte intermedia compresa fra le faccie interne dei mozzi, sarebbe assai speditamente ottenuta; trascurisi infatti l'influenza del peso dell'asse, come in tutti i casi faremo, ed il momento inflettente delle forze estrinseche P (fig. 4) rimarrà sempre lo stesso per rispetto a qualsivoglia sezione ab , trattandosi di una sola coppia il cui braccio l è uguale alla distanza fra le sezioni di mezzo del perno e del mozzo. Ba-

sterrebbe adunque fare un fusto di sezione circolare costante per assegnargli la forma razionale di un solido di egua resistenza.

Ma durante il tragitto, gli assi dei veicoli non sono solamente sottoposti all'azione di quella coppia; e senza volere tener conto dello sforzo di trazione che loro è trasmesso dalle piastre di guardia, e di quello di torsione che si manifesta talvolta per la solidarietà delle ruote coll'asse, come quando ad es. non fosse uguale su tutte e due le ruote la pressione dei freni, vi sono altre forze di più continuo effetto, e le quali provengono da quei due movimenti anormali di galoppo e di serpeggiamento, cui i veicoli in moto si trovano principalmente soggetti per le ineguaglianze della via.

VII. Il movimento di galoppo, che col suo nome stesso accenna ad una oscillazione del veicolo intorno ad un asse orizzontale trasverso alla strada, è capace di accrescere notevolmente ed alternativamente la pressione normale $2P$ che graviterebbe su Ciascun asse in riposo; ma quest'aumento di pressione manifestandosi ad un tempo su tutti e due i perni d'un medesimo asse, ha solamente per effetto un eguale aumento delle reazioni verticali dei regoli; e non alterandosi la simmetria nelle intensità delle forze, richiederà solo un aumento nel diametro della sezione cilindrica dell'asse per corrispondere al maggior momento della coppia.

È bensì vero che basterebbe supporre una ineguaglianza su di un regolo solo (come ad es. se la ruota passasse su di un giunto difettoso) per cagionare la ineguaglianza delle pressioni sui perni, e conseguentemente delle reazioni dei regoli. Dicendo P P'' le prime, Q' Q'' le seconde (fig. 5) queste quattro sole forze che per ora supponiamo operare sull'asse, saranno fra loro vincolate da due equazioni di equilibrio; e queste daranno i valori seguenti delle reazioni Q' e Q''

$$Q = P + (P' - P'') \frac{l}{L}$$

$$Q' = P' - (P' - P'') \frac{l}{L}$$

espressi in funzione di P e P' . Supposta così una dissimmetria nella intensità delle forze che sollecitano gli assi, come ha fatto prima di tutti lo Scheffler professore a Brunswick (12), varierà negli assi il momento inflettente da sezione a sezione; e se supponesi $P' > P''$ quel momento sarà massimo in M' ed avrà un valore $\mu' f'$ più grande del momento $\mu' g'$ corrispondente alla ripartizione simmetrica della medesima pressione totale; esso sarà minimo in M'' dove avrà un valore $\mu'' f''$ più piccolo di $\mu'' g'' = \mu' g'$; e poichè i momenti inflettenti andranno decrescendo da M' ad M'' secondo le ordinate di una linea retta $f' f''$, così il momento μf corrispondente alla sezione di mezzo, m sarà uguale alla media aritmetica dei momenti per le sezioni estreme, ed uguale in ogni caso al valore μf corrispondente alla pressione media $\frac{1}{2} (P' + P'')$ supposta operare sui due perni ad un tempo.

Ma questa ipotesi non basterebbe ancora a motivare l'ingrandimento delle sezioni dell'asse a partire dal mezzo e verso i due estremi; poichè potrebbe benissimo avvenire, che la causa della scossa verticale e dell'aumento di pressione sul fuso di sinistra che ne consegue, s'incontrasse contemporaneamente sul regolo di destra, e che perciò la retta dei momenti ritornasse parallela alle ascisse, elevandosi d'altezza sino ad $f' f''$. Non saranno dunque le scosse verticali, le quali potranno motivare un solo aumento di sezione in prossimità dei mozzì delle ruote.

VIII. Rimane a considerare il moto di serpeggiamento, ossia quel moto di oscillazione, che concepiscono i veicoli intorno ad un asse verticale e che loro è concesso dal giuoco esistente fra il cerchione delle ruote ed i regoli della strada. Or bene, se in virtù di quel movimento o per qualsiasi altra causa (e conviene parecchie) le due ruote di un asse sono costrette a battere l'una dopo l'altra vicendevolmente contro il proprio regolo al quale si appoggiano, si manifesterà parallelamente all'asse una reazione orizzontale R (fig. 4) del regolo della strada contro il cerchione della ruota. Or questa

reazione, come più sotto vedremo, ha pur essa per effetto di aumentare da una parte e diminuire dall'altra, sia la pressione P sostenuta dai perni, che la reazione verticale P opposta dai regoli; e manifestandosi alternativamente su di un regolo e poi sull'altro, tenderà a far cullare il veicolo, ossia ad imprimergli un terzo movimento anormale di oscillazione intorno ad un asse orizzontale parallelo alla direzione della strada; essa inoltre manterrà costantemente la dissimmetria nella intensità delle forze.

Vediamo adunque, e prima d'ogni cosa, come riescano ripartite le pressioni verticali sui fusi e le reazioni verticali dei regoli, non sì tosto si pone in giuoco questa forza orizzontale R .

Per ragioni di equilibrio tra le forze che sollecitano il sistema, la reazione R sarà uguale in intensità, e contraria in direzione, ad una azione del veicolo rappresentata da una forza R applicata al suo centro di gravità, ovvero dalle due componenti parallele, l'una R' applicata al centro di gravità G' della cassa caricata, e l'altra R'' applicata in G'' al centro di gravità dell'asse. Trascurando il peso dell'asse e delle ruote, e supponendo tutto il veicolo, svincolato dalle rotaie, epperò sotto l'azione delle forze $2P$ ed R' , R'' , R , Q' e Q'' sarà determinato l'aumento su P della forza Q' , e la diminuzione di Q'' , dal trasporto sull'asse $M'M''$ delle due forze R ed R' ; si introducono così due coppie cospiranti di momento Rr ed $R'h$, (con r è indicato il raggio delle ruote e con h l'altezza del centro di gravità G' su G'') alle quali coppie conviene assegnare il braccio L per potere immediatamente dedurre:

$$Q = P + \frac{1}{L} (Rr + R'h)$$

$$Q' = P - \frac{1}{L} (Rr + R'h)$$

Per determinare poi le pressioni P' e P'' esercitate dalla cassa del veicolo sui fusi, basterà svincolare questa cassa dall'asse e dalle ruote, sostituendovi le reazioni verticali dell'asse P e P'' che saranno rivolte all'insù, e la reazione orizzontale $R - B'' = R'$ rivolta da M' verso M'' . Si avrà così un sistema in equilibrio colle forze $2P$, P' e P'' e colla coppia di momento $R'h$, alla quale conviene dare il braccio $L + 2l$ per immediatamente dedurre:

$$P = P + \frac{R'h}{L + 2l}$$

$$P' = P - \frac{R'h}{L + 2l}$$

IX. Ed ora per farci un'idea del valore massimo cui possono assumere le forze P' e Q' per gli effetti combinati delle forze verticali ed orizzontali che si sviluppano nei movimenti anormali, bisognerà ancora ricorrere alle esperienze per determinare l'intensità delle forze verticali ed orizzontali.

L'influenza del movimento di galoppo fu accuratamente studiata sulla ferrovia Sassone-Boema (13) e ne risultò che l'aumento di pressione su Ciascun fuso può arrivare sino a

$$0,45 P.$$

Quanto al valore massimo delle pressioni orizzontali contro i cerchioni delle ruote, esso può dedursi dalle esperienze di Wöhler fatte sulla ferrovia della Bassa Silesia, dalle quali risulterebbe secondo i calcoli instituiti da Scheffler (14) che assumendo

$$R = 0,80 P$$

non si fa punto una cosa esagerata, poiché qualche volta potrebbesi ancor rimanere al disotto del vero.

Quanto poi ad R' riesce facile dedurne il valore da quello di R ; e diffatti le due componenti R'' ed R' , come le abbiamo supposte applicate, debbono necessariamente trovarsi nel rapporto del peso dell'asse colle sue ruote a quello del carico lordo. Or questo rapporto essendo di $\frac{1}{8}$ od assai prossimo ad esso, si avrà

$$R' = \frac{8}{9} R = 0,71 P.$$

E sostituendo i valori così assunti delle forze R ed R' , si otterranno le espressioni finali, che seguono, delle massime e minime pressioni verticali sui perni e sui regoli dovute ai due movimenti anormali.

$$\left. \begin{aligned} P &= P \left(1,45 + 0,71 \frac{h}{L+2l} \right) \\ P'' &= P \left(1,45 - 0,71 \frac{h}{L+2l} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} Q &= P \left(1,45 + 0,80 \frac{r}{L} + 0,71 \frac{h}{L} \right) \\ Q' &= P \left(1,45 - 0,80 \frac{r}{L} - 0,71 \frac{h}{L} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Per gli assi dei veicoli ferroviarii dell'Alta Italia (15), i quali sono riprodotti nelle figure 1^a, 2^a e 3^a, avendosi $r = 0^m,51$; $L = 1^m,50$; $L+2l = 1^m,907$ per gli assi delle serie A e C, ed $= 1^m,950$ per quelli della serie B; e supponendo infine $h = m. 1,20$, valore tutt'altro che esagerato poiché equivale a fissare il centro di gravità G' (fig. 4) della cassa e del carico a meno di cent. 50 sul fondo della cassa, si troverebbe:

$$P' = 1,9 P \qquad Q' = 2,3 P$$

$$P'' = P \qquad Q'' = 0,6 P$$

X. Sotto l'azione di queste forze l'asse del veicolo (fig. 5) è costretto a flessione, oltre alla compressione che subisce per l'azione della forza B . Trascuro l'effetto di quest'ultima, e scrivo il momento inflettente di quelle che trovansi a destra di una sezione qualunque ab posta alla distanza x dalla sezione M' :

$$\mu_x = P'l + (P'' - Q'')(L - x)$$

Avendosi $P'' > Q''$, il momento μ_x va manifestamente diminuendo col crescere di x , ossia coll'allontanarsi della sezione, che si considera, dal mozzo della ruota di sinistra; epperò nella sezione M' corrispondentemente ad $x = 0$ si avrà il valor massimo

$$P'l + (P'' - Q'')L = P(l + 0,4L)$$

e nella sezione di mezzo dell'asse corrispondentemente ad $x = \frac{L}{2}$, si avrà il valor medio:

$$P''l + (P'' - Q'')\frac{L}{2} = P(l + 0,2L).$$

Quando la ruota di destra verrà a sua volta respinta contro la propria guida, od ancora se la forza orizzontale R si esercitasse bensì contro la ruota di sinistra, ma in direzione opposta a quella della figura, ciò che potrebbe, per esempio, avvenire nell'incontro di una controguida, in tali casi la coppia di momento Rr cambierebbe il senso della rotazione, le maggiori pressioni e reazioni P' e Q' si manifesterebbero a destra, ed il massimo valore del momento inflettente si verificerà invece per la sezione M'' mentre per la sezione sul mezzo dell'asse il momento inflettente sarà ancora lo stesso, che abbiamo scritto più sopra.

Ne segue che la sezione più pericolosa dell'asse è preci-

samente quella in prossimità del mozzo, e se l'asse si costruisse, come nei primi tempi facevasi, con sezione costante per tutta la sua lunghezza, la rottura avverrebbe sempre come disfattis avveniva in quella sezione; si è per evitare questo pericolo e perchè l'asse presenti in tutte le sezioni una eguale probabilità di rottura, o per dir meglio, lo stesso grado di stabilità, che devesi far convenientemente aumentare il diametro dal mezzo verso gli estremi. Vediamo adesso di quanto.

Facciasi perciò il rapporto del momento inflettente nella sezione M' a quello nella sezione di mezzo m

$$\frac{l + 0,4 L}{l + 0,2 L}$$

esso è indipendente da qualsiasi carica, e rimarrà costante finché non varieranno L ed l , r ed h . Così sarà pure del rapporto $\frac{d_m}{d}$ dei diametri di quelle due sezioni (finché trascurasi la forza orizzontale R) bastando, come si sa, per avere questo secondo rapporto, estrarre la radice cubica dal primo.

Nel caso nostro il rapporto dei due momenti risulterebbe uguale ad 1,6 e quello dei due diametri eguale a 1,17. Or quest'ultimo si scosta di quantità trascurabilissima da quello che effettivamente risulta dalle dimensioni assegnate agli assi che abbiamo preso di mira (fig. 1^a, 2^a e 3^a).

XI. A costituire un vero solido di eguali resistenza tutte le sezioni intermedie dovrebbero avere un diametro successivamente crescente dal mezzo agli estremi, secondo le ordinate di una curva che ha per equazione

$$d^3 = d^3 \frac{l + 0,4(L-x)}{l + 0,2L}$$

Ma la curva, che segnerebbe in definitiva il profilo lon-

gitudinale dell'asse, scostasi sì poco da una linea retta che praticamente conviene e basta assegnare ad una sezione in prossimità della faccia interna del mozzo, quel diametro che il calcolo darebbe per la sezione M' sulla metà del mozzo, e poi costituire l'asse con due tronchi di cono riunitisi sul mezzo (fig. 2^a).

Osservisi per altro che gli effetti istantanei delle scosse, trasmesse dalle ruote agli assi, ed operanti per un intervallo brevissimo di tempo, non riusciranno mai a produrre un aumento di flessione in tutte le sezioni dell'asse, corrispondente al diametro assegnato, come senza dubbio avverrebbe in grazia di un aumento di pressione sui fusi graduato e di qualche durata, cosicchè risentiranno di preferenza il loro effetto quelle sezioni più vicine al mozzo che non quelle più distanti.

E se questa considerazione potesse introdursi nel calcolo, è cosa certa che il profilo del fusto di un asse di egual resistenza non presenterebbersi più con una curva tanto uniforme di raggio, e sì poco discosta da una linea retta; ma quella curva rivolgerebbe invece la sua convessità verso l'asse geometrico del fusto, e sarebbe maggiormente incurvata in prossimità delle ruote per distendersi invece verso il mezzo dell'asse. Sono parecchi anni che dallo stabilimento Krupp in Prussia Renana escono gli assi rinforzati in prossimità dei mozzi; ed in una recente locomotiva inglese, i cui disegni mi caddero per caso sott'occhi in questi giorni (15) si veggono appunto le sale delle ruote portanti contornate da un profilo longitudinale che rapidamente incurvandosi in prossimità delle ruote, dà luogo ad un rapido aumento del diametro dell'asse. Ed è per lo stesso motivo che mi sembrano in più eguali condizioni di stabilità *relativa*, epperò di profilo più razionale, quegli assi (fig. 1^a e 3^a) che si compongono d'un tratto cilindrico sul mezzo, e di due tronchi di cono di più breve lunghezza e che permettono un più rapido aumento dei diametri in prossimità delle ruote.

XII. Vediamo ancora quale relazione vincoli il diametro

dei perni a quello già calcolato del diametro massimo dell'asse. La pressione massima P' , quale ci è data dalla forinola (1), teoricamente parlando è uniformemente distribuita su tutta la lunghezza λ del fuso ed il suo punto di applicazione deve perciò ritenersi sulla sezione di mezzo F' (figura 5^a); ma in pratica è assolutamente impossibile di ottenere o per lo meno di mantenere una posa così esatta del guancialino sul perno; e durante il movimento, in causa del cullarsi del veicolo può benissimo avvenire che il punto di applicazione della massima pressione si scosti alquanto dalla sezione di mezzo F' e si manifesti più all'infuori. Ciò è tanto vero che perfino nei perni d'un qualsiasi asse di macchina fissa posato sui cuscinetti ordinarii si suppone da alcuni costruttori di macchine che la reazione del guancialino passi addirittura nella sezione estrema del perno, e per i veicoli ferroviarii ritiensi da molti ai nove decimi della lunghezza del perno a partire dalla sua sezione di origine contro il mozzo. Io credo invece si debba come caso più sfavorevole ammettere che la pressione riferita all'unità di lunghezza sia massima nella sezione estrema e nulla nella sezione d'origine, decrescendo proporzionalmente dall'una sezione all'altra secondo le ordinate di una linea retta. La

risultante P' passerà allora ai $\frac{2}{3}$ della totale lunghezza del perno a partire dalla sezione d'origine contro il mozzo. E con questa supposizione, che trovai avvalorata da moltissimi casi di rotture verificatesi sui perni e che ad ogni modo non si potrà mai dire esagerata, scrivo la seguente equazione di stabilità:

$$4R \frac{\pi \delta^3}{32} = \frac{2}{3} \lambda \cdot 1,9 P$$

ove δ e λ sono il diametro e la lunghezza dei due perni dell'asse. E volendo che questi si trovino nelle eguali condizioni di stabilità delle altre parti dell'asse, basterebbe in

teoria di scrivere la condizione

$$\frac{\delta^3}{\lambda^2} = \frac{1,27 \lambda}{1 + 0,4 L}$$

XIII. E qui si presenta innanzi tutto la questione se la lunghezza X dei fusi debba ritenersi indipendente dal loro diametro, oppure ad esso proporzionale. Gli ingegneri delle ferrovie tedesche, riunitisi in assemblea a Vienna nel 1857, stabilirono il minimo diametro dei fusi proporzionalmente al massimo diametro dell'asse, ed uguale ai due terzi di questo, il che equivale ad ammettere per i fusi una lunghezza X costante ed indipendente dal diametro δ . Ma è cosa ben più razionale ammettere che la lunghezza dei fusi debba variare in proporzione del loro diametro; e difatti, ove si ponga

$$\lambda = K \delta$$

nella surriferita equazione di stabilità, e si ricavi

$$\delta = \sqrt[3]{1,27 \frac{32}{\pi} \frac{P}{4R} K},$$

si scorgerà la possibilità di calcolare il diametro δ in modo da ottenere la voluta stabilità; qualunque siasi il valore di K primitivamente stabilito; epperò esso potrà sempre fissarsi in modo da soddisfare convenientemente a certe altre condizioni teoriche e pratiche, che più non riguardano la stabilità elastica, ma che non sono meno essenziali di quella, cercando cioè di attenuare il lavoro d'attrito, ed il riscaldamento e la rapida usura.

E poiché il lavoro d'attrito cresce proporzionalmente al diametro δ dei fusi, converrebbe, per renderlo minimo, scegliere per K il valore più piccolo possibile; diminuirebbero ad un tempo il diametro e la lunghezza dei perni, e senza

che ne riuscissero modificate le loro condizioni di stabilità, otterrebbero ancora una diminuzione di peso e di lavoro al tornio.

Ma col diminuire del volume dei fusi diminuisce pure la superficie di contatto coi loro guancialini; cosicché si accresce la pressione sull'unità di superficie, e si accresce ad un tempo la difficoltà di mantenere ben lubricate le superficie a contatto; i perni vanno perciò soggetti ad un più forte riscaldamento, e quindi sono molto rapidamente consumati. E si sa che l'esperienza ha consigliato oramai di sacrificare un pochino i vantaggi che derivano dai piccoli perni di breve lunghezza, e di dare a K un valore tanto più grande quant'è maggiore la velocità di rotazione.

Per altra parte le surriferite condizioni non sono poi così inconciliabili come potrebbe a prima vista parere; che il lavoro d'attrito cresce solamente in proporzione di δ , e la superficie di contatto tra guancialino e fuso, riuscendo proporzionale a K^2 ossia a δ^4 , cresce molto più rapidamente del diametro del fuso; con un piccolo aumento del diametro e nella lunghezza dei fusi è dunque possibile di offrire una sufficiente superficie di contatto al guancialino senza aumentare di molto il lavoro d'attrito.

XIV. Or questo valore di K , vorrebbe da Wiebe (16) determinato in funzione del massimo numero N dei giri da darsi in un minuto primo colla forinola:

$$K = \frac{1}{3} \sqrt[3]{N}$$

e purché lo si faccia per le piccole velocità non inferiore ad 1,3. Ma per i veicoli ferroviari otterrebbero così un valore di K un po' più grande di quello generalmente adottato. Colle ruote dei veicoli dell'Alta Italia, e con una velocità massima di 70 chilometri l'ora avrebbe $K = 2,4$ e con una velocità massima di 35 chil. si avrebbe $K = 1,9$. — Su qualche ferrovia tedesca, dove adottaronsi molto

saggiamente due tipi diversi, l'uno per i veicoli da viaggiatori e l'altro per i veicoli da merci, sulla ferrovia del Mecklenbourg ad es., avrebbe:

$$K = 1,76 \text{ per i carri, e}$$

$$K = 2 \text{ per le vetture.}$$

Le *Vereinbarungen* all'art. 159 ammettono il rapporto K compreso fra 1,75 e 2,25. Ed i tipi degli assi dell'A. I. stati indicati colle lettere A , B , C , e che noi abbiamo preso di mira, ci presentano rispettivamente:

$$K = 2,13 \quad 2,25 \quad 2,00.$$

Sotto questo aspetto considerati tutti quegli assi sarebbero dunque adattissimi per le grandi velocità.

Resta intanto dimostrato che il diametro relativo dei perni deve essere calcolato colla formola:

$$\delta = \sqrt{\frac{1,27 K d_m^3}{l + 0,4 L}} \quad (a)$$

anziché con quella di proporzionalità più generalmente adottata, ma che condurrebbe a dare a X un valore costante, e che sarebbe:

$$\delta = d_m \sqrt{\frac{1,27 X}{l + 0,4 L}} \quad (b)$$

Per i tre tipi succennati, e coi relativi valori di K testé calcolati, la formola (a) darebbe rispettivamente:

$$\delta = \text{min. } 73, \quad 77, \quad 76.$$

Cosicché stando alle dimensioni segnate sulle fig. 1^a, 2^a e 3^a

avrebbe ancora per gli assi in discorso un aumento nel diametro dei loro perni di:

$$\text{mm. } 2, \quad 3, \quad 9,$$

il quale ingrossamento serve in parte di compenso alla rapida usura. Tuttavia sarebbe stata ottima cosa che quell'aumento si fosse elevato nei due primi tipi a mm. 5, essendo una massima generalmente ammessa e conveniente di non cangiare gli assi se non quando il consumo dei perni ha raggiunto il 6 per cento del loro diametro primitivo.

Qualora poi si volesse fissare per λ il valore medio di mm. 180, come alcuni costruttori preferiscono fare, e stabilire senz'altro un rapporto di δ a d_m , per trovare questo rapporto ci basterebbe ricorrere alla forinola (*b*), e troverebbe a conferma delle nostre supposizioni e dei calcoli fatti:

$$\delta = 0,66 d_m$$

Or questo rapporto esattamente concorda con quello stabilito dall'Assemblea di Vienna nel 1857, di cui più sopra abbiamo fatto parola. Ed appigliandoci a questa regola affatto empirica gli assi dell'A. I. avrebbero senza dubbio i loro perni di diametro troppo piccolo per poter essere considerati come egualmente resistenti in tutte le loro parti. Ma poiché ad una forinola empirica, stata per di più dimostrata irrazionale, si debbono sempre preferire i dettami d'una teoria che ha ricevuto il consenso di una pratica illuminata; così noi riterremo che le dimensioni state assegnate a quei perni, assai bene armonizzano con quelle delle altre parti degli assi; ed osserveremo inoltre che pure nel tipo C, recentemente adottato sulle ferrovie francesi da Parigi al Mediterraneo, si è molto prudentemente largheggiato nella parte destinata ad essere consumata durante l'esercizio per causa degli attriti, e del riscaldamento.

XV. Rimane ancora a trovarsi il massimo sforzo al quale sarebbero effettivamente assoggettate le fibre di questi assi in esercizio e coi massimi carichi ordinariamente ammessi. Occorre perciò il valore di P, e sarà d'uopo determinarlo nei due casi distinti, di vetture da viaggiatori e di carri da merci.

Nel primo caso noi riterremo che il peso di una vettura scarica di 3^a classe con freno (17) pesa . Chilogr. 5700

Deducendo il peso degli assi colle ruote di » 1450

rimane il peso della sola cassa in . . . Chilogr. 4250

Quelle vetture possono contenere 40 persone, e ritenendo, dietro i dati dell'esperienza (18), che il peso medio d'un uomo è di chilogr. 70,

si avrà un sovraccarico massimo di . . . » 2800

Donde un peso che quando il veicolo è in riposo si ripartisce egualmente sulle quattro ruote di Chilogr. 7050

Epperò si potrà ritenere per le vetture:

$$P = \text{Chil. } 1760.$$

Trattandosi invece di un carro coperto per merci e bestiame con freno, esso pesa vuoto . . . Chilogr. 5300

Deducendo il peso degli assi colle ruote di » 1450

rimane il peso della cassa di Chilogr. 3850

Ed essendo la massima carica ammessa di » 8000

si avrà il peso che si ripartisce egualmente sulle quattro ruote in riposo di Chilogr. 11850

Si potrà dunque ritenere per i carri da merci, e rispettivamente per gli assi delle tre serie:

$$P = \text{Chil.}^i \quad \begin{array}{ccc} A & B & C \\ 2960 & 3330 & 3700. \end{array}$$

Tutte le sezioni indistintamente degli assi trovandosi, come abbiám dimostrato, in eguali condizioni di stabilità, basterà fare il calcolo per la sezione di mezzo, servendosi dell'equazione:

$$n R = \frac{32}{\pi d^3} (l + 0,2 L) P.$$

Ne risulterebbe che per i veicoli da viaggiatori le fibre degli assi in discorso si troverebbero cimentate rispettivamente alla resistenza massima riferita al millimetro quadrato:

$$n R = \text{Chil.}^i \quad 9,0 \quad 8,6 \quad 7,8;$$

e per i carri da merci avrebbersi invece:

$$n R = \text{Chil.}^i \quad 15,2 \quad 16,3 \quad 16,4.$$

XVI. In conclusione gli assi dei veicoli ferroviari, che ho preso ad esempio, hanno forme le più razionali possibili, e le proporzioni assegnate sono tali da presentare in ciascuna sezione le stesse condizioni relative di stabilità, essendo veri solidi di eguali resistenza, come la teoria prescrive, quando si considerano tutte le forze che sollecitano gli assi dei veicoli in movimento. Essi adunque dovrebbero rompersi indifferentemente dovunque o, per dir meglio, dove una qualche causa occasionale ed estranea alla teoria potrà determinarvi un primo cedimento. E se ciò nonostante, le rotture continuassero a manifestarsi più frequentemente in prossimità dei mozzi o nei fusi, ciò proverebbe ancor meglio di qualsiasi considerazione subordinata, che l'aumento eventuale delle pressioni, in virtù dei movimenti anormali del veicolo, può di frequenti oltrepassare il massimo limite adottato, e che i calcoli fatti, ed i risultati ottenuti, tuttoché sfavorevoli, sono ancora al disotto del vero; abbiamo visto diffatti come

il momento inflettente sulla sezione di mezzo non varii comunque si ripartisca una stessa pressione sui due fusi di un asse.

E quanto alle condizioni di stabilità assoluta, finché si tratterà di carrozze da viaggiatori, e si *presuppone la bontà di fabbricazione* degli assi, debitamente *accertata*, il ferro non riuscirà mai cimentato ad uno sforzo maggiore di 10 chilogrammi per millimetro quadrato, e potrà perciò indefinitamente resistervi, ancorché giri rapidamente il piano di sollecitazione delle forze; né similmente saranno da temersi più per gli assi che per le altre parti del veicolo, le inevitabili scosse, e tutte le altre cause deterioranti, abbenchè le dimensioni adottate non facciano luogo che ad un coefficiente di sicurezza (= 1,25) di poco superiore all'unità. Vi si potrà sempre ed efficacemente rimediare colla più diligente e continua sorveglianza dell'armamento della strada, segnatamente nelle curve, negli scambi e nei passaggi a livello. E sotto questo aspetto dovrebbe anche evitarsi lo scambio dei veicoli su ferrovie di scartamento anche poco diverso; poiché si eviterebbe una causa gravissima di deterioramento degli assi e di tutto il materiale circolante.

Ma trattandosi di carri da merci, e non ostante la notevole diminuzione di velocità, ed altre possibili precauzioni, la massima carica ammessa deve essere assolutamente e di molto diminuita. Uno sforzo continuo di 16 chilogrammi per millimetro quadrato non può in alcun modo essere a lungo sostenuto dalle fibre di un asse a ruote; ed ancorché non vi fossero scosse, quelle fibre sarebbero inevitabilmente snervate prima ancora che l'asse, per quanto gagliardo si voglia, abbia dato tre milioni di giri, ossia prima ancora che il veicolo abbia percorso diecimila chilometri.

Né vale il dire che la portata di otto tonnellate nei veicoli da merci deve ritenersi come cifra massima in rari casi raggiunta. *Basterebbe un solo caso, e basterebbero pochi chilometri di corsa per segnare sull'asse, ed irremediabilmente il limite della elasticità alterata.* Da quell'istante,

e bisogna convincersene, l'asse delle ruote dovrà dirsi *sprecato*; e la rottura potrà bensì avvenire in tempo più o meno remoto, in modo istantaneo, o lento, in luogo manifesto od occulto, potrà essere prevedibile o non esserlo; dovrà bensì dipendere ancora da un'ultima causa occasionale qualunque, che non avrà mai bisogno di invito ad intervenire; ma sarà *inevitabile*, precisamente com'è inevitabile il decesso nei corpi viventi non sì tosto un vizio organico si manifesta e si svolge; non vi sarà più in sostanza che una sola questione, e sarà una pura e semplice questione di tempo.

E se poi si nota, che la carica massima anzidetta è frequentemente raggiunta, se non superata, nei continui trasporti di carbone, e che i veicoli da merci sono quelli precisamente che più soffrono le scosse, rese più grandi ancora dalla minore elasticità delle molle di sospensione e di trazione e dei paracolpi, ed accresciute di numero nelle complicate manovre; sarà forza conchiudere, che la buona conservazione degli assi di ferro, colle attuali dimensioni esige imperiosamente una notevole diminuzione nella massima portata dei veicoli da merci. Questa diminuzione di carico dovrebbe essere senz'altro adottata dall'Amministrazione ferroviaria, poichè è nel suo diretto interesse.

Ed io la ritengo altresì una indispensabile misura di pubblica guarentigia, e di sicurezza, massimamente in Italia, dove *pur troppo vediamo che il trasporto cumulativo di persone e di merci nei così detti convogli misti si va ogni dì generalizzando ed estendendo quasi fosse dovunque una assoluta necessità del servizio.*

1° aprile 1872.

G. SACHERI.

NOTE

(1) PERDONNET. *Traité, élémentaire des chemins de fer*. Vol. II, pag. 369 della 3ª edizione.

(2) ALLEGMEINE. *Bestimmungen zur Sicherung des Betriebes auf den Preussischen Staats- und unter Staats-Verwaltung stehenden Privat-Eisenbahnen*.

(3) COUCHE. *Voie, matériel roulant et exploitation technique des chemins de fer*. Vol. II (1º fascicolo, 1870, a pag. 112).

(4) *Comptes-rendus de L'Académie des Sciences*, 1861.

(5) F. JACQUIN. *Machines à vapeur*.

(6) COUCHE. Opera citata, a pag. 112 del vol. II.

(7) PERDONNET. Opera citata, a pag. 570 del vol. II.

(8) *Nachrichten von dem preussischen Eisenbahnen*. Dal vol. XV risulta che nell'anno 1867 su 117,206 assi se ne ruppero appena 66 (cioè il 0,056 per cento), e di queste 66 rotture appena tre si verificarono su veicoli da viaggiatori.

(9) *Zeitschrift für Bauwesen d'Erbkam*, 1863 e 1866. Molte esperienze sulla resistenza del ferro e dell'acciaio, furono fatte ad invito della Direzione delle ferrovie della Bassa Silesia e della Marche a Francfort sull'Oder dal signor Wohler, ingegnere capo del materiale, il quale s'ingegnò di riprodurre più specialmente con esse le condizioni di resistenza degli assi dei veicoli ferroviarii.

(10) PONCELET. *Introduction à la mécanique industrielle*, 2ª édition, pag. 295.

(11) *Technologiste*. Giugno ed agosto 1869.

(12) OPPERMAN. *Portfeuille des machines*. Ottobre e dicembre 1864.

(13) WEBER. *L'exploitation des chemins de fer au point de vue technique*, pag. 130.

(14) Le figure e le dimensioni relative ai tipi degli assi dell'Alta Italia si riprodussero da alcuni disegni litografati per conto della Società, redatti dall'ingegnere capo dell'Ufficio Studi, cav. Frescot, ed approvati dall'ingegnere in capo del materiale e della trazione cav. Peltier. Essi furono trasmessi in dono dalla Società ferroviaria alla Scuola di Applicazione degli Ingegneri di Torino.

(15) *Express Passenger Engine — Great Northern Railway (Portfolio of Working Drawings*. N. 47, 48, sept. nov. 1871).

(16) WIEBE. *Die Lehre von der Befestigung der Maschinentheile*, Berlin 1854 a pag. 264.

(17) CAVALLERO. *Atlante di macchine a vapore con leggenda*. Edizione 2ª a pag. 273 e seg.

(18) HACHETTE. *Tratte élémentaire des machines*. Paris, 1819, pag. 40.