

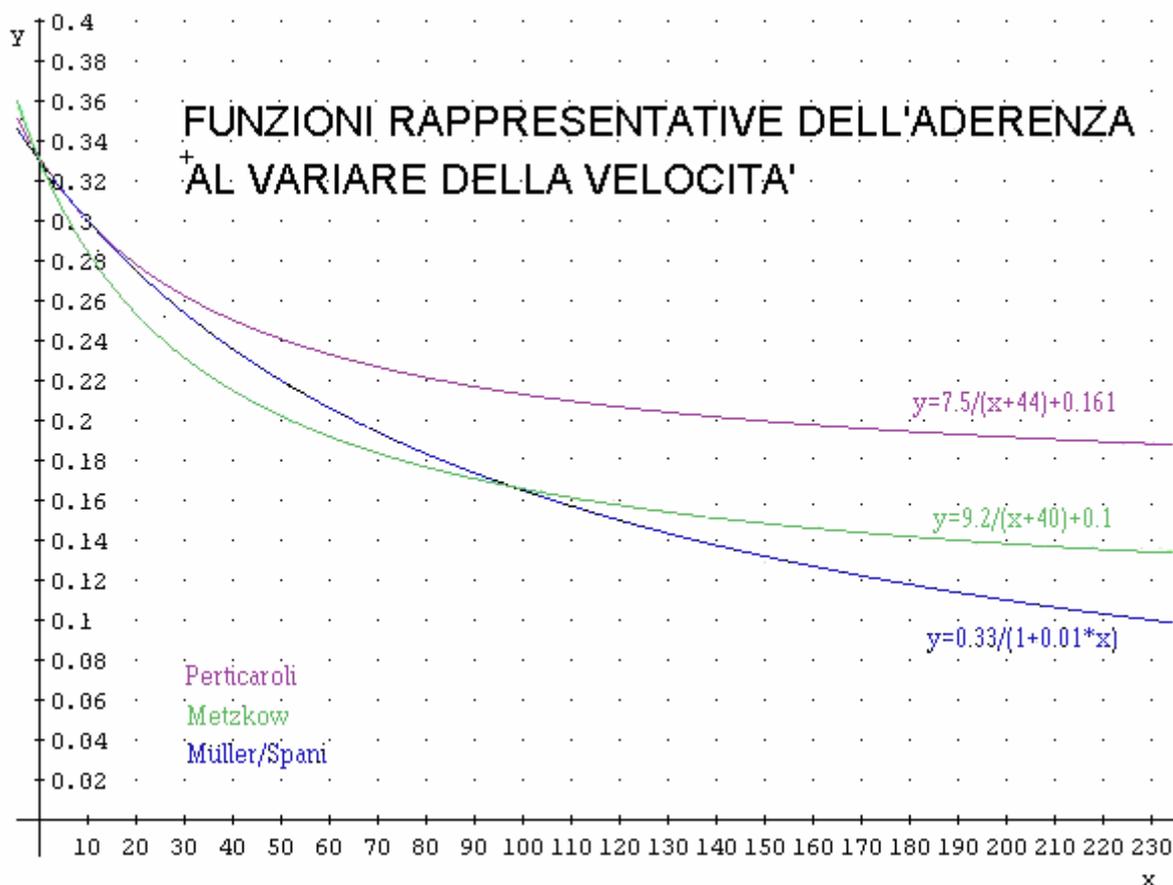


MaxBrakeForce (15)
Adhesion (0.2)
DerailRailHeight ()
DerailRailForce ()
DerailBufferForce ()
Numwheels (8)

**La Lavagna
degli
Specialisti**

Osservazioni sull'aderenza dei rotabili

Di Renzo Omodei



OSSERVAZIONI SULL'ADERENZA DEI ROTABILI

di Renzo Omodei

1) IL CONCETTO DI ADERENZA

Chiarisco in parole semplici cosa si intende per aderenza: si tratta della percentuale di peso **gravante sulle ruote motrici** che può essere trasformato in forza di trazione, senza slittamento.

Se ammettiamo un'aderenza ('Adhesion' per TS) di 0.25, un locomotore di 120t aderenti potrà sviluppare uno sforzo massimo alle ruote di $120t * 0.25 * 9.8 = 294kN$, **anche se il motore potesse darne molti di più**. Superando il limite di 294kN del nostro esempio, **c'è slittamento delle ruote motrici** e, per raggiungere lo sforzo massimo, è necessaria la sabbia.

Il fattore 9.8 trasforma le tonnellate/sforzo in KiloNewton, unità di misura ufficiale per lo sforzo. Omettendolo lo sforzo rimarrebbe in tonnellate (usate per le macchine a vapore, e anche elettriche, almeno fino all'E444), falsando tutti gli eventuali calcoli susseguenti, ad esso connessi modernamente; **quindi va sempre applicato** per trasformare un peso in tonnellate in uno sforzo in kN. Insomma, dire 10t/sf o 98kN è la stessa cosa, ...ma i numeri sono diversi!

Nei locomotori moderni tutti gli assi sono motori ed **il peso aderente coincide con quello totale**; in quelli più vecchi e nelle locomotive a vapore si hanno spesso **differenze anche grandi**, per la presenza **di assi puramente portanti**. L'esempio più spinto è quello dell'E326, di ben 114.4t lorde, ma di appena 60t aderenti (solo il 52.4% del peso totale). I calcoli relativi alla prestazione di questo tipo di macchine vanno fatti sul **peso aderente**; la rimanenza ...è peso morto. Se l'aderenza dell'E326 fosse 0.24, questa macchina potrà scaricare sul binario un massimo di $60t * 0.24 * 9.8 = 141.12kN$ (**e non** $114.4t * 0.24 * 9.8 = 269kN$), con grande pregiudizio per l'accelerazione.

2) LE PRIME OSSERVAZIONI

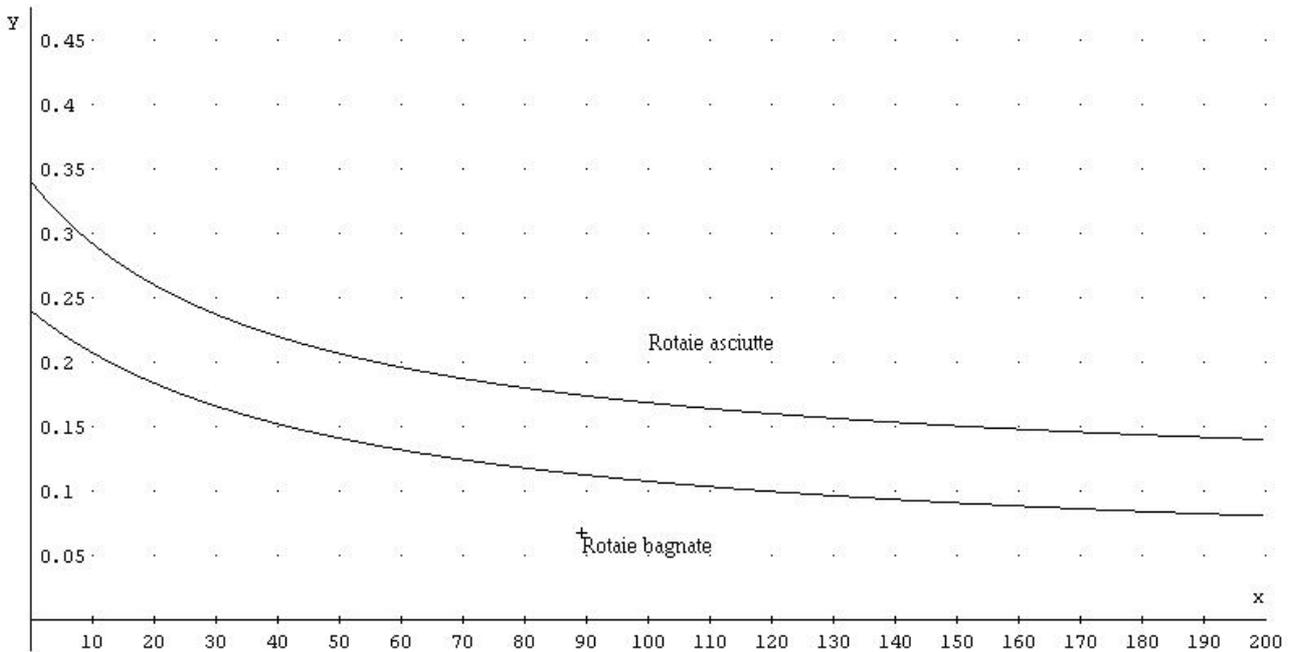
Ho letto recentemente diversi stralci di trattati o di lezioni universitarie, sul problema dell'aderenza, tenuti da docenti di primissimo piano, dalla fine dell'800 ad oggi , cui farò diretto riferimento nella bibliografia a fine lavoro. Segnerò anche il link da cui si possono scaricare.

Loria (1892) e **Tajani** (1928) ignorano ancora che l'aderenza **non sia costante**, ma decresca all'aumento della velocità, ed assumono dei valori medi per macchine a vapore ed elettriche, limitandosi a fare distinzione fra binari asciutti (valori massimi) e binari in condizioni degradate da umidità, foglie marcie, o ghiaccio (valori minimi). I valori **medi** di aderenza, per questi autori, vanno da 0.15 per macchine a vapore, fino a 0.2 per macchine elettriche. Tajani segnala valori di punta fino a 0.27, ma non dice a quale velocità siano stati registrati. Del resto, con i bassi sforzi massimi di allora, non era semplice verificare slittamenti ad alte velocità, proprio perché le potenze disponibili non erano sufficienti allo slittamento. La macchina non slittava a velocità medie **...perché non aveva abbastanza sforzo per farlo**.

Gli stessi autori riportano un gran numero di dati sperimentali, pur non prendendo in considerazione il concetto di aderenza decrescente. Il Tajani comincia ad applicarlo solo alla frenatura. Le loro opere in questo settore hanno quindi un valore soprattutto storico.

3) LE FUNZIONI RAPPRESENTATIVE CLASSICHE

Il Müller esegue i primi esperimenti in merito sulle ferrovie del Gottardo e del Lötschberg con locomotori monofase delle SBB, ricavando delle funzioni rappresentative che verranno riprese dal Maternini e dallo Spani negli anni '70. Il Metzkwow, nel 1934, propone le sue funzioni, riportate dal Corini, nella sua opera basilare per il lettore italiano, attorno al 1950; eccole:



I dati sperimentali si riferiscono a velocità fino ad 80km/h; per velocità maggiori ci si doveva accontentare dell'extrapolazione statistica, con i vantaggi ed i limiti ad essa connessi. E' quindi solo **probabile** che l'aderenza continui a scendere, o lo faccia al ritmo ricavato dall'extrapolazione, ma senza prova certa, dagli elementi sperimentali che si possedevano. Le formule statistiche servono ad interpretare la realtà secondo il nostro modo di ragionare, ...non certo a costringerla.

Le equazioni rappresentative di Metzkwow sono le seguenti:

Rotaie asciutte: $y = 0.1 + 9.6 / (x + 40)$

Rotaie bagnate: $y = 0.04 + 10.2 / (x + 51)$

dove sull'asse x vengono riportate le velocità in km/h e sull'asse y le corrispondenti aderenze.

A 60 all'ora, l'aderenza è poco inferiore a 0.2, ma se volessimo il valore esatto, dobbiamo calcolare:

$y = 0.1 + 9.6 / (60 + 40) = 0.1 + 0.096 = 0.196$ con rotaie asciutte

$y = 0.04 + 10.2 / (60 + 51) = 0.04 + 0.102 = 0.142$ con rotaie bagnate

Per le macchine a vapore, **a trazione discontinua, per il motore alternativo e la trasmissione a biella e manovella**, peggiorata dalla conseguente marcia a zig zag, l'aderenza scende all'80% dei valori in diagramma, per macchine a 4 cilindri, ed al 70% per quelle a 2 cilindri, che risentono maggiormente dei difetti appena menzionati.

Quindi una Gr685, a 4 cilindri, avrebbe, sempre a 60 all'ora:

$0.196 * 0.8 = 0.1568$ all'asciutto

$0.142 * 0.8 = 0.1136$ all'umido

Una Gr740, a 2 cilindri, dovrebbe accontentarsi di:

$0.196 * 0.7 = 0.1372$ all'asciutto

$0.142 * 0.7 = 0.0994$ all'umido

^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

Maternini e Spani, negli anni '70, riprendono la funzione del Müller in due varianti leggermente differenti, ma concordanti nella sostanza:

$y = a / (1 + 0.011*x)$ per Maternini

$y = a / (1 + 0.01*x)$ per Spani (un filo più ottimista)

Il parametro **a** è proposto a 0.35, e rappresenta l'aderenza **a ruote ferme** nelle migliori condizioni. Va detto che, negli anni '70, le migliori macchine (E646 e derivate ed E444) avevano (ed hanno) l'avviamento a serie/parallelo, quindi un tipo di trazione **non perfettamente continuo** e

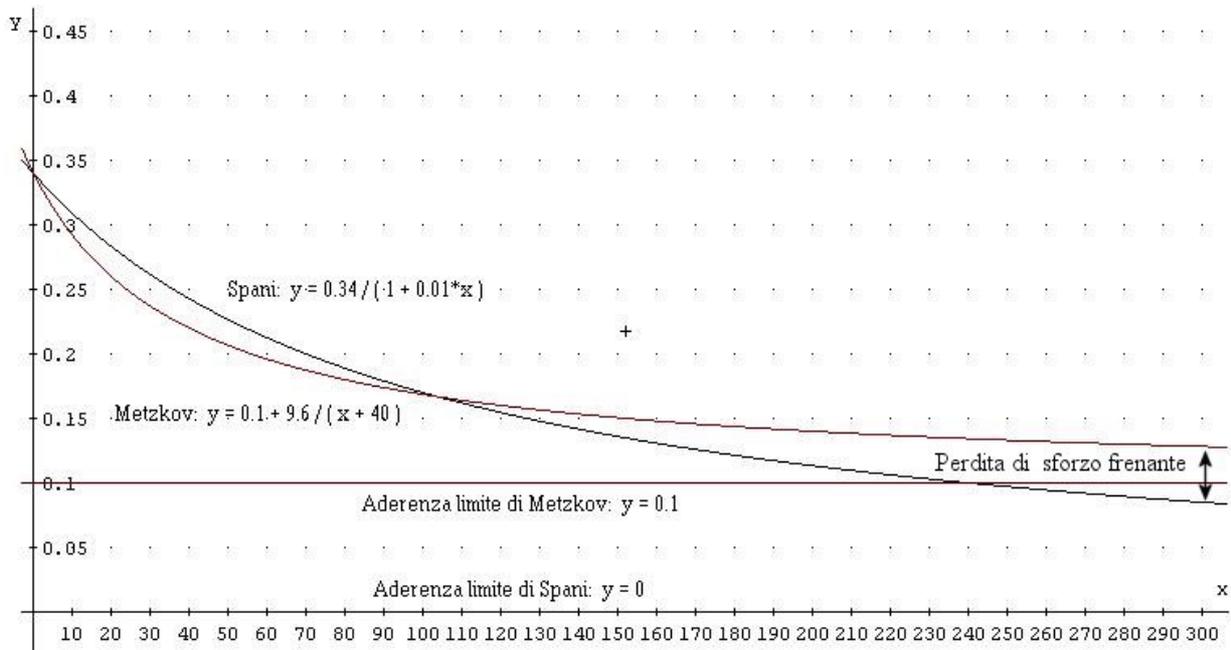
caratterizzato ancora da ‘strattoni’ al momento dell’esclusione delle resistenze, o del cambio di collegamento dei motori.

Assumendo come base la variante di Spani (...un filo di ottimismo non fa male in mancanza di certezze) per $a = 0.34$, si ottiene il seguente confronto:

$$y = 0.1 + 9.6 / (x + 40) \text{ di Metzkow}$$

$$y = 0.34 / (1 + 0.1 * x) \text{ di Müller/Spani}$$

Per rotaie umide basterà moltiplicare i risultati per 0.7.



La debolezza della formula di Müller/Spani può sfuggire ad una osservazione superficiale; essa è **fortemente penalizzante in frenatura alle alte velocità**, in quanto decresce molto più rapidamente di quella di Metzkow. A 300 all’ora, velocità **oggi** all’ordine del giorno, danno i seguenti risultati:

$$y = 0.1 + 9.6 / (40 + 300) = 0.128 \text{ per Metzkow}$$

$$y = 0.34 / (1 + 0.01 * 300) = 0.092 \text{ per Müller/Spani}$$

Si deduce che la formula di Müller/Spani conceda uno sforzo frenante iniziale massimo pari a circa il 72% di quanto concesso da quella di Metzkow. Evidentemente Müller si è preoccupato di descrivere il fenomeno **nel migliore dei modi per le velocità ‘normali’ di allora** ed il problema della frenata è estraneo al suo lavoro. Metzkow, proponendo il minimo di aderenza a 0.1 (vedi asintoto orizzontale nel grafico), ne ha tenuto più conto, ...precorrendo i tempi! (siamo nel '34!).

Passando ad un esempio pratico, accettando la funzione di Müller, una carrozza di 45t, lanciata a 300 all’ora, non potrebbe sopportare una frenata **iniziale** superiore a $45t * 0.092 * 9.8 = 40.6kN$, pena lo strisciamento delle ruote, con tutte le conseguenze, anche imprevedibili, che ne potrebbero seguire. Adottando lo 0.128 di Metzkow, i kN iniziali salirebbero a $40.6 / 0.72 = 56.4kN$, valore migliore, ma non decisivo, volendolo applicare anche all’alta velocità.

4) IL PROBLEMA DELL'IMPRONTA

Fino oltre il Corini è dato per certo che **la velocità comprometta l'aderenza, ma non se ne dà una spiegazione chiara del perché.**

Nelle testo del Maternini (1973) viene sviluppato l'importantissimo concetto di **impronta, prodotta dalla ruota sul binario dal peso assiale**. In due parole, una ruota metallica, poggiante su un binario, produce **una piccola deformazione ellittica**, avente una certa superficie, che permette l'aderenza ruota/binario (molto evidente nei pneumatici). Spani pubblica la seguente figura:

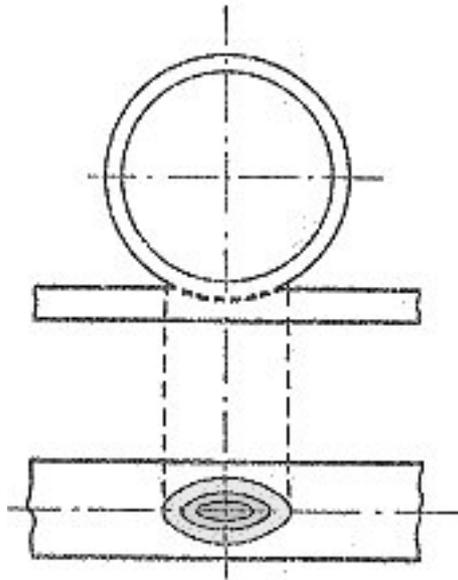


Fig. 15

Maternini afferma che l'impronta cresce col peso assiale, ma **in misura sottoproporzionale**. Lo Spani quantifica, affermando che le dimensioni dell'impronta sono **direttamente proporzionali alla radice cubica del peso assiale**, per cui, se un peso di 5t produce un'ellisse avente gli assi di 20mm * 13mm e quindi un'area di 204mm², un peso di 10t produrrà un'impronta di 25.2mm * 15.4mm ed un area di **sol** 300mm², in sostanziale accordo con questa tabella di Maternini:

In pratica si hanno ad esempio i valori di cui al prospetto sottoriportato:

Diametro	Peso aderente	Superf.impronta	Pressione specif.
D = 1000 mm	P = 5,1 t	S = 209 mm ²	$\sigma = 24,4 \text{ kg/mm}^2$
D = 1000 mm	P = 10 t	S = 293 mm ²	$\sigma = 34,4 \text{ kg/mm}^2$
D = 2000 mm	P = 5,1 t	S = 286 mm ²	$\sigma = 17,8 \text{ kg/mm}^2$
D = 2000 mm	P = 10 t	S = 399 mm ²	$\sigma = 25,4 \text{ kg/mm}^2$

Risulta che, una ruota di maggior diametro, produce un'impronta maggiore e che una macchina ad 8 assi da 5t ha un'impronta **complessiva** maggiore di una a 4, **a parità di peso aderente**. Inoltre, l'aumento della pressione specifica si risolve sostanzialmente in un danno per l'armamento.

Se l'impronta non incidesse sull'aderenza, questo discorso sarebbe puramente una curiosità, ma lo stesso Maternini (autore **semplice e molto chiaro!**) aggiunge questa interessante affermazione:

Questa variazione dell'aderenza con la velocità sembra apparentemente non trovare una spiegazione logicamente sufficientemente esauriente, dato che, come si è detto, quando si verifica l'aderenza, non sussiste moto relativo fra le superfici a contatto. Tuttavia ci si può rendere conto della circostanza, pensando che in pratica l'impronta che la ruota lascia sul piano di rotolamento in corrispondenza al punto di contatto e che ha una superficie massima a ruota ferma, tende a diminuire coll'aumentare della velocità della ruota, poichè manca il tempo necessario per una completa formazione dell'impronta stessa. Recentissime esperienze avrebbero nuovamente messo in discussione la variabilità dell'aderenza in funzione della velocità.

In sostanza **la velocità di per sè non riduce l'aderenza!**, ...ma solo la superficie dell'impronta, che, a sua volta, riduce l'aderenza. Se questo è vero, è altrettanto vero che l'aderenza dipende, **in parte, anche dall'area delle superfici a contatto.**

Facendo un salto avanti di mezzo secolo, viene da pensare che la tanto discussa E402b andrebbe meglio con ruote un po' più alte, **come dicono diversi macchinisti**, avendo potenza da vendere e quindi non subirebbe alcun pregiudizio dalla conseguente riduzione di sforzo massimo di 280kN. Non potrebbe comunque trasmetterlo tutto sul binario, se non per ben pochi giri di ruota, quindi a bassissime velocità. (vedi Applicazioni)

Ruote da 1.32 farebbero scendere lo sforzo massimo da 280kN a $280kN * 125 / 132 = 265kN$, secondo me del tutto adeguati al peso della macchina, ma farebbero aumentare la velocità massima da 220 a $220 * 132 / 125 = 232km/h$, utilizzabile ai fini di una riduzione del numero dei giri, a pari velocità.

5) IL RAPPORTO FRA GLI ASSI ED IL CABRAGGIO

Vicuna, autore moderno, dà questa tabella con valori medi, di applicazione molto semplice e chiara:

VALORI DEL COEFFICIENTE DI ADERENZA

TABELLA 7. 1

Tipo di trazione	Coefficiente
Trazione elettrica con assi accoppiati	$f = 0,25 = \frac{1}{4}$
Trazione elettrica con assi liberi; trazione Diesel con assi accoppiati	$f = 0,20 = \frac{1}{5}$
Trazione Diesel con assi liberi; trazione a vapore con assi accoppiati	$f = 0,167 = \frac{1}{6}$

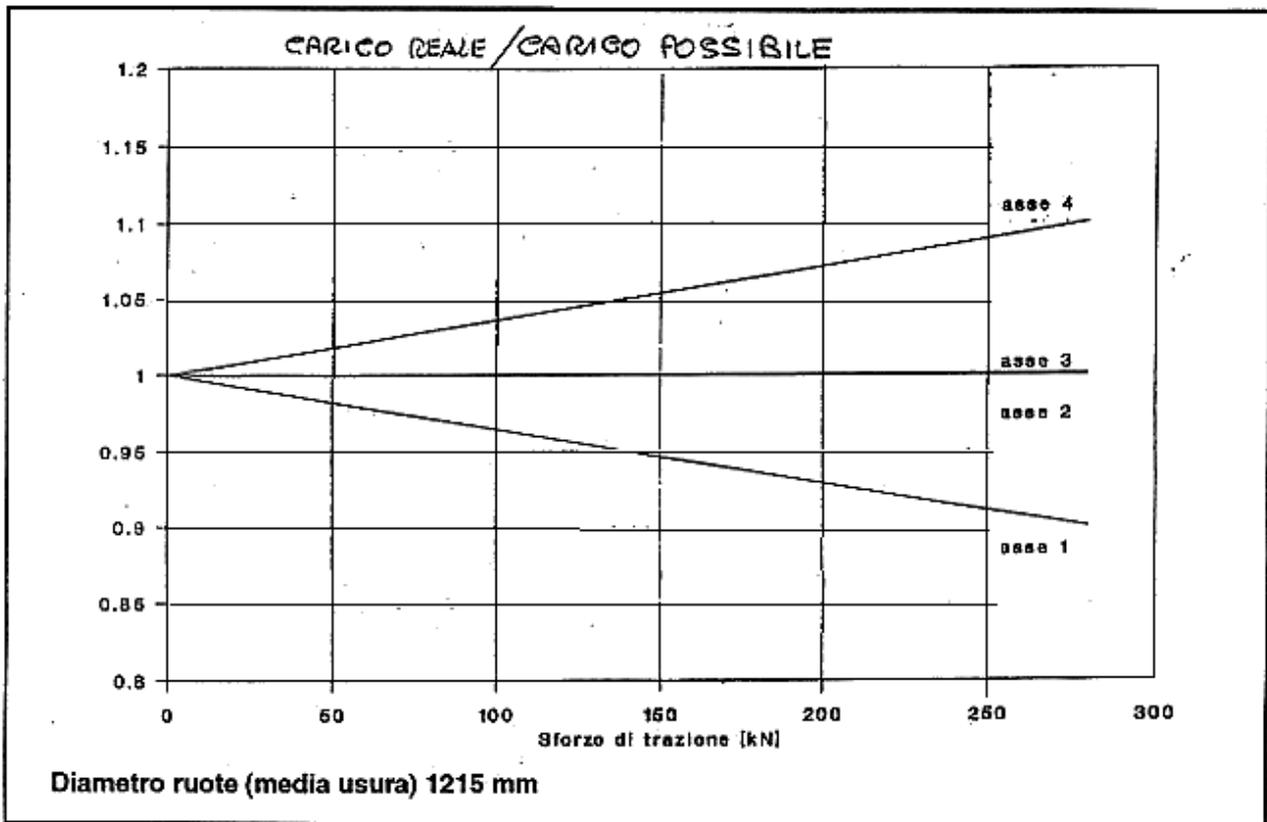
dove si evidenzia l'importanza dell'accoppiamento degli assi per una migliore aderenza e l'inferiorità della trazione diesel diretta, rispetto all'elettrica, quanto ad aderenza.

Sempre sul tema dell'accoppiamento degli assi, Maternini spiega il fenomeno del cabraggio (di chiara origine ...aeronautica). Il fenomeno è tipico delle macchine a rodiggio Bo Bo, oppure Bo Bo Bo, in cui, durante accelerazioni un po' spinte, il locomotore tende a scaricare il proprio peso aderente sull'asse posteriore, alleggerendo quello anteriore, con complessiva riduzione dell'aderenza, a causa del ...tentativo di decollo del locomotore.

Qui sotto una rappresentazione **semplice e chiara** del fenomeno, su una E402b

E402b

Variazione del carico verticale sugli assi per effetto del cabraggio



Quindi la mobilità dei carrelli non favorisce l'aderenza, ripartendola in modo diseguale sugli assi motori. Le locomotive a passo rigido lungo o con impostazione del rodiggio non su carrelli (...tipo la vecchia E326 ed alcuni locomotori trifase classici) sono avvantaggiate in questo senso. I carrelli sono però la miglior soluzione per l'iscrizione in curva ad alta velocità ed il cabraggio **...diventa un male necessario.**

La cosa sembra contraddire addirittura il progresso tecnico nella costruzione dei carrelli, ma, a ben pensare, qualcosa di rigido meglio si applica ad una superficie rispetto a qualcosa di mobile. E' noto, del resto, che il vecchio E326, con tutte le pecche che poteva avere, (baricentro troppo alto, passo rigido di oltre 5m) fosse portato magari al deragliamento, ma non certo allo slittamento; inconveniente spesso lamentato per l'E428, a 2 semicasse e, quindi, già impostato su una soluzione a carrelli, per gli assi motori.

Il fenomeno del cabraggio è spiegato in modo più approfondito dal Maternini, qui sotto. E' riferito ad una macchina a 4 assi e si comprende facilmente che, per un 6 assi, il problema permanga, in forma ancor più complessa.

(1) - Si ricorda che nelle locomotive la resistenza del carico rimorchiato, uguale ed opposta allo sforzo di trazione al gancio, agisce in direzione del moto ed è parallela al piano del ferro (piano di rotolamento delle ruote) ad una altezza di circa un metro dal piano stesso; questa resistenza, rispetto al punto di contatto delle ruote sulle rotaie, determina un momento che tende ad abbassare, sovraccaricandoli, gli assi posteriori ed a sollevare quelli anteriori del veicolo (effetto di cabraggio - fig. 3).

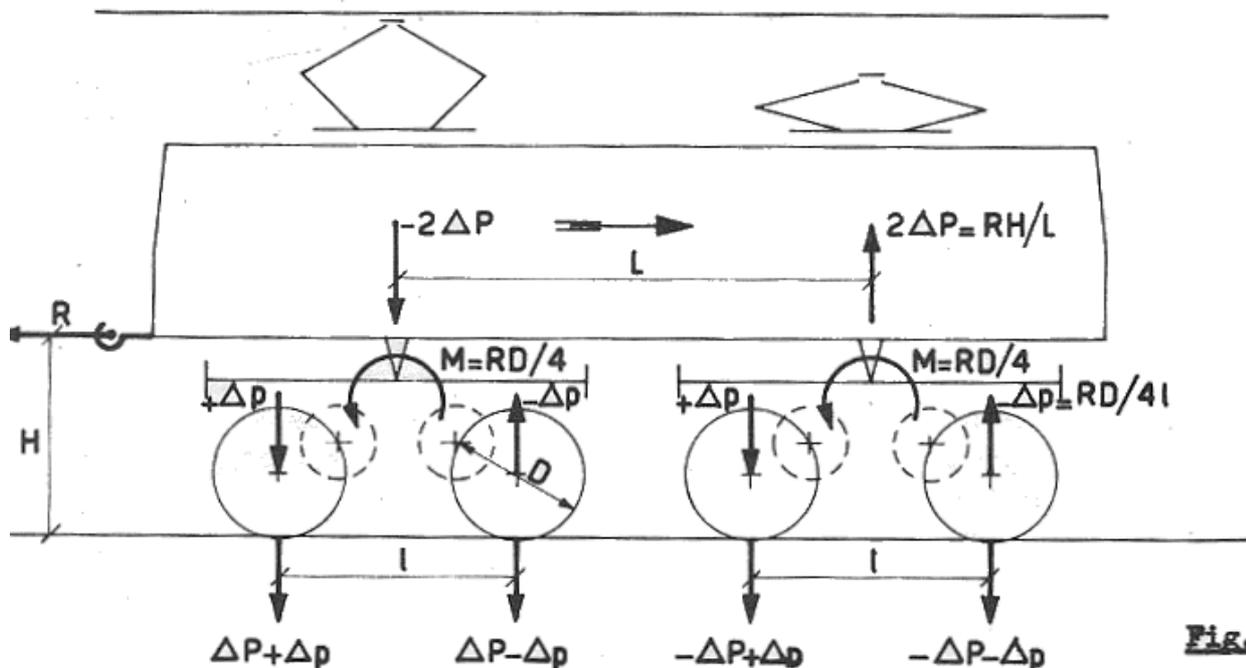


Fig. 3

Schema di variazione dei carichi per effetto di cabraggio in un locomotore elettrico a quattro assi motori indipendenti. (R - resistenza del carico rimorchiato, applicata al gancio di trazione; H - altezza del gancio di trazione dalle rotaie; L - distanza fra i perni dei carrelli; l - passo dei carrelli; D - diametro delle ruote). Il primo asse anteriore risulta alleggerito da un carico $2\Delta P = R H/L$; il secondo e il terzo asse, intermedi, non subiscono alcuna variazione di carico; il quarto asse, posteriore, risulta sovraccaricato di $2\Delta P$. Per i massimi valori di R , in avviamento, la variazione di carico $2\Delta P$ può superare anche il 10% del carico P gravante sull'asse motore.

I 6 assi Bo Bo Bo sono la tipica manifestazione della filosofia ferroviaria italiana.

Hanno l'ottima caratteristica di avere un peso assiale abbastanza contenuto, tirare bene ed essere poco aggressivi per l'armamento. Non sono velocissimi, ma il servizio pesante, anche su linee acclivi, cui sono spesso destinati, non richiede grandi velocità; piuttosto **una buona prestazione in tonnellate trainate**. Necessitano però di dispositivi anticabraggio per uniformare il peso aderente su tutto il rodiggio; problema risolto negli anni '70, nei limiti concessi dal rodiggio stesso.

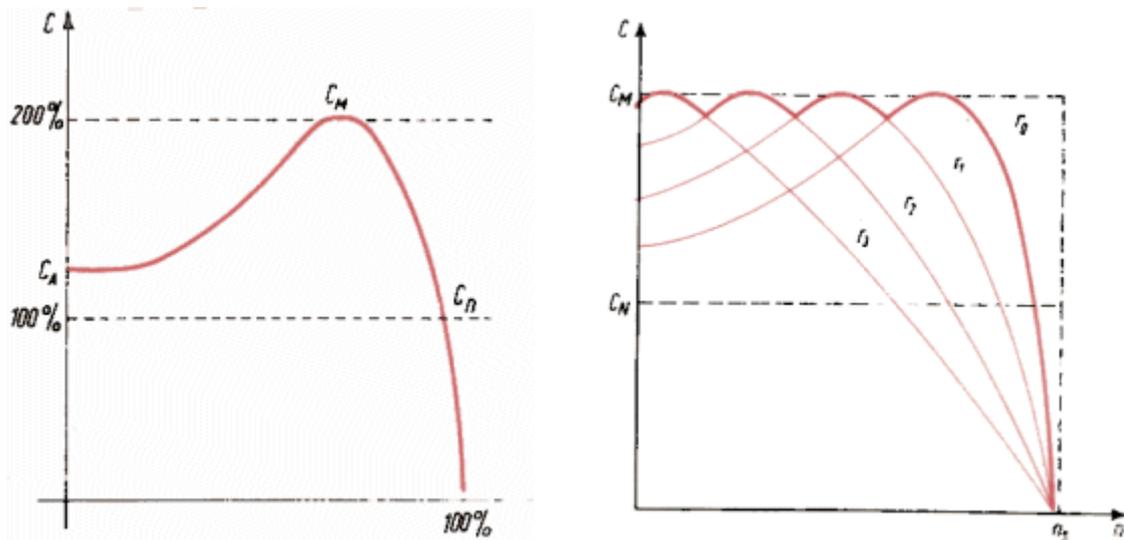
Attualmente questo rodiggio non pare più riscuotere il favore degli anni passati per motivi 'europei'. Pare che all'estero queste macchine **non piacciono** (... forse perché non le hanno?!) e preferiscano valorizzare i 4 assi superpotenti (... ed a volte superslittanti), o i 6 assi **Co Co**, ottimi nel tiro, velocità ed aderenza, ma altrettanto **devastanti** per l'armamento, a causa del carrello **lungo** a 3 assi.

Il carrello a 3 assi era già stato sperimentato in Italia, prima della messa in produzione degli E656, ma **subito** abbandonato (E666), per i grossi problemi che avrebbe posto la progettazione di un simile rodiggio, e per gli effetti negativi che avrebbe, comunque, prodotto sull'armamento.

6) LA RIVOLUZIONE ELETTRONICA

Sotto è rappresentato lo schema semplificato di avviamento di un vecchio motore asincrono trifase. Come si vede a sinistra, la caratteristica naturale di questo motore mal si adatta alla trazione, per **il basso spunto e la potenza crescente**. (...più un motore da automobile di per sé!).

E' quindi necessario intervenire con un reostato, che, riducendo la frequenza della corrente, riduce **provvisoriamente** la velocità di sincronismo ed aumenta lo sforzo di avviamento. L'avviamento avviene col reostato inserito al massimo, particolarmente se il carico è elevato; raggiunta la prima stabilizzazione di velocità, si riduce il reostato, e così fino al suo distacco totale, in prossimità della naturale velocità di sincronismo. Poi il motore farà tutto da solo, aumentando o diminuendo lo sforzo in relazione della conformazione della linea, **ma tendendo a mantenere velocità costante**. Qui l'avviamento è a **strattoni**, anche più forti di quelli della C.C.



Il diagramma seguente mette in evidenza che la variazione di velocità nell'E656 non avviene ancora nel continuo, ma è piuttosto **un grande perfezionamento** dell'azionamento a serie/parallelo, con ben 4 collegamenti principali, caratterizzati ciascuno da un complesso sistema di resistenze.

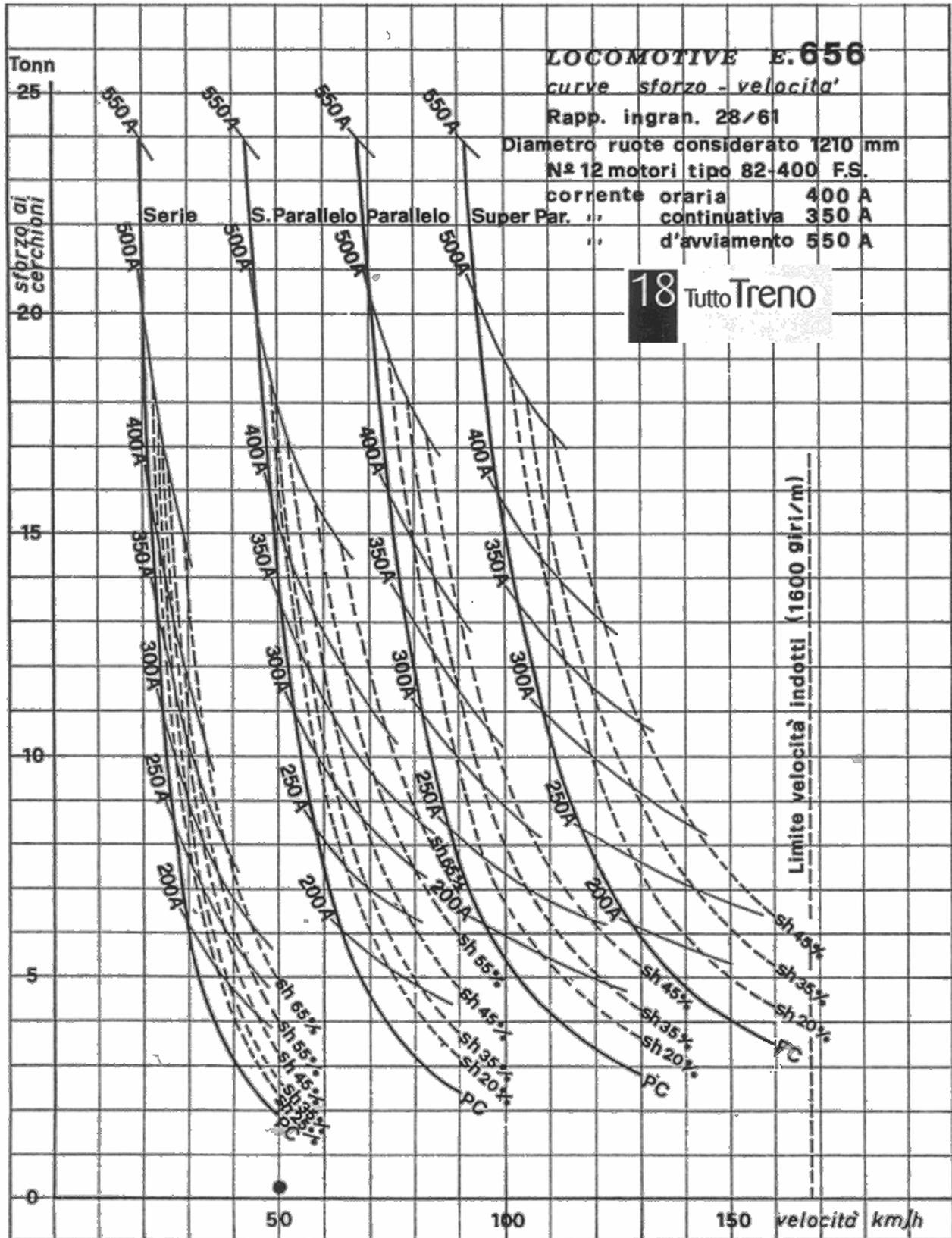
Il progresso rispetto alle macchine d'anteguerra è **enorme**: l'E636 e l'E424 avevano un numero molto minore di velocità economiche, ...ma anche un diagramma caratteristico molto più semplice! L'avviamento è molto più lineare di quello dei vecchi locomotori a CC e l'assorbimento di potenza, particolarmente alle alte velocità, sale a livelli superiori all'80%, grazie ai diversi gradi di indebolimento di campo. **Lo sfruttamento dell'aderenza è senz'altro superiore**.

Osservando attentamente il grafico, al giorno d'oggi, viene da pensare che la grande complessità del sistema stia denunciando **anche i propri limiti** e prelude ...ad una rivoluzione.

Gli 'strattoni' sono ridotti al minimo, **...ma ci sono ancora**; sono connaturati nel sistema serie/parallelo e, seguendo questa filosofia, non potranno mai essere eliminati del tutto.

Viene da pensare al sistema Tolemaico che, pur essendo sufficientemente preciso nei calcoli astronomici, era **spaventosamente** più complicato di quello Copernicano, che raggiungeva risultati anche migliori, con calcoli molto più semplici. La rivoluzione elettronica eliminerà la tecnologia della serie/parallelo, ponendo al centro il **controllo** dei motori, piuttosto che il loro **collegamento**.

Diagramma con le curve caratteristiche meccaniche

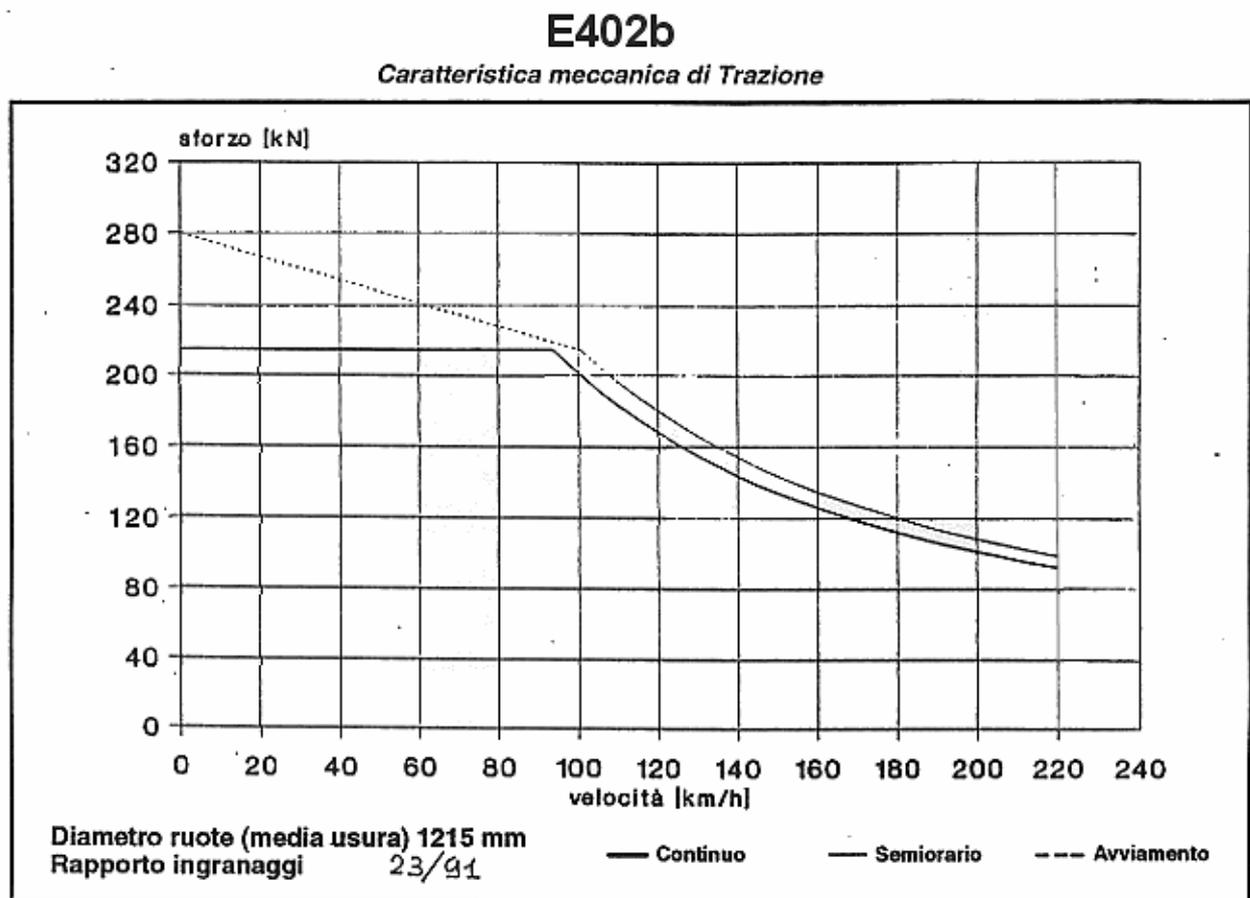


Con l'avvento delle E632/633/652 degli anni '80, avviene anche in Italia la **seconda rivoluzione**, dopo quella della trazione elettrica sul vapore. **Il controllo elettronico della potenza** permette un avviamento **nel continuo**, con grande giovamento sull'aderenza, fino al 10%. I primi passi sono difficili per l'applicazione pratica della novità, **ma l'idea rappresenterà un passo avanti decisivo**.

Le macchine a serie/parallelo, collaudate da 50 anni, sono ancora più sicure ed affidabili, ma vengono a trovarsi in una situazione di **potenziale inferiorità**, simile a quella in cui si trovarono le macchine a vapore nei loro confronti, tanti anni prima; seppure la differenza non sia altrettanto grande. **Ritorna di prepotenza il trifase** che, domato dall'elettronica nelle sue bizzarrie di caratteristica, mostrerà tutta la sua grande superiorità sulla corrente continua (E402, E464 ecc.!), che si manifesta, soprattutto, nel **maggior rendimento alle alte velocità**.

La sperimentazione del nuovo sistema a controllo elettronico darà alla fine ragione alla nuova idea.

Qui sotto la curva sforzo/velocità dell'E402b, praticamente una retta negativa per l'avviamento ed una **perfetta iperbole** verso la velocità di regime. Un po' come confrontare la trasmissione di un camion con 4 marce e 3 ridotte per marcia, con quella di un Vespa 500 ...automatico!



Eccezionale la curva di sforzo/velocità, che permette i 6000kW orari anche al massimo della velocità. Inoltre questo sistema di trazione **nel continuo** dà un avviamento automaticamente adattabile alle condizioni decrescenti di aderenza della linea.

Che poi si sia esagerato (...o commesso qualche errore) nello sfruttarlo, ...è un altro discorso!

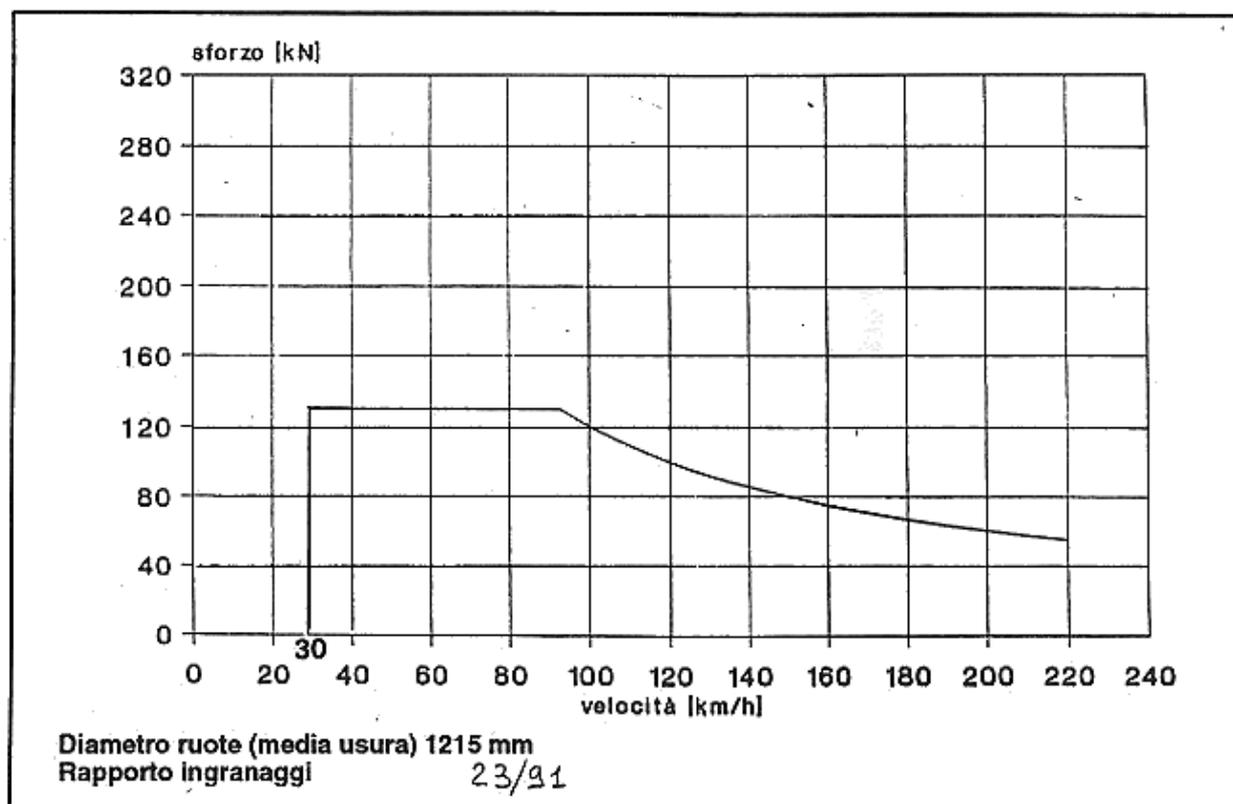
Stando sull'E402b, che verrà analizzata anche in seguito, è altrettanto interessante il seguente diagramma, che mostra come l'intensità della frenata elettrica aumenti al diminuire della velocità per poi cadere repentinamente a 0, a 30 all'ora.

Resta però da stabilire, per me, se il valore minimo, di poco meno di 60kN, sia voluto in sede di progettazione, o se non è più alto semplicemente perché l'impianto ...non ce la fa a far meglio.

Letto **di per se stesso** depone per la decrescenza dell'aderenza all'aumento della velocità.

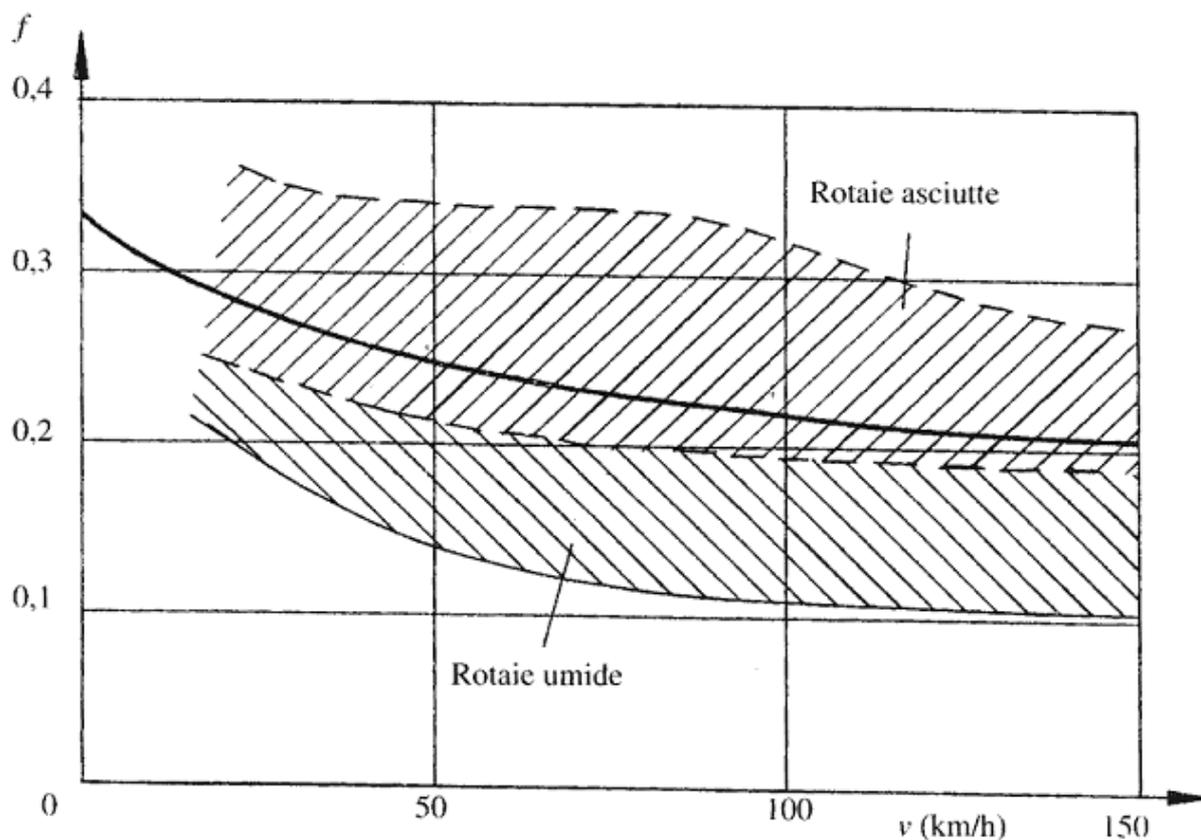
E402b

Caratteristica meccanica di Frenatura



7) FUNZIONI DI ADERENZA MODERNE

Un autore più moderno, il **Perticaroli**, propone di fare riferimento agli esperimenti di Curtius e Kniffler, del 1943, e sottolinea (anche lui!) **la grande importanza del collegamento in parallelo dei motori**, durante l'accelerazione, quindi la superiorità del controllo elettronico in accelerazione, che avverrà senza 'strattoni'. Il diagramma è il seguente, **in condizioni medie**:

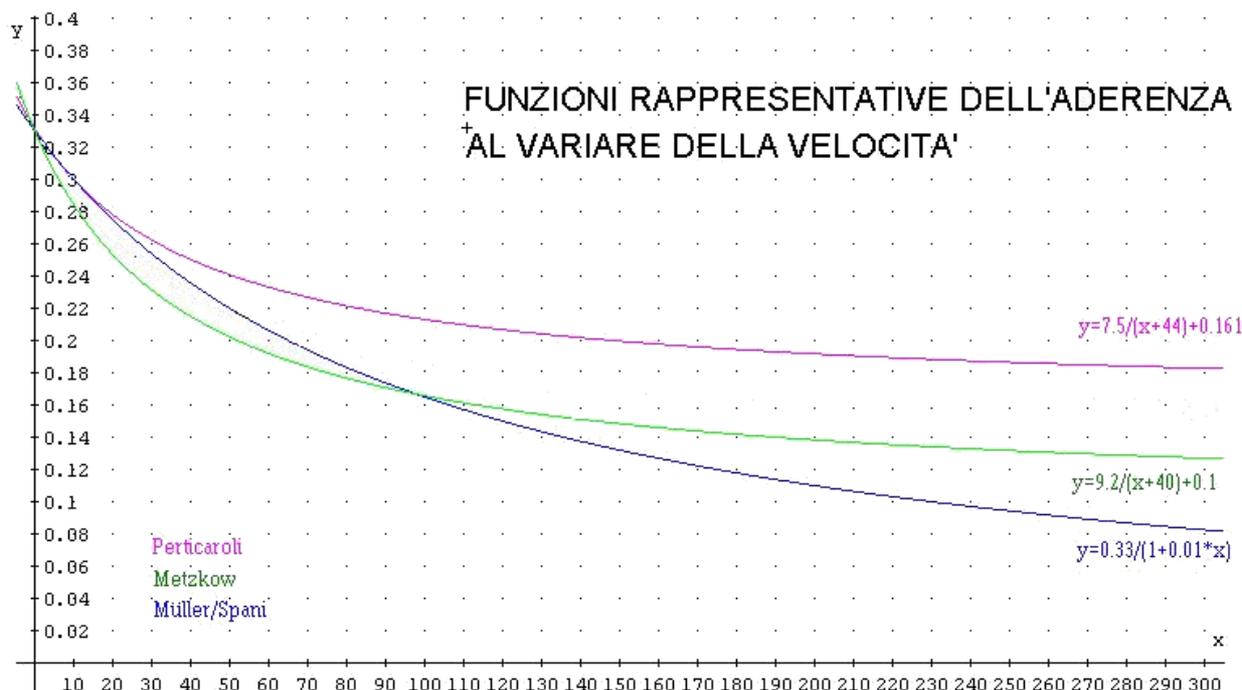


leggermente più ottimistico della funzione proposta: $y = 7.5 / (x + 44) + 0.161$,
 che a 150 all'ora darebbe : $7.5 / (150 + 44) + 0.161 = 0.2$

Perticaroli sostiene **una decrescenza molto meno rapida dell'aderenza** all'aumento della velocità, frutto sicuramente delle nuove esperienze effettuate **dopo** il Müller ed il Metzkw. **E' questa la grande novità**, che dovrebbe rispondere alle esigenze di accelerazione e frenata dell'alta velocità.

L'aderenza disponibile per la nostra carrozza a 300 all'ora diventerebbe:
 $y = 7.5 / (300 + 44) + 0.161 = 0.183$ in condizioni **medie**, quindi
 $45t * 0.183 * 9.8 = 80.7kN$, ottimi per l'impianto frenante per l'alta velocità

Ecco un confronto immediato fra la funzione di Perticaroli e quelle classiche:



Tenuto conto che Perticaroli parla di valori medi, conviene creare un vero **intervallo di aderenza**, adattabile a tutte le locomotive elettriche, che va da un massimo di 0.36 ad un minimo di 0.3. Le costanti corrispondenti diventano 8.8, 7.48 e 6.16 ed il limite 0.16; quindi:

$y = 8.8 / (x + 44) + 0.16$; controllo elettronico in condizioni buone
 $y = 7.48 / (x + 44) + 0.16$; serie/parallelo, condizioni buone o elettroniche, condizioni medie
 $y = 6.16 / (x + 44) + 0.16$; serie/parallelo in condizioni medie o macchine ...vecchiotte.

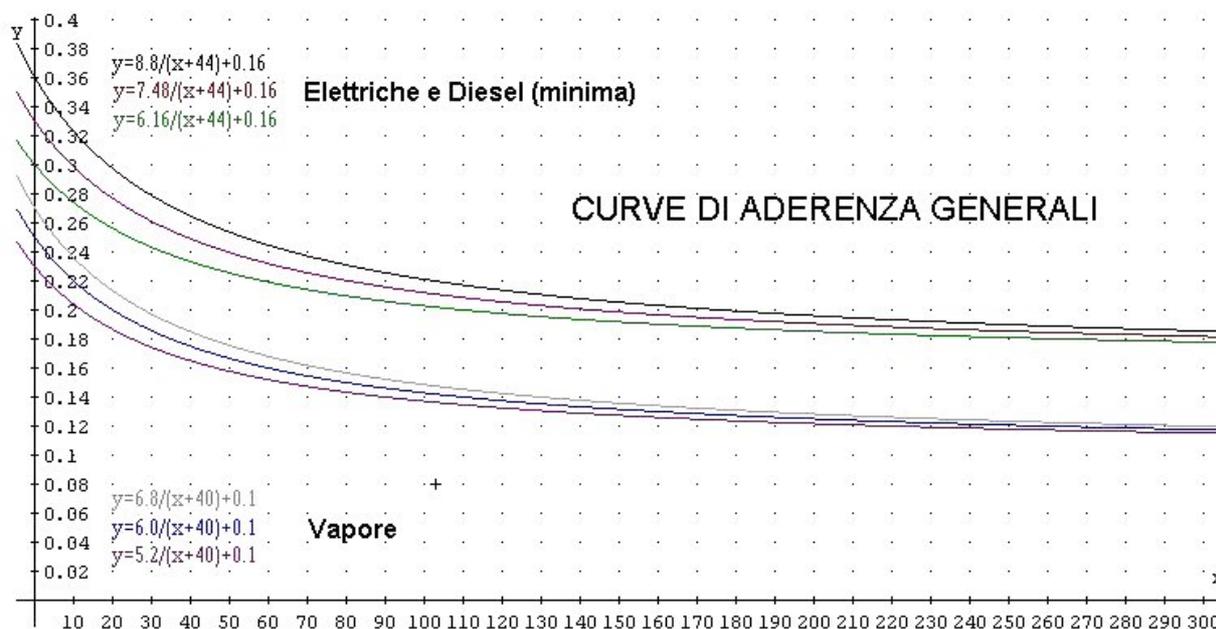
Per la vecchia **trazione trifase a reostato** non esistono formule specifiche ma, da quanto afferma il Tajani nel 1928 circa l'aderenza media delle macchine elettriche (e nel '28 erano trifasi!) era 0.2; la loro aderenza si dovrebbe avvicinare a quella della terza formula derivata da Perticaroli.

Propongo anche le formule per il vapore, ricavate da Metzkw, con riduzione a circa 80%, 70% e 60%, mantenendo l'aderenza minima a 0.1, anche per poter effettuare immediati confronti:

$y = 6.8 / (x + 40) + 0.1$; 4 cilindri, o 2 cilindri a 5 assi motori moderne, in condizioni buone
 $y = 6.0 / (x + 40) + 0.1$; 2 cilindri in condizioni buone o 4 cilindri in condizioni medie
 $y = 5.2 / (x + 40) + 0.1$; 2 cilindri in condizioni medie o macchine ...vecchiotte

L'inserimento delle 5 assi moderne (si fa per dire!) nel primo gruppo si giustifica, perchè queste macchine hanno un rapporto **sforzo massimo / peso aderente** più elevato delle altre (oltre 2.7), per cui la tesi dell'impronta trova piena giustificazione. (Gr480 FS e Gr482, austriaca)

Adotterò pertanto sempre queste 6 formule, per determinare a quale velocità minima i vari tipi di locomotive potranno sfruttare tutta la loro potenza senza slittare e quali saranno le potenze massime erogabili al di sotto tale velocità. Naturalmente ci si dovrà accontentare di un **intervallo** di scelta, in quanto, come ho già detto non si può forzare la realtà, **ma solo meglio interpretarla.**



8) CONCLUSIONI GENERALI

Vediamo le considerazioni generali degli ing. Canale/Leonardi/Nicosia, alcune note, altre molto interessanti, in quanto possono essere delle novità per diversi lettori:

- 1) essendo le ruote dei veicoli ferroviari calettate rigidamente all'assile, possono verificarsi slittamenti su una delle due ruote che possono far sì che nella marcia in curva il coefficiente f_x risulti minore che in rettilineo;
- 2) il materiale acciaioso di cui sono costituite le due superfici a contatto influenza il valore di f_x : in particolare f_x diminuisce con la tenacità e la durezza dell'acciaio, poiché, a parità di peso, si hanno minori aree d'impronta e quindi maggiori pressioni specifiche sulla rotaia;
- 3) l'umidità delle superfici di rotolamento, nonché la patina costituita da sostanze interposte sulla rotaia (fango, lubrificanti, ecc.) diminuiscono il coefficiente f_x ;
- 4) l'acqua diminuisce il coefficiente f_x quando è in piccola quantità e si mescola alla patina preesistente (rotaie umide); lo aumenta od almeno lo riporta al valore corrispondente a rotaie asciutte quando è in quantità tale da ripulire la rotaia dalla patina (rotaie lavate);
- 5) l'interposizione di materiali duri (tipo la sabbia silicea) aumenta il coefficiente f_x fino a valori superiori a quello di rotaie asciutte (fino a qualche tempo fa si incrementava artificialmente il coefficiente di aderenza a mezzo di lanci di sabbia (a mezzo di opportuni ciettori ad aria compressa) sotto le ruote motrici o frenanti);
- 6) il passaggio di corrente elettrica nell'area di contatto fra ruota e rotaia migliora il coefficiente di aderenza, in quanto dà luogo ad un riscaldamento locale che favorisce il contatto medesimo.

Gli stessi autori sottolineano il concetto di **aderenza media del veicolo** e sostengono che questo è il **valore pratico di riferimento**. In sostanza una macchina a 2 assi perfettamente equilibrati, ciascuno con aderenza 0.25, è **più affidabile** di un'altra con aderenze di 0.27 e 0.23. La media aritmetica è la stessa ma, quando l'asse più debole slitta, ...coinvolge tutta la locomotiva e **l'aderenza media diventa in pratica quella peggiore**.

In realtà queste condizioni ideali non si verificano mai almeno per 3 ragioni:

- 1) il coefficiente di aderenza può essere diverso per i vari assi motori (o frenati) dello stesso veicolo, o per una delle cause precedentemente elencate, oppure perché le superfici di rotolamento (specie le rotaie) possono trovarsi in condizioni diverse. L'esperienza suggerisce che, per rotaie umide, il coefficiente f_k è più basso per il primo asse motore e migliore per gli assi successivi (nel senso di marcia), ma che per rotaie asciutte può invece verificarsi il contrario;
- 2) la ripartizione α_i del peso sugli assi motori non è mai uniforme: in pratica se n è il numero degli assi aderenti, su ogni asse dovrebbe gravare esattamente un peso P_{ad}/n , ciò che non è mai possibile per ragioni costruttive; per di più al variare della forza di trazione, varia anche la ripartizione iniziale del peso sui vari assi (per F positiva, si caricano maggiormente gli assi posteriori);
- 3) neppure la forza di trazione F_{tot} , nel caso di assi indipendenti, si ripartisce esattamente tra i vari assi, perché più motori, anche se dello stesso tipo, non danno mai coppie motrici esattamente uguali; analogo inconveniente può verificarsi per le forze frenanti.

Tutto ciò porta a delle conclusioni, alcune anche imprevedibili, sui fattori che massimizzano o compromettono l'aderenza, **anche in riferimento ai parametri di TS:**

- 1) **La velocità riduce l'area dell'impronta**, ma le conseguenze sull'aderenza sono molto meno devastanti di quanto pensassero gli sperimentatori d'anteguerra ed il Perticaroli lo afferma chiaramente nella funzione che propone.
- 2) **Il minimo di aderenza ha un limite:** 0.161 circa, sotto il quale non dovrebbe più scendere. Questo dovrebbe essere in sintonia con l'alta velocità. Se l'aderenza scendesse secondo la curva di Müller/Spani, in particolare, o anche di Metzkow, a velocità molto alte sorgerebbero problemi di frenatura **molto gravi**, per il blocco anticipato delle ruote.
- 3) Le macchine a 4 assi, sempre ritenute superiori a quelle a 6 assi in termini di aderenza **a parità di peso aderente** (anche TS si comporta così), per la minore probabilità che un asse possa slittare e per la maggior semplicità costruttiva, producono un'impronta di area **complessiva minore** di quelle a 6 assi, perdendo praticamente i vantaggi sopracitati.
- 4) **Le macchine a ruote alte hanno maggiore aderenza di quelle a ruote basse**, e questo può sembrare sorprendente! In realtà una ruota alta produce una maggior impronta di una bassa... Lo sforzo massimo, a parità di motore, sarà sempre minore per la ruota alta, per motivi meccanici, ma questo non tocca il problema dell'aderenza. Sicuramente, se diamo ad una Gr625 (1.51) un'adhesion di 0.16 in TS, dovremo dare almeno 0.17 ad una Gr640 (1.85)
- 5) **Il rapporto di trasmissione non influisce sull'aderenza, con ruote di pari diametro;** tuttavia un rapporto più corto **eleva lo sforzo massimo proporzionalmente**, avvicinandolo a quello di slittamento, imponendo una guida più attenta in accelerazione.
- 7) **L'avviamento elettronico migliora significativamente lo sfruttamento dell'aderenza.** Questo è sostenuto da tutti gli autori che ho letto e dev'essere **un dato certo**. Se poi la solita

E402b slitta, la causa sta nell'aver esagerato nel richiederli certe prestazioni, o qualcosa non funziona come dovrebbe. Il problema è di regolazione della centralina o della variazione del diametro delle ruote, o del baricentro, **non certo imputabile all'elettronica in se stessa.**

- 8) **Il motore alternativo peggiora notevolmente le condizioni di aderenza;** le macchine a vapore si trovano molto a malpartito; i vecchi trifase hanno la trasmissione a biella triangolare, che provoca la contrappesatura delle ruote **e ciò non promette nulla di buono** in termini di aderenza. Dovrebbero avere valori minimi, fra le macchine elettriche.
- 9) Sarebbe assurdo dare una relazione **certa ed esatta** fra una determinata macchina e la sua aderenza; ci si deve piuttosto accontentare di **un intervallo di valori** entro i quali il fenomeno può manifestarsi, con l'aiuto delle rappresentazioni grafiche.

9) APPLICAZIONI ALLE VARIE LOCOMOTIVE

a) Studio teorico sull' E402b

Problema!

A quale velocità minima un E402b (...sempre lui !) può dare tutti i suoi 6000kW senza slittare?
E quanti può darne al massimo alle velocità inferiori, sempre senza slittare?

Supponiamo che la curva di velocità/sforzo sia questa, a potenza costante, piuttosto verosimile:

$y(\text{kN}) = 6000 * 3.6 / x(\text{Km/h})$, in cui inserendo i Km/h si ottengono i kN corrispondenti, il fattore 3.6 permette di ottenere subito i risultati in kN, impostando direttamente le velocità in Km/h, evitando gli scolastici, ma scomodi, m/s. Come il fattore 9.8, 3.6 va sempre usato nei calcoli.

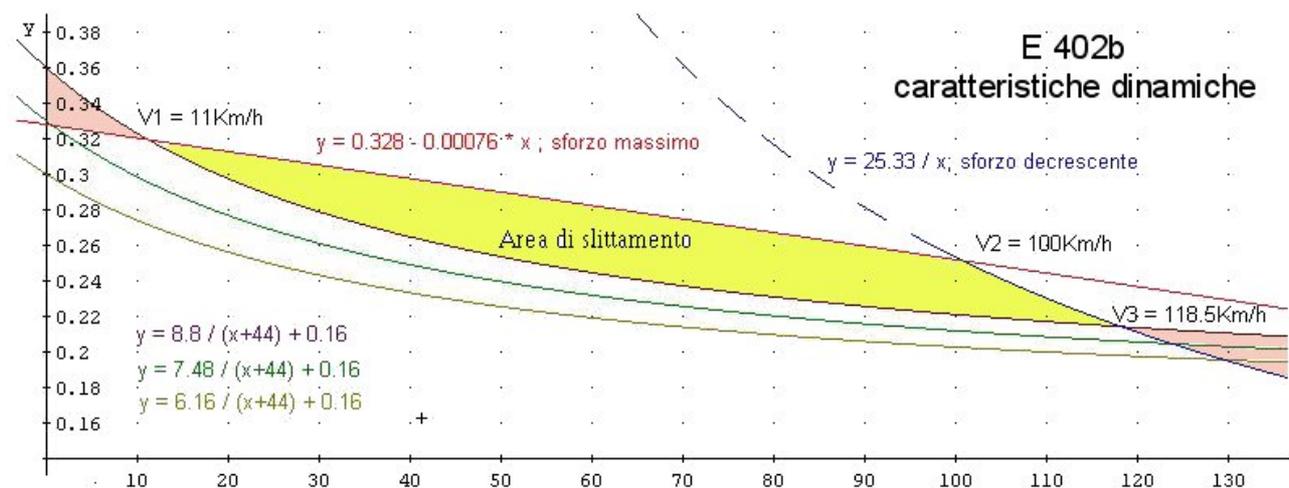
E' però necessario trasformare la funzione in modo da **sovrapporla** a quella di Perticaroli
Dividendo i kN per 9.8, lo sforzo esce in tonnellate e dividendo ancora per il peso del locomotore esce l'aderenza **f**. Faremo la stessa cosa anche a destra dell'uguaglianza, per rispettare la matematica, ottenendo la formula che calcola **l'aderenza richiesta dall'E402b, alle varie velocità.**

$\text{kN} / (9.8 * 87) = [6000 * 3.6 / (9.8 * 87)] / \text{Km/h}; \quad f = 25.33 / \text{Km/h}$
che si adatta al diagramma nella forma:

$y = 25.33 / x$, dove 25.33 è il risultato del calcolo: $(6000 * 3.6) / (9.8 * 87)$

Trasformiamo anche lo sforzo massimo in aderenza: $f_0 = 280 / (9.8 * 87) = 0.328$ allo spunto
Risulta anche che lo sforzo massimo è decrescente: $f_1 = 215 / (9.8 * 87) = 0.252$ a 100 all'ora
Ciò significa che l'E402b necessita di un'aderenza minima di 0.328 per dare uno sforzo di 280kN all'avvio, che scende a 0.252 a 100 all'ora, decrescendo lo sforzo massimo con la velocità. Quindi:
 $f = 0.328 - (0.252 - 0.328) / 100 * \text{Km/h}$, che diventa:

$y = 0.328 - 0.00076 * x$, dove 0.328 è l'aderenza di spunto e 0.00076 la sua velocità di riduzione.



Da questo grafico, possiamo renderci subito conto degli sforzi massimi effettivi e relative potenze massime alle varie velocità, prendendo come riferimento la funzione di aderenza più favorevole:

$$f \text{ disponibile al binario} = 8.8 / (\text{Km/h} + 44) + 0.16$$

$$\text{kN max effettivi al binario} = f * 87t * 9.8$$

$$\text{kW max al binario} = \text{kNmax} * \text{Km/h} / 3.6$$

La prima linea, sotto quella delle velocità, dà l'**aderenza reale del binario alle varie velocità**

La seconda, i **kN corrispondenti tollerati realmente** dall'aderenza del binario, senza slittare

La terza, **la potenza corrispondente** ai kN realmente scaricati al binario

...il tutto calcolato alle varie velocità

Km/h	11	20	40	60	80	100	118.29	oltre
f dispon	0.32	0.298	0.265	0.245	0.231	0.221	0.214	troppa!
kN max	273	254	226	209	197	189	183	decescenti
kW max	833	1409	2508	3476	4376	5237	6000	6000

Partiamo col nostro E402b a **sforzo massimo di 280kN**; il diagramma lo permette perché, a velocità 0, $f = 0.36$ (linea rosso scura) ed il locomotore ne richiede 0.33 (retta rossa). L'aderenza di 0.36, pur disponibile in teoria, non può essere sfruttata, perchè richiederebbe uno sforzo **superiore** a 280kN (**troppi Amperes!**), che il motore non può dare, soprattutto per il limite di sicurezza di progettazione, pur potendolo fare con pochissimi kW, essendo la velocità bassissima.

Subito dopo l'avvio, il motore comincerà a perdere sforzo automaticamente, secondo la retta rossa. Arrivati a 11Km/h (prima velocità critica) lo sforzo deve essere ridotto, in quanto la linea dell'aderenza **disponibile** al binario decresce e diventa minore di quella dell'aderenza **richiesta** dal locomotore; **diversamente si slitta**. Procedendo, l'aderenza al binario continua a decrescere e bisognerà seguirla, continuando a ridurre lo sforzo e quindi l'accelerazione. La potenza in kW (da non confondere con lo sforzo) continuerà a crescere per effetto dell'aumento della velocità.

A 100km/h lo sforzo massimo del motore **sarebbe** di 215kN, ma ne possono essere scaricati solo 189, a causa dell'aderenza, che continua a scendere, seppure a ritmi più ridotti.

Oltre questa velocità il motore comincerà automaticamente a perdere sforzo, senza bisogno di limitarlo automaticamente o manualmente, passando dalla retta all'iperbole.

Raggiunti i 118.29Km/h (terza velocità critica), aderenza richiesta e disponibile si uguagliano e basterà aspettare il raggiungimento della velocità di impostazione, per stabilizzarla, riducendo lo sforzo. **In pratica tutto questo lavoro di controllo verrà fatto dall'elettronica della E402b.**

Su $f = 0.214$, l'E402b **darà 6000kW** orari, con sforzo di $6000\text{kW} * 3.6 / 118.29\text{Km/h} = 182.6\text{kN}$ (kN orari).

Per velocità maggiori la curva di aderenza al binario supererà quella di aderenza richiesta (l'iperbole), ma non potrà più essere sfruttata, **per potenza oraria insufficiente.**

Balza all'occhio, dalla **grande area di slittamento**, che il motore è potentissimo e non può essere spinto al massimo se non a oltre i 118Km/h, ed è particolarmente predisposto a velocità elevate, anche con convogli piuttosto pesanti, **ma su linee non molto impegnative e con poche fermate.**

La causa principale sta nel peso aderente piuttosto basso in relazione alla grande potenza, che compromette la fase di accelerazione in misura non trascurabile.

Lo sforzo continuativo dichiarato di 215kN verrebbe dato senza difficoltà dal motore; resta da vedere fino a quale velocità! Calcoliamo l'aderenza richiesta da questo sforzo: $f = 215\text{kN} / (9.8 * 87) = 0.252$ ed andiamo a cercare sulla curva di aderenza rosso scura (la più favorevole) a quale velocità corrisponde: circa 50km/h.

Chi volesse fare un calcolo esatto deve risolvere l'equazione:

$$0.252 = 8.8 / (v + 44) + 0.16$$

$$0.092 = 8.8 / (v + 44)$$

$$v + 44 = 8.8 / 0.092$$

$$v + 44 = 95.6$$

$$v = 51.6\text{Km/h}$$

Superando i 51.6Km/h , e volendo mantenere lo sforzo di 215kN, **...si slitta!** con sole 87t.
Ovviamente, dando per buone le curve di aderenza proposte, sicuramente non pessimistiche.

Riferendoci alla curva di aderenza più bassa, non sarebbe stato possibile l'avvio a sforzo massimo (slittamento) e sarebbe stato necessario ridurre maggiormente lo sforzo durante l'accelerazione.
I 6000kW orari, sarebbero possibili solo a quasi 130Km/h, per uno sforzo orario di $6000kW * 3.6 / 160Km/h = 166kN$

b) Una curiosità: ...l'E602b

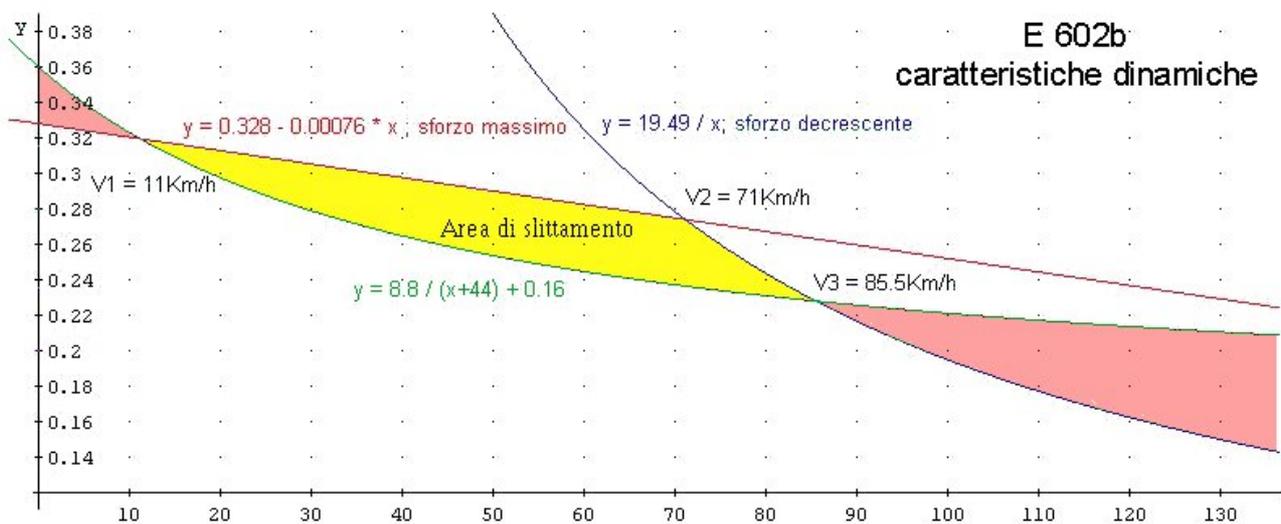
Ecco cosa succederebbe con un ipotetico E602b, a 6 assi Co Co (necessario per velocità elevate), del 30% più pesante (non esageriamo col carrello Co Co!) e sforzi massimi proporzionali.
Se ce ne fosse uno simile sul Web, ...anche francese!, ci farei un repaint di fantasia!
Ecco la macchina ipotetica:

E602b.001

Peso : 113.1t (18.85t/asse, va dappertutto)
Sforzo massimo allo spunto: 364kN (sempre il 30% in più)
Sforzo massimo a 71km/h : 304kN non ottenibili senza sabbia
Potenza oraria : 6000kW
Velocità massima : 200km/h

La retta negativa dello sforzo massimo è la stessa dell'E402b: $y = 0.328 - 0.00076 * x$
Con la differenza che lo sforzo d'avviamento è passato da 280kN a 364kN!
Cambia l'iperbole, che diventa: $y = 6000 * 3.6 / (113.1t * 9.8)$; $y = 19.49 / x$
Manteniamo solo la curva di Perticaroli migliore, per semplicità : $y = 8.8 / (x + 44) + 0.16$

Otteniamo quindi:



L'avviamento avverrebbe allo sforzo massimo di ben 364kN, che si ridurrebbe a circa 320kN ad 11 all'ora. Bisognerà seguire la curva di aderenza solo fino ad 85.5km/, dove l'E602 potrà già dare tutti i 6000kW al ragguardevole sforzo orario di $6000 * 3.6 / 85.5 = 252.6kN$. Evidentemente il peso del locomotore (un po' dimenticato in questi ultimi tempi!) risolve molti problemi di aderenza, in tutte le situazioni. La potenza è invariata, ma necessariamente ripartita su 6 motori da 1000kW.

Passiamo ora ad alcuni confronti, per diversi motivi interessanti. Per maggiore comodità di lettura ho messo sull'asse y lo sforzo (adattando l'aderenza ai kN, ...il contrario di prima), ma l'interpretazione dei grafici è sempre la stessa.

c) Rapporti corti e lunghi

Questo confronto evidenzia le differenze di spunto fra un E656 (28/61) ed E655 (23/66).
 Riduciamo subito il tutto ad un numero: $23/66 = 0.348$ e $28/61 = 0.459$, per cui $0.348 / 0.459 = \mathbf{0.76}$
 La differenza che esiste fra farsi una salita dura in bicicletta col 39 di moltiplica o col 51, a parità di pignone! Vincerà il primo corridore. Se si arrivasse in volata sicuramente il secondo, ammesso che entrambi i corridori abbiano le stesse gambe (kw). Si comprende anche che, nel caso di uno scatto violento su terreno fangoso il primo corridore rischierebbe di slittare più del secondo (kN massimi)
 La relazione fra sforzo e rapporto di trasmissione è molto semplice:

Lo sforzo è inversamente proporzionale al rapporto di trasmissione:

$$\mathbf{F \text{ (ruote)} = k * F \text{ (motore)} / r}$$

dove r è il raggio della ruota e k è il rapporto di ingranaggio fra sala motrice e motore; se fossero in presa diretta, k sarebbe uguale ad 1.

Questo farebbe deporre decisamente a favore del rapporto corto; interviene però un'altra considerazione meccanica: il primo corridore perderebbe la volata perché non è più in grado di far girare le gambe **oltre un certo numero di giri**, come un locomotore andrebbe, come minimo, **in surriscaldamento** nel motore e nei cuscinetti delle sale motrici, se superasse il numero di giri previsto dal progetto. Quindi, **un rapporto per basse velocità ed uno per le alte!**; almeno fino ad una ventina d'anni fa, quando vennero prodotti gli E632/633, ancora differenziati nei rapporti. Oggi, con motori trifase ad inverter, sistemi di raffreddamento più potenti e materiali superiori , si riescono ad ottenere **alti sforzi di avviamento ed elevate velocità** usando un solo rapporto di trasmissione. Un bel passo avanti, soprattutto se si pensa che le macchine a vapore FS montavano ruote di diametro 1.37, 1.51, 1.63, 1.85 e 2.03 in base alla potenza ed ai servizi cui erano destinate.

Tornando ai nostri Caimani, l'E656 dà uno sforzo massimo normale di 235kN (quello in condizioni estreme è di 249kN, ma stiamo sul normale, anche per semplicità); quello dell'E655 è **semplicemente calcolabile** da: $235\text{kN} / 0.76 = 309\text{kN}$, il massimo per le nostre FS, sfruttando le 120t di peso, sempre il massimo, che lo rende superiore, **a velocità medio/basse e per carichi molto elevati** anche all' E652, più moderno, potente e lineare nell'avvio, **ma anche più leggero** (14t in meno non sono poche!). Ovviamente l'E655 i 160 all'ora ...non può nemmeno sognarseli!

Calcoliamo la curva di velocità/sforzo dei Caimani, premettendo che parto dall'ipotesi che la potenza si mantenga costante a 4800kW orari **per tutte le velocità** (non esattamente vero, in quanto la potenza tende a decrescere alle **alte** velocità in relazione al tipo di motori ed al grado di indebolimento di campo) e che conseguentemente le due macchine non abbiano differenza di comportamento (anche questo non esattamente vero, in quanto l'E655 dovrebbe dare i 4800kW **prima** dell'E656). Trattandosi, però, di studiare **il problema dello slittamento** e, tenuto conto che questo può avvenire a velocità relativamente basse rispetto alla massima, la semplificazione non può produrre un errore grave. La variazione della potenza al variare della velocità e del rapporto di trasmissione, nei vari motori, sarà oggetto di un prossimo articolo. Quindi:

$$\mathbf{\underline{kN * Km/h = kW * 3.6}}, \text{ per tutte le macchine (per il momento)}$$

In particolare, per l'E656/655 si ha:

$$\mathbf{kN = 4800kW * 3.6 / Km/h}, \text{ che semplificato dà: } \mathbf{y = 17280 / x}$$

La linea di sforzo massimo cambia, a causa del rapporto di trasmissione.

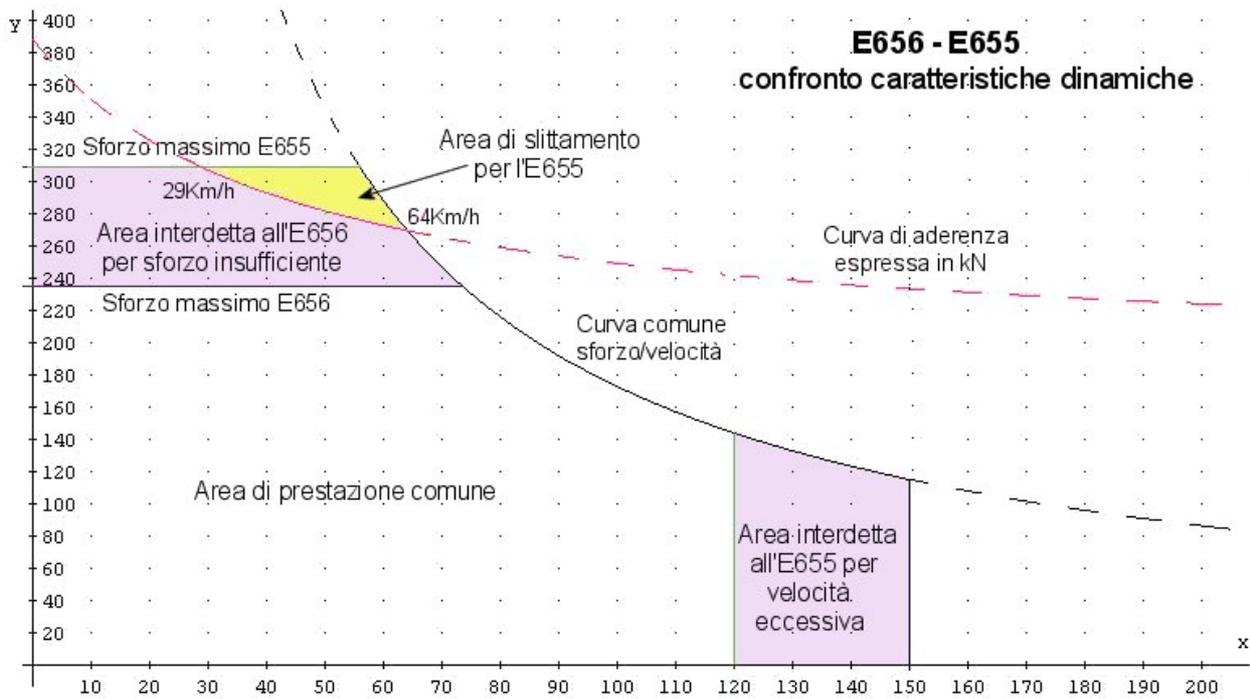
$$\mathbf{kn = 235} \text{ e quindi } \mathbf{y = 235}; \text{ per l'E656}$$

$$\mathbf{kn = 309} \text{ e quindi } \mathbf{y = 309}; \text{ per l'E655}$$

La curva di Perticaroli scelta sarà la seconda: $f = 7.48 / (x + 44) + 0.16$ (motori a serie/parallelo), che va però adattata al grafico in kN, moltiplicando il tutto per ($120 * 9.8$) = **1176**

$$\mathbf{y = 7.48 * 1176 / (x + 44) + 0.16 * 1176}$$

$$y = 8796.48 / (x + 44) + 188.16$$



Si vede subito che l'E656 è stato concepito per treni **pesanti veloci** ; non ha alcun problema di slittamento (l'area rosa in alto gli è interdetta **per insufficienza di sforzo massimo**). Se il convoglio è **molto pesante ed in salita**, comincia a mostrare i suoi limiti. Lo stesso se deve produrre sforzi **elevati e frequenti** (... locale Savona-GE Brignole per intenderci!), non potendo sfruttare i suoi 150/160 all'ora per eccesso di fermate, lavorando in sottopotenza.

Il trasformato E655 supplisce pienamente a queste carenze: l'area rosa in alto è alla sua portata, facendo anche attenzione allo slittamento da 29 a 64 all'ora, e può **'muovere'** un treno pesantissimo senza difficoltà, anche in salita. L'accelerazione media fino a 64 all'ora può stimarsi di un 25% superiore a quella di un E656, il che lo rende adatto a tutte quelle situazioni in cui il suo genitore cominciava a mostrare i propri limiti. Naturalmente il tutto viene pagato con la velocità massima, di 30/40 all'ora più bassa di quella dell'E656. Il futuro delle E656 dovrebbe essere legato sempre più **alla trasformazione in E655**. Le 120t, **sottoutilizzate nelle E656**, ...troverebbero soddisfazione!

In generale, il grafico mostra, soprattutto, perché la prestazione assegnata dalle FS alle macchine a rapporto corto sia superiore a quelle equivalenti a rapporto lungo: **lo spunto è molto superiore ed il raggiungimento della velocità di esercizio molto più rapida per maggiore accelerazione.** Un treno pesante in salita non avrà velocità di impostazione molto elevate, **deve tirare ...e basta!**

Inoltre il rapporto corto permette di ottenere **la potenza massima a velocità proporzionalmente inferiori a quelle concesse dal rapporto lungo,** ma la cosa sarà chiarita meglio in un prossimo articolo, quando le curve di sforzo/velocità verranno **distinte in base al rapporto di trasmissione.**

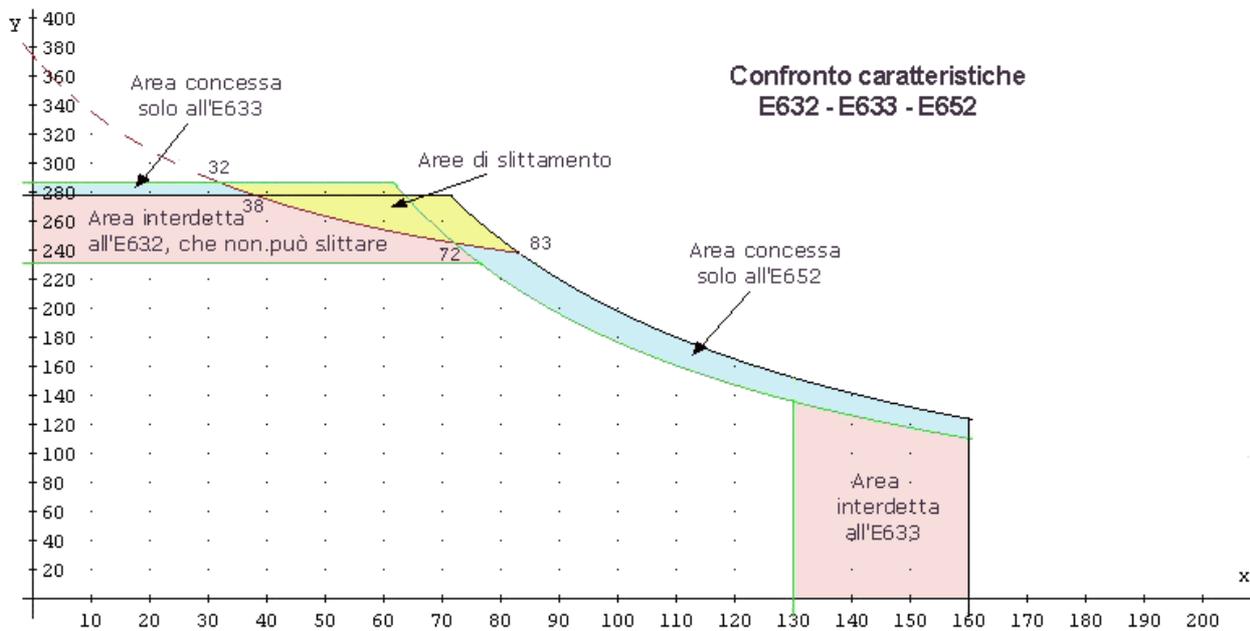
d) Tigri e Tigrioni

Questo è il primo vero tentativo di superare la differenziazione fra rapporti lunghi (E632) e corti (E633), con la produzione di una macchina **universale nel settore dei 6 assi (E652)**, di grande spunto e di buona velocità, compatibilmente col rodiggio Bo Bo Bo. **La maggior potenza dell'E652, permette di ottenere uno sforzo massimo molto prossimo a quello dell'E633 e mantenere la velocità dell'E632, grazie al rapporto lungo 36/64.** Costruite nella prima metà degli anni '90, in numero di 176 unità, queste ottime macchine non ebbero molta fortuna, messe in disparte dai trifase ad inverter. Attualmente è nota a tutti la polemica sorta attorno agli E402, che avrebbero dovuto sostituirli; la serie **'a'** non spuntava abbastanza e la serie **'b'** ...slitta!

Anche qui calcoliamo le solite curve caratteristiche:

E632: 4905*3.6/Km/h, quindi $y = 17658/x$; sf/max = 231kN, e quindi $y = 231$ $x = 160$
 E633: 4905*3.6/Km/h, quindi $y = 17658/x$; sf/max = 287kN, e quindi $y = 287$ $x = 130$
 E652: 5500*3.6/Km/h, quindi $y = 19800/x$; sf/max = 278kN, e quindi $y = 278$ $x = 160$

Adottando la curva di aderenza: $y = 106 * 9.8 * [8.8/(x + 44) + 0.16]$, trattandosi di macchine a trazione continua.
 $y = 9141.44 / (x + 44) + 166.208$, che risulta un pò più bassa di quella del 656/655, per le 14t in meno! Ecco il grafico:



L'E632 non dovrebbe nemmeno slittare, per insufficienza di sforzo massimo. L'E633 conserva lo spunto migliore, ma, da 32 a 72 all'ora deve seguire la curva di aderenza, poi può spingere al massimo. L'E652 deve ancora concedere qualcosina al rapporto corto dell'E633 allo spunto, dovrà seguire la curva di aderenza da 38 a 83 all'ora, per i 5500kW, poi avrà via libera.

Risulta evidente che, la maggior potenza, permette all'E652 di coprire quasi interamente le curve degli altri due locomotori, rendendo anche sconveniente differenziare i rapporti.

L'unico locomotore che gli è superiore fino a circa 70 all'ora è l'E655, **fino a quando il Caimano può tirare più di peso che di potenza**, facendo sentire le sue 120t. (locale Savona Genova Nervi)

Superata questa velocità, libero da slittamenti, l'E652 farà sentire i suoi 5500kW.

E' quindi comprensibile che, per carichi **molto elevati, molte fermate e conseguenti velocità piuttosto basse, in particolare in salita**, l'E655 sia accreditato di una prestazione un pò superiore.

Qui sotto un orario della tratta citata (20 stazioni in meno do 60km); dove si evidenzia la necessità di **una grande accelerazione, quindi di grande sforzo massimo, strettamente legato al peso aderente, che riduce il rischio di slittamenti**, necessario per ottenere la velocità più alta possibile, compatibile con lo spazio disponibile, nel tempo più breve possibile. Un treno ...sempre fermo!

Stazione d'arrivo	ora d'arrivo	ora di partenza	Genova Pegli	16:41	16:42
Savona	--:--	16:00	Genova Sestri Ponente	16:45	16:46
Albisola	16:05	16:06	Genova Cornigliano	16:49	16:50
Celle	16:09	16:10	Genova Sampierdarena	16:54	16:55
Varazze	16:13	16:14	Genova Piazza Principe	17:02	17:03
Cogoleto	16:19	16:20	Genova Brignole	17:09	17:20
Arenzano	16:23	16:24	Genova Sturla	17:25	17:26
Genova Vesima	16:27	16:28	Genova Quarto Dei Mille	17:28	17:29
Genova Voltri	16:33	16:34	Genova Quinto Al Mare	17:32	17:33
Genova Pra	16:37	16:38	Genova Nervi	17:36	--:--

Non credo che questo servizio venga effettuato dall'E655, della 'Cargo', ma è certo che le caratteristiche di spunto della macchina lo effettuerebbero **senza alcuna difficoltà**.

e) E428 ed E636

Due macchine storiche per le FS, totalmente differenti come impostazioni di progetto; la prima buona per velocità elevate (particolarmente quelle a rapporto lungo, 34/98, da 140 all'ora), la seconda più adatta a sforzi elevati a velocità più basse. Usate più di una volta per servizi equivalenti, **hanno comunque sempre mostrato differenze di comportamento significative**.

Confrontiamo queste due macchine, prendendo come base quelle a rapporto corto, il 29/103 per l'E428 ed il 21/65 per l'E636. La potenza massima è molto favorevole all'E428; 2800kW contro 2100 dell'E636. Il primo deve però muovere ruote da 1.88m, ricevute in eredità dalle locomotive a vapore, se vuol raggiungere i 130 all'ora, mentre il secondo, con ruote ormai standard per le FS, da 1.25m, deve accontentarsi di 105km/h, per ottenere un buon sforzo massimo.

Tutto sommato gli sforzi massimi sono dichiarati in 216kN per entrambe le macchine. I 2800kW dell'E428 li permettono, ma l'E636, di 101t tutte aderenti, potrà scaricarli senza alcun problema di slittamento, mentre il colosso E428, di ben 135t, avrà grossi problemi, in quanto ben 57t del suo peso finiscono su 4 assi portanti (duro prezzo per la velocità, a quei tempi), talchè il suo peso aderente si riduce a sole 78t.

Facciamo i soliti calcoli per ottenere il grafico. Innanzi tutto è necessario tracciare 2 curve di aderenza, avendo le macchine pesi aderenti diversi, scegliendo la peggiore di Perticaroli (macchine vecchie): $y = 6.16 / (x + 44) + 0.16$

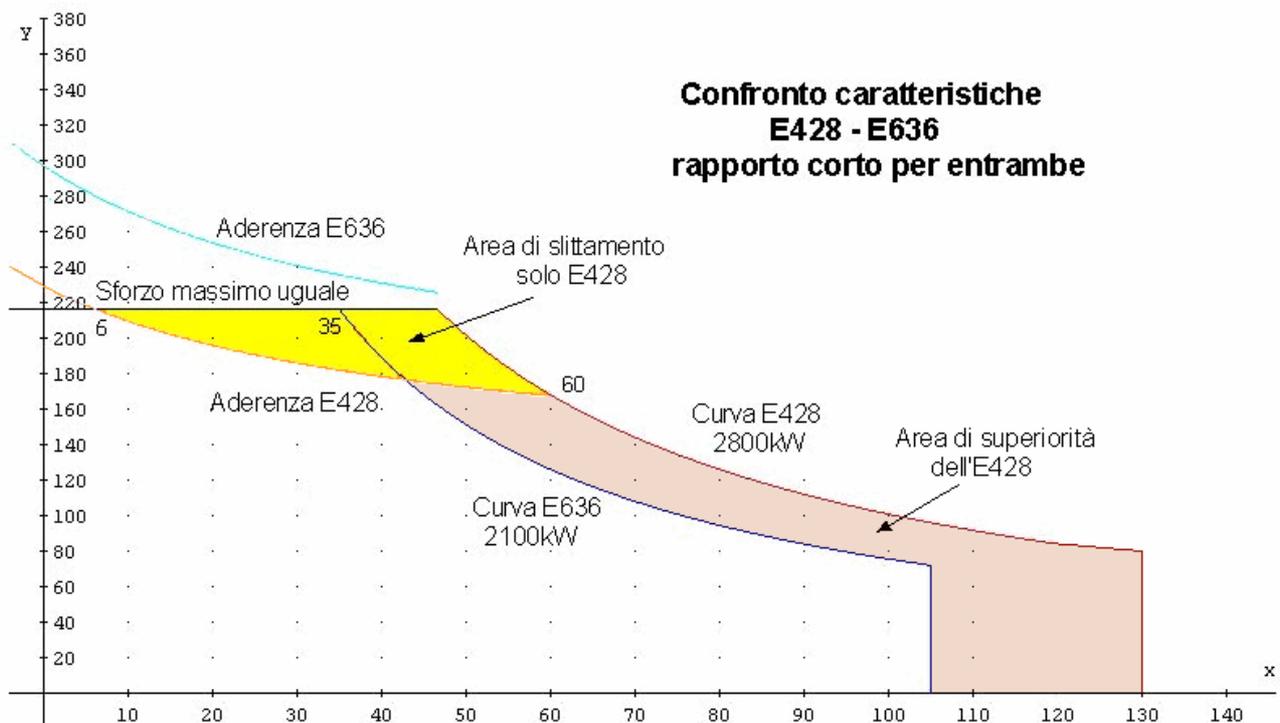
Per l'E428 otteniamo: $f \text{ (kN)} = 78 * 9.8 * [6.16 / (x + 44) + 0.16]$; $y = 4708.704 / (x + 44) + 122.304$

Meglio per l'E636: $f \text{ (kN)} = 101 * 9.8 * [6.16 / (x + 44) + 0.16]$; $y = 6097.168 / (x + 44) + 158.368$

Gli sforzi massimi sono uguali: $y = 216$ Le velocità massime: $x = 130$ per l'E428; $x = 105$ per l'E636

Le curve sforzo/velocità sono: $Kw * 3.6 / Km/h$; $y = 10080 / x$ per l'E428 ed $y = 7560 / x$ per l'E636, meglio per l'E428

Otteniamo questo immediato confronto:



La curva azzurra di aderenza dell'E636 è completamente più alta del suo grafico; ciò significa che l'E636 può avviarsi a 216kN e mantenerli fino a 35km/h, dove il motore **di soli 2100kW** entrerà automaticamente in sforzi decrescenti fino alla velocità massima di 105km/h. Potrebbe disporre di uno sforzo massimo fino a quasi 240kN, senza slittare, ed entrare in sforzi decrescenti a 33 all'ora.

Attorno al 1951 due unità E636 vennero equipaggiate con **motori doppi**, per un totale di 2490kW, con, in più, una minor perdita di potenza alle alte velocità. Carrelli migliori permisero i 120 all'ora col rapporto 20/65! e lo sforzo massimo salì matematicamente ad **almeno** a 226.8kN (senza tener conto dell'aumento di kW). Il prologo dell'E646. Messe in turno a Firenze con gli E428, dettero ottimi risultati, poi vennero riconvertiti, in attesa, appunto, degli E646.

Quella arancione dell'E428 taglia quasi subito (6km/h) quella di sforzo massimo ed impone riduzione di sforzo fino a 60 all'ora, dove si entrerà in sforzi decrescenti. I problemi di slittamento dell'E428, specialmente a rapporti corti, sono noti ed il grafico mostra chiaramente il perchè.

Il problema è sempre il solito: basso peso aderente rispetto allo sforzo massimo.

Tuttavia **la superiorità media dell' E428 è evidente**, dalla grande area nocciola evidenziata.

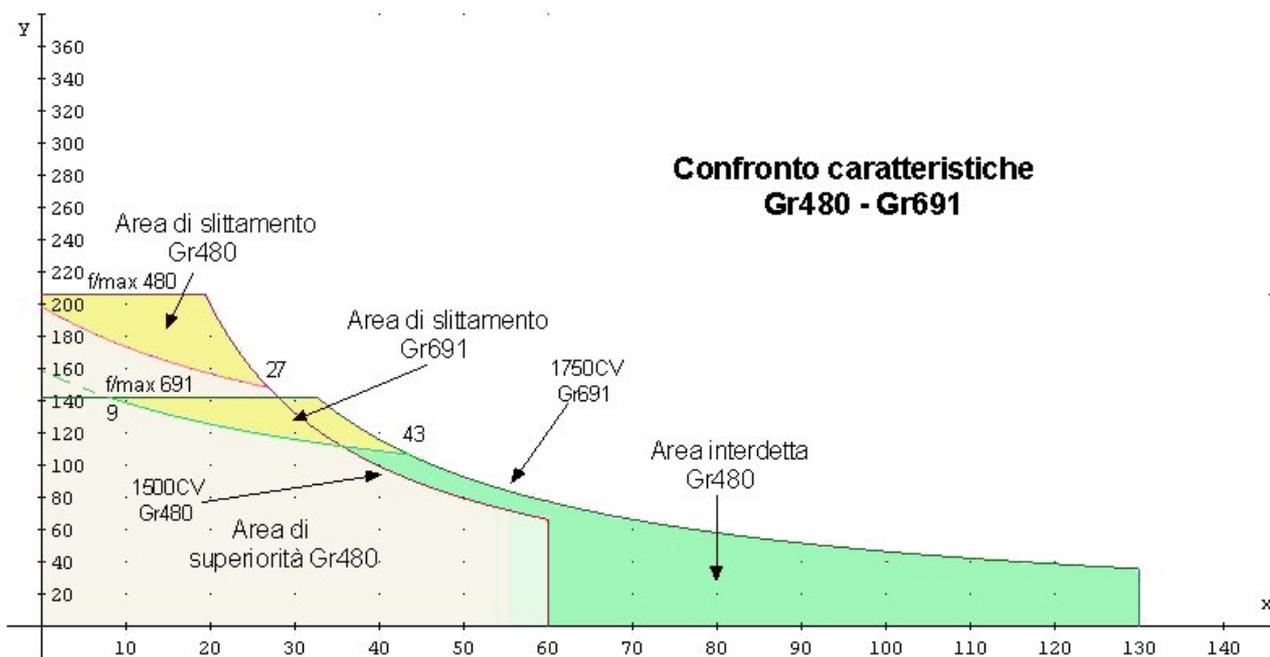
f) Altri tempi ...Gr691 e Gr480

Ecco un confronto fra Gr691, macchina a vapore veloce, ottenuta in 33 unità, dal 1928 al 1934, dalla trasformazione delle Gr690 e Gr480, macchina creata appositamente per il Brennero in 18 unità nel 1923. Queste le caratteristiche principali delle due vaporiere:

	Gr691	Gr480
Rodiggio	2-3-1	1-5-0
N° cilindri	4	2
Peso in servizio	97.2t	87.3t
Peso aderente	60t	75t
Pressione massima	16kg/cm ²	12kg/cm ²
Potenza	1750CV (1288kW) a 90km/h	1500CV (1104kW) a 45km/h
Sforzo massimo	142.1kN	205.8kN
Velocità massima	130km/h	60km/h
Diametro ruote motrici	2.03m	1.37m

Come si vede subito, rapporti corti e lunghi (0.675) e pesi aderenti erano differenziati al massimo negli anni '20' e lo sforzo massimo maggiore era pagato **pesantemente** con la velocità massima.

Va anche notato che la Gr691 ha 250HP e 4kg/cm² in più della Gr480, per cui, a parità di queste caratteristiche le differenze a basse velocità si sentirebbero maggiormente.



L'area di slittamento della Gr480 appare piuttosto grande, ma va considerato che la Gr480 doveva far servizio in montagna e saper affrontare anche la neve; l'uso abbondante di sabbia era all'ordine del giorno, anche col bel tempo. Fu quindi progettata con un **dimensionamento dei cilindri abbondante** e ciò, nel vapore, aumenta lo sforzo massimo.

Dati molto dettagliati sul vapore si trovano nell'opera magistrale dell'ing. **Accomazzi**, "Nozioni elementari (...mica tanto! nota mia) sulla locomotiva delle strade ferrate", ordinabile presso <http://www.tuttostoria.it/lista.asp?ID=10>

La superiorità complessiva della Gr691 **sembra** evidente ad un rapido sguardo del grafico, ma non dobbiamo dimenticare che le macchine a vapore veloci **non andavano affatto bene a basse velocità** e la Gr691 è l'esempio più spinto. Disponeva di ben 1750CV, ma doveva aspettare i 90 all'ora per poterli dare tutti, a causa delle ruote da 2.03, ed il rendimento a basse velocità era molto scarso. Insomma, viaggiare a 45 all'ora con una Gr691 voleva dire disporre di **meno CV** (circa 1487.5) di quelli che avrebbe dato la 'lenta' Gr480 alla stessa velocità (tutti i suoi 1500). Inoltre, spesso, non le era nemmeno possibile raggiungere questa velocità in salita, a causa delle grandi ruote da muovere ed al peso aderente inferiore di ben 15t, rispetto a quello della Gr480.

g) Funzioni più realistiche

Cito il procedimento usato per ottenere i CV erogati alle varie velocità (da ing. **Tajani 1928**). Occorre calcolare lo sforzo **ottimale** corrispondente alla velocità **ottimale** (in kg, ...alla vecchia maniera!) sapendo che quella della Gr480 era di 45 all'ora e quella della Gr691 di 90 all'ora (ufficiali FS):

1500CV * 270 / 45Km/h = **9000kg** per la Gr480; 1750CV * 270 / 90Km/h = **5250kg** per la Gr691
dove 270 è il numero **fisso** della conversione.

Ciò significa che le 2 macchine viaggiano **al meglio agli sforzi appena calcolati**, in relazione alle velocità ottimali FS.

La formula che permette di calcolare gli sforzi alle varie velocità è questa, ...dopo di che basterà convertirli in CV:

$$F = F_o * [0.6 * (2 - V / V_o) + 0.4 * (V_o / V)]$$

dove Fo è lo sforzo ottimale (noto), Vo la velocità ottimale (nota) e V la velocità corrente (45 nel nostro caso); non è difficile, basta una calcolatrice ...ed un po' di pazienza!

F(480) = 9000 * [0.6 * (2 - 45/45) + 0.4 * (45/45)] = 9000 * [0.6 * (2 - 1) + 0.4 * 1] = **9000kg**.
...per forza!, 45Km/h è la velocità ottimale della Gr480.
CV(480) = 9000 * 45 / 270 = **1500CV**, la sua potenza massima, in perfetta coerenza con la formula.

F(691) = 5250 * [0.6 * (2 - 45/90) + 0.4 * (90/45)] = 5250 * [0.6 * 1.5 + 0.4 * 2] = 5250 * 1.7 = **8925kg**
sembrano tanti, ...ma proprio qui casca l'asino per la Gr691!, infatti:
CV(691) = 8925 * 45 / 270 = **1487.5CV**, rimettendoci 262.5CV, **per velocità troppo bassa**.

* * * * *

Generalizzando la formula e trasformandola in una funzione, si otterranno curve di sforzo/velocità molto più realistiche, per qualsiasi macchina a vapore; vediamo quelle della Gr480 e della Gr691, **supposte entrambe di 1750CV**, (Gr480S!) per meglio confrontarle. Lo sforzo ottimale della Gr480S salirebbe a $9 * 9.8 * 1750 / 1500 = 102.9kn$. Inoltre diamo 80t di peso aderente alla Gr480S, per meglio sfruttare la potenza a basse velocità. Ecco le funzioni di sforzo/velocità variabile delle 2 macchine

$$y(kN) = 102.9 * [0.6 * (2 - x / 45) + 0.4 * (45 / x)] \text{ per la Gr480S}$$

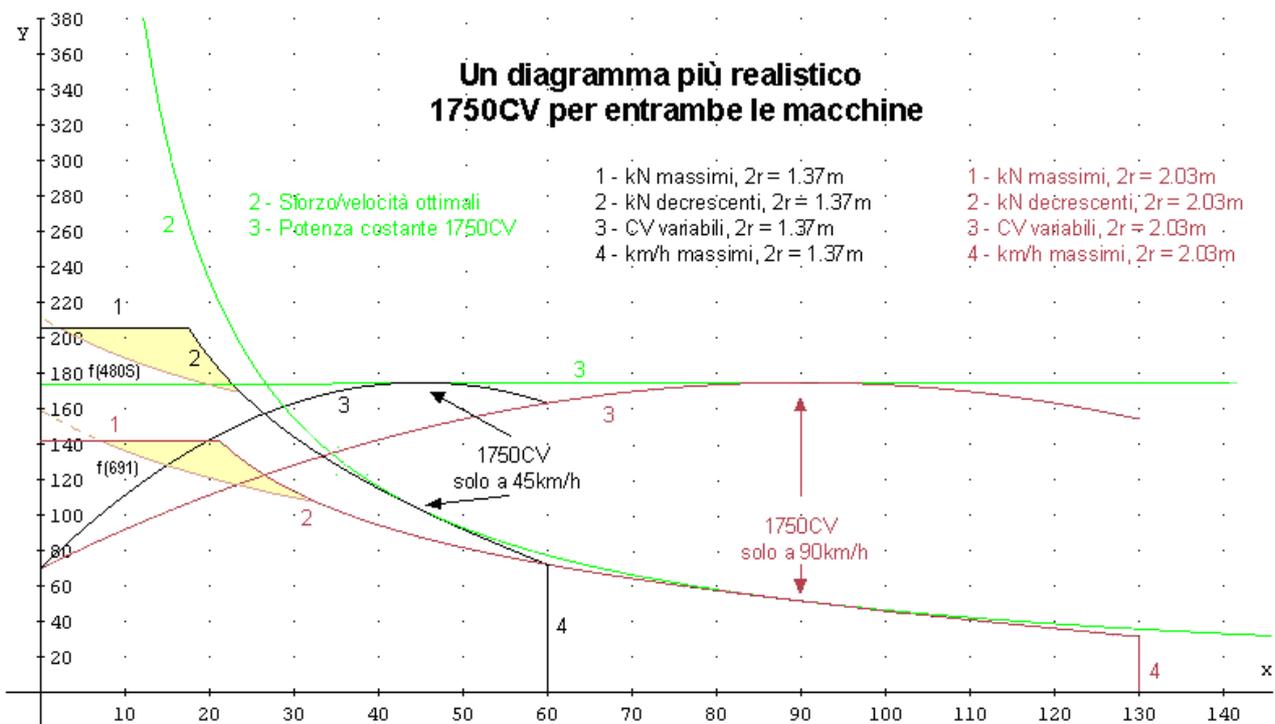
$$y(kN) = 51.45 * [0.6 * (2 - x / 90) + 0.4 * (90 / x)] \text{ per la Gr691}$$

e le rispettive **curve di potenza**, che, da rette orizzontali, diventano parabole, molto più realistiche. Allo scopo bisogna moltiplicare il tutto per la velocità x e dividere per **3.6**.

$$y(kW) = 102.9 * [0.6 * (2 - x / 45) + 0.4 * (45 / x)] * x / 3.6 \text{ per la Gr480S}$$

$$y(kW) = 51.45 * [0.6 * (2 - x / 90) + 0.4 * (90 / x)] * x / 3.6 \text{ per la Gr691}$$

La parte fra parentesi quadra produrrà la parabola.



Le parabole e la retta verde sono stati adattati, per comodità di lettura: basterà moltiplicare per 10 i valori sull'asse y per avere i CV. Gli sforzi in kN rimangono di immediata lettura.

Le basi di tutti i confronti sono la retta e l'iperbole verde, che rappresentano il comportamento di un motore a potenza costante di 1750CV , **oggi ottenibili, ma solo coi trifase/inverter (E402/E464).**

Cominciando dall'ipotetica Gr480S da 1750CV , vediamo che a circa 23km/h (superata l'area di slittamento) si entra in sforzi decrescenti a circa 170kN, mentre l'iperbole verde permetterebbe di far dare quasi 200kN, aderenza permettendo. Evidentemente la Gr480S non riesce ancora a dare tutti i 1750CV, ma deve accontentarsi di circa 1500CV, concessigli dalla sua parabola nera (3). La differenza è visibile sul grafico, facendo un confronto con la retta verde (3).

Procedendo, l'iperbole nera (2) si avvicina a quella verde (2), e **diventerà tangente a 45km/h**, dove la Gr480S darà tutti i suoi 1750CV. Anche la parabola nera (3) diventerà tangente alla retta verde e farà un massimo, **ma il tutto solo a questa velocità**. Procedendo verso i 60 all'ora, le curve si staccheranno ancora e ciò vuol dire che la potenza della Gr480S sta diminuendo. Sempre dal grafico, si vede che la Gr480S rende bene fra i 30 ed i 60 all'ora.

Per la Gr691 le cose sono molto peggiori a basse velocità. La perdita di potenza a 30 all'ora è di più di 300CV rispetto alla Gr480S (differenza fra le due parabole: nera (3) e rossa (3)). Verso i 60 all'ora le grandi ruote cominciano a 'girare', ed a questa velocità le potenze si uguagliano (punto di contatto fra le due parabole) sul valore di circa 1600CV. C'è una grande differenza però: **la Gr480S è già in potenze decrescenti, per giunta bloccata dalla velocità massima**, dovuta anche ai 5 assi, mentre la Gr691 continua ad aumentare la potenza; lo farà fino a 90 all'ora, dove darà tutti i suoi 1750CV. Poi, anche per lei, comincia la potenza decrescente, fino a 130 all'ora, suo limite di velocità. Da notare che, in una corsa di prova, la Gr691 ha raggiunto i 150km/h. Anche qui vediamo che una buona resa della Gr691 comincia dopo i 60km/h.

La definizione di curve caratteristiche più precise non fa comunque parte di questo lavoro; ho solo colto l'occasione per presentare un problema che si presenterà, **in tutta la sua importanza e ...difficoltà nei motori a C.C.** Il procedimento da usare è lo stesso, in linea di principio. Ne parleremo diffusamente in una futura pubblicazione.

h) Potenza ed aderenza in pratica ...col vapore

Qui sotto una interessantissima tabella di prestazione relativa alla Gr691 (equiparata, forse con un po' di ottimismo, alla più pesante Gr746). La spezzata nera, ormai non più presente sulle tabelle di prestazione più moderne, segnala al macchinista ...**il pericolo di slittamento!** Tutto ciò che sta sopra la spezzata è ottenibile a potenza massima (zona caldaia), tutto ciò che sta sotto è limitato dallo slittamento (zona aderenza). In pratica il motore della Gr691 potrebbe tirare, ad esempio, ben più di 160t a 45 all'ora su un grado di prestazione 25 (il Brennero per intenderci), ma ciò non gli è concesso dallo slittamento (peso aderente insufficiente) e non potrebbe farlo nemmeno a 25 all'ora (tutte le colonne dell'area di slittamento hanno valori costanti). Ammesso anche che possa arrivarci, lo farebbe in un tempo troppo lungo in relazione alle esigenze di servizio.

Tabella di prestazione per locomotive gr. 691, 746

Grado di prestazione		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
		← Zona della Caldaia →																									
Carichi in decatonnellate per le diverse categorie dei treni	B	41	38	38	36	35	35	35	33	33	33	33	33	32	31	30	28	26	23	21	19	18	16	15	14	13	—
	75 I Sp.	47	44	44	41	41	41	41	41	39	38	38	38	35	33	32	30	28	25	22	20	19	18	18	17	16	—
	70 I	56	47	47	44	44	44	44	44	41	41	41	40	36	34	33	31	29	26	23	21	20	19	19	19	16	—
	65 II	63	56	56	47	47	47	47	47	44	44	44	41	37	36	34	32	31	28	25	23	22	21	20	19	16	—
	60 III	70	63	63	56	56	56	56	56	47	47	45	42	39	38	35	33	32	29	26	24	23	22	21	19	16	—
	55 IV	82	72	72	65	59	59	59	57	53	48	46	43	40	40	37	35	33	30	27	25	24	23	21	19	16	—
	50 V	89	80	80	72	63	60	60	59	54	49	47	44	42	42	40	36	34	31	27	25	24	23	21	19	16	—
	45 VI	94	86	86	76	67	64	62	60	56	51	48	45	44	44	40	36	34	31	27	25	24	23	21	19	16	—
	40 VII	97	90	90	80	73	67	64	62	60	55	51	50	47	44	40	36	34	31	27	25	24	23	21	19	16	—
	35 VIII	110	95	92	85	78	72	67	65	64	60	55	53	47	44	40	36	34	31	27	25	24	23	21	19	16	—
	30 IX	115	100	96	90	85	80	76	71	66	60	55	53	47	44	40	36	34	31	27	25	24	23	21	19	16	—
25 X	130	110	103	95	90	84	76	71	66	60	55	53	47	44	40	36	34	31	27	25	24	23	21	19	16	—	
		← Zona dell'aderenza →																									

Purtroppo non sono riuscito a trovare la corrispondente tabella della Gr480, da almeno 60 anni ... archiviata a Bolzano. So solo per certo (Cornolò) che trainava 250t da sola su tutto il Brennero, quindi con un grado di prestazione **massimo** almeno di 25, a 45km/h. Questa macchina è già superiore alle concorrenti dirette (460 e 471) a questo grado di prestazione, dove conta molto il peso aderente piuttosto che la potenza. Va da sè che in piano, dove la potenza si fa sentire, alla stessa velocità di 45 all'ora (categoria VI), dovrebbe essere ancora in grado di tirare 1300t.

Sono comunque riuscito a comporre questa tabella di confronto, con le locomotive Gr460 (bottino di guerra), Gr 471 (macchina FS da salita, seconda solo alla Gr480), la Gr740 (macchina da fatica, tuttofare, anche se un po' leggerina), la Gr625 (...la signorina) e la Gr685 (...la regina).

	Gr460	Gr471	Gr740	Gr625	Gr685
Rodiggio	0-4-0	0-5-0	1-4-0	1-3-0	1-3-1
Peso aderente	67.8t	75t	56.4t	43t	45t
Sforzo massimo	160.7kN	146.5kN	144kN	100kN	110.7kN
Potenza	1100CV	1170CV	980CV	800CV	1250CV
Velocità massima	55km/h	50km/h	65km/h	80km/h	120km/h
Diametro ruote motrici	1.35m	1.37m	1.37m	1.51m	1.85m

La Gr460 (ex G8 tedesca) è stata dichiarata dalle FS per 960CV, ma, l'esame della tabella di prestazione assegnata dalle stesse FS, fa pensare che il dato ufficiale KPEV sia più verosimile. Se si tiene conto del fatto che avesse solo 4 assi ed un peso aderente di 67.8t, bisogna riconoscere che i tedeschi, nel settore del vapore, **non erano secondi a nessuno!**

PRESTAZIONE DELLE LOCOMOTIVE FS 460 471 691 740 625 685

(esprese in tonnellate)

	460	471	691	740	625	685
in grado di prestazione 1:						
— in categoria I (70 km/h)	—	—	560	—	330	470
— in categoria IV (55 km/h)	540	—	820	520	460	630
— in categoria V (50 km/h)	700	—	890	680	570	770
— in categoria VI (45 km/h)	1000	800	940	800	660	850
— in categoria VII (40 km/h)	1100	1100	970	920	730	860
— massima	1300	1300	1300	1300	850	860
in grado di prestazione 3:						
— in categoria I	—	—	470	—	290	400
— in categoria IV	470	—	720	480	410	580
— in categoria V	640	610	800	610	500	690
— in categoria VI	760	730	860	730	600	740
— in categoria VII	950	890	900	850	700	740
— massima	1150	1100	1030	1020	720	740
in grado di prestazione 6:						
— in categoria I	—	—	440	300	240	370
— in categoria IV	370	440	590	410	360	510
— in categoria V	500	520	600	490	440	580
— in categoria VI	700	640	640	570	490	600
— massima	970	950	840	840	580	600
in grado di prestazione 10:						
— in categoria I	—	—	410	280	240	330
— in categoria IV	350	400	480	370	330	420
— in categoria V	440	480	490	430	330	430
— in categoria VI	560	540	510	480	400	430
— massima	700	790	600	600	430	430
in grado di prest 15 — massima	470	520	400	410	300	290
in grado di prest 20 — massima	300	340	250	260	200	190
in grado di prest 25 — massima	210	230	160	170	130	120
in grado di prest 31 — massima	120	130	—	110	60	—

L'esame attento di questa tabella mette in evidenza i grossi problemi che dovevano essere affrontati nella progettazione di una macchina a vapore. **Il peso aderente elevato diventava un obbligo per le macchine da salita, pena lo slittamento**, ma questo imponeva almeno 4 ruote basse e, nei modelli più 'specializzati' la rinuncia all'asse portante anteriore, con conseguente riduzione della velocità massima. **Per le macchine veloci si imponevano le ruote alte (da 1.85 a 2.03) e gli assi portanti** (fino a 3 nella Gr691!) con conseguente riduzione del peso aderente ed allontanamento della velocità ottimale, per ottenere piena potenza. La tabella evidenzia come la celebre Gr685, avesse grosse difficoltà a basse velocità e su gradi di prestazione elevati (ruote da 1.85 e **peso aderente di sole 45t**), mentre, apparentemente, la Gr691 andava meglio, con 60t aderenti. Il rovescio della medaglia mostrava che un peso assiale di ben 20t era tollerato solo da pochissime linee, nell'anteguerra. **Per servizi pesanti su linee accidentate, in cui necessitava anche una buona velocità** (ad esempio la tirrenica), le macchine a ruote alte non prendevano velocità, (640), mentre quelle a ruote da 1.37m erano troppo lente (740) e quelle da 1.51m troppo leggere (625). Quindi la necessità di un ulteriore diametro di ruote (1.63) su rodiggio 1-4-0, realizzato sulle Gr745/744 (purtroppo non possiedo le tabelle), che garantiva una buona trazione ad una velocità massima di 75/80km/h. Anche per queste ottime macchine, più avanti, ...tornò la doppia trazione.

Oggi non ha più senso parlare di rapporti o diametri differenziati; i motori ad azionamento trifase e controllo elettronico assicurano **grandi potenze, costanti a tutte le velocità**.

Certo, il fascino del vapore non c'è più e le elettriche a serie/parallelo ...stanno passando alla storia!

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio caldamente e particolarmente **Giuseppe Masieri** (zioBeppe per il Forum di Amicitreni), che mi ha vivamente incoraggiato a scrivere queste pagine, mettendomi a disposizione una quantità **enorme** di materiale bibliografico e seguendone costantemente la stesura. Senza il suo intervento, non avrei nemmeno potuto cominciare a mettermi al lavoro!

Un ringraziamento anche ad **Antonio Mancinelli** di Amicitreni, che mi ha fornito materiale per costruire le funzioni di aderenza moderne, a **Marco Bono** di Amicitreni e **Niels Picciotto** de ilDeposito, che mi hanno permesso di costruire e completare l'ultimo capitolo sul vapore, fornendomi le preziose tabelle di prestazione necessarie ed a **Massimo Calvi**, che mi ha fornito due interessanti studi teorici, anche se di un livello ...molto elevato.

La mia riconoscenza va a tutto lo staff di Amicitreni, che mi ha permesso di discutere molto 'liberamente e serenamente' di questo argomento sul Forum ed a tutti coloro che vi hanno postato.

RIFERIMENTI MODELLISTICI

Quasi tutti i modelli 3D, per Train Simulator, delle macchine cui ho fatto riferimento, sono liberamente scaricabili, tutti o in parte, dai seguenti siti Web:

<http://www.amicitreni.net/train%2Dsimulator/>

<http://www.ildeposito.net/>, in particolare per il vapore

<http://www.trenomania.it/index2.asp>

<http://www.web-treni.it/msts/>

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Il materiale cui ho attinto si riferisce ai seguenti autori:

Loria, Tajani, Corini, Maternini, Spani, Vicuna, Perticaroli, Canale/Leonardi/Nicosia, Braghin

ed è liberamente scaricabile alla 2a pagina del topic del Forum di Amicitreni:

http://www.amicitreni.net/forum/topic.asp?TOPIC_ID=5536

Renzo Omodei – Aln668

...per qualsiasi errore, omissione o suggerimento:

l.omodeisale@virgilio.it

Mortara 11.8.2004.-