

LE INNOVAZIONI TECNOLOGICHE NEI METODI DI TRACCIAMENTO E CONTROLLO DELLE CURVE FERROVIARIE

**E. AQUILINO
P. COLONNA
O. TRAGNI**

SOMMARIO

Con l'avvento delle linee di Alta Velocità il controllo della geometria del binario assume maggiore importanza, a causa della necessità del mantenimento nel tempo delle condizioni di sicurezza e del comfort di marcia sulle linee stesse, in relazione al notevole aumento delle loro velocità di esercizio.

In passato il controllo dei difetti di assetto del binario veniva effettuato quasi esclusivamente su base relativa direttamente dal personale lungo linea o mediante l'impiego di macchine o carrozze di misura.

Alla attualità, invece, è evidente la necessità di adottare un sistema di riferimento caratterizzato da coordinate di tipo assoluto.

È possibile affermare che un modo di procedere del tutto generale per realizzare un corretto riposizionamento del binario, rispetto ad un sistema di riferimento di tipo assoluto, dovrebbe essere caratterizzato dalle seguenti fasi operative:

1. creazione di una rete di punti topografici, a ridosso della linea ferroviaria in esame, opportunamente collegata ai punti IGM;
2. rilievo dell'assetto geometrico del binario allo stato attuale eseguito mediante l'impiego di strumentazioni topografiche avanzate;
3. definizione di un progetto analitico del tracciato ferroviario sulla base dei dati teorici (o corretti) e di quelli ottenuti attraverso il rilievo della geometria del binario;
4. esecuzione dei lavori con macchine di manutenzione (rincalzatrici) del binario dotate di sistema integrato per il controllo ed il posizionamento del binario.

Tale modo di procedere è in perfetta sintonia con le crescenti esigenze di efficienza, sicurezza e comfort di marcia, che caratterizzano le linee ferroviarie moderne.

Nella memoria vengono analizzati i principali problemi connessi con le applicazioni delle nuove tecnologie ai metodi di tracciamento e controllo delle curve ferroviarie, prefigurando anche lo scenario dell'immediato futuro.

1. PREMESSE

Nella costruzione di grandi opere di ingegneria il problema del tracciamento topografico sul terreno di quanto è previsto nel progetto riveste un'importanza fondamentale.

Non meno rilevante è il problema rappresentato dalla correzione di linee ferroviarie esistenti, la cui soluzione (metodo Hallade) è resa più complicata a causa dei vincoli

imposti dalla presenza di eventuali opere d'arte (gallerie, viadotti, ecc.).

Ogni opera costruita dall'uomo subisce inevitabili mutamenti, più o meno rilevanti, dovuti all'uso o a cause accidentali; dunque, è utopistico pensare che una qualunque struttura o impianto possa conservare la normale efficienza intatta nel tempo.

Risulta evidente, quindi, la necessità di un controllo che consenta di individuare, ad esempio per un impianto ferroviario, le variazioni di assetto geometrico del binario. In seguito al controllo, è possibile programmare un eventuale intervento di ripristino dell'assetto geometrico originario capace di garantire le condizioni di sicurezza.

Il rilevamento della geometria reale del binario e il suo confronto con quella teorica, finalizzato al calcolo dei valori di correzione da impostare sulle macchine operatrici, oggi viene effettuato sempre più diffusamente adottando metodi automatici e utilizzando apparecchiature elettroniche di elevata precisione.

Tali strumenti, forniti dalla notevole evoluzione della tecnologia avutasi nell'ultimo decennio, hanno reso possibile la riduzione dell'elevato impiego di personale e di risorse economiche tipiche dei metodi tradizionali di misura dei parametri geometrici del binario adottati in passato i quali, tra l'altro, non sembrano più adeguati a garantire i livelli di affidabilità richiesti dalle prestazioni delle nuove linee.

2. IL TRACCIAMENTO E IL CONTROLLO DELLE CURVE FERROVIARIE E L'ALTA VELOCITÀ

Con l'avvento delle linee di Alta Velocità il controllo della geometria del binario assume maggiore importanza, a causa della necessità del mantenimento nel tempo delle condizioni di sicurezza e del comfort di marcia sulle linee stesse, in relazione al notevole aumento delle loro velocità di esercizio.

2.1. Lo sviluppo dell'Alta Velocità

L'incremento medio del traffico ferroviario relativo all'Alta Velocità Europea è stato, nell'ultimo decennio, pari a circa il 4% annuo. Inoltre, nel periodo compreso tra il 2000 e il 2005, è prevista una ulteriore estensione della rete ferroviaria europea dell'Alta Velocità di circa 3500 km.

Anche negli Stati Uniti, dove pure l'aereo domina a causa della grande estensione e delle grandi distanze, recentemente sono stati avviati nuovi progetti di Alta Velocità ferroviaria (Washington - Boston e Miami -

Orlando - Tampa), mentre sono allo studio nuove ipotesi (New York - Buffalo, Chicago - St. Louis, San Francisco - Los Angeles - San Diego, ecc.).

In Asia anche la Cina e la Corea del Sud sembrano voler seguire le esperienze già consolidate del Giappone.

2.2. Le garanzie per l'utenza

Le prestazioni delle nuove linee determinano anche, come è ovvio, la necessità di garantire un elevato livello di servizio all'utenza, da tutti i punti di vista. In particolare sarebbero gravi le conseguenze determinate da accidentali interruzioni della linea o dalla eventualità di un sinistro.

2.2.1. Affidabilità

La eventualità di una interruzione accidentale della linea si pone, nel caso dell'Alta Velocità, come un rischio ad alto costo, in quanto vanificherebbe l'obiettivo stesso della linea. Pertanto, è evidente che la affidabilità di una linea ferroviaria ad Alta Velocità deve essere necessariamente molto alta.

2.2.2. Sicurezza

Fino ad oggi i tassi di incidentalità delle linee ferroviarie ad alta velocità sono stati decisamente più bassi rispetto a quelli relativi alle reti ordinarie, in tutto il mondo.

Ciò è probabilmente dovuto alla maggiore cura che viene dedicata alle fasi progettuale, di gestione, di controllo e di manutenzione di tali linee.

D'altro canto tale risultato corrisponde ad una esigenza imprescindibile dell'utenza in quanto, con tutta probabilità, le conseguenze di un sinistro su una rete ad Alta Velocità potrebbero essere estremamente più gravi rispetto ad una analoga situazione su linea ordinaria.

Si pone dunque il problema di continuare a garantire tale necessità, sia per le nuove linee che per quelle dove la maggiore velocità è acquisita principalmente a causa delle caratteristiche del treno.

2.3. La condizione essenziale a fornire le garanzie per l'utenza: la "certezza" della geometria del binario

Le nuove realizzazioni dell'Alta Velocità necessitano di più aggiornate metodologie costruttive per disporre, fin dalla attivazione, di un binario di qualità geometrica affidabile e durevole.

Per esempio, in corrispondenza di un difetto altimetrico, le forze verticali sono più elevate a causa dell'incremento dinamico, per cui la legge di assestamento è più rapida.

Deriva, inoltre, che sulle linee ad Alta Velocità (dove gli interventi di ripristino della geometria dovranno essere diradati per la fruibilità della infrastruttura) la qualità del binario costruito sia massima, discendendo da ciò l'esigenza che le tolleranze di posa siano stabilite entro limiti ristrettissimi.

Dovranno, pertanto, essere aggiornati i metodi di tracciamento e correzione della posizione piano-altimetrica del binario, in quanto quelli tradizionali non risultano più affidabili poiché, in tal caso, l'ordine di grandezza delle misure sarebbe prossimo alle tolleranze.

La fattibilità dal punto di vista meramente tecnico richiede, nel caso dell'Alta Velocità ferroviaria, qualche particolare attenzione dovuta sia alla necessità dell'approccio sistemico ed alle sue implicazioni e sia, ovviamente, alla complessità e delicatezza dei problemi tecnici che emergono quando si vuole elevare il livello di

prestazione di un servizio portandolo ad avvicinarsi agli estremi limiti fisici di funzionamento.

Tale processo potrebbe infatti avvenire o abbassando il livello di sicurezza (soluzione inaccettabile in virtù dei richiasti benefici che devono risultare connessi ad un miglioramento della qualità della vita) ovvero, a parità di livello di sicurezza, innalzando adeguatamente la affidabilità tecnica e, per raggiungere tale obiettivo, è quasi sempre necessario approfondire un impegno tecnico ed organizzativo decisamente elevato, affrontando, analizzando e risolvendo al meglio tutte le nuove questioni che si pongono.

Di seguito verranno appunto descritte le principali problematiche il cui affronto viene reso indispensabile con la adozione del nuovo sistema. Naturalmente tale descrizione non potrà che essere essenziale e schematica.

E' ovvio che l'utilizzo dell'Alta Velocità ferroviaria richieda una particolare attenzione nello studio della via e, specificamente, della configurazione piano - altimetrica del binario in curva. Basti pensare, infatti, all'entità delle azioni dinamiche che vengono trasmesse ai mezzi quando le velocità di percorrenza diventano elevate; in questi casi discontinuità geometriche possono innescare vibrazioni ed oscillazioni tali da compromettere il comfort di marcia e la sicurezza dei viaggiatori.

Per esempio è evidente che, in tali condizioni, diventi fondamentale un attento studio circa i materiali con i quali realizzare la sovrastruttura (ballast, sottoballast, traverse, ecc.).

Come è noto, il binario, in corrispondenza delle curve planimetriche delle linee ferroviarie, è caratterizzato da una certa sopraelevazione della rotaia esterna, che ha la funzione di utilizzare una componente del peso proprio del convoglio per compensare, completamente o in parte, la forza centrifuga alla quale lo stesso è sottoposto. In tal modo viene ovviamente anche alleviato il disagio del viaggiatore, solidale con il veicolo.

La condizione ideale di compensazione totale non è in pratica mai attuata, perché la sopraelevazione della rotaia esterna non può superare i limiti imposti, a veicolo fermo, dalla sicurezza al ribaltamento verso l'interno, dalla necessità di non creare eccessivo disagio ai viaggiatori quando il treno procede a bassa velocità, e dall'esigenza di non produrre inconvenienti tecnici quali, ad esempio, la fuoriuscita del lubrificante dalle boccole oltre, naturalmente, alla difficoltà di manutenzione di un binario caratterizzato da una siffatta geometria.

Pertanto se, per una data velocità di progetto, l'inclinazione trasversale del binario non è sufficiente a compensare la forza centrifuga, nasce il concetto di insufficienza di sopraelevazione, la quale è una grandezza che può essere considerata come indice del disagio dei viaggiatori e del tormento dei materiali quando il veicolo procede in curva.

Per l'insufficienza di sopraelevazione si ammettono valori che siano fisiologicamente tollerabili.

E' noto che, in curva, il comportamento dinamico del veicolo ferroviario può essere rappresentato dalla relazione:

$$h_i = h_t - h \quad (1)$$

in cui con h_i si è indicata l'insufficienza di sopraelevazione, con h_t la sopraelevazione di compensazione totale e con h la sopraelevazione reale.

In passato la linea ferroviaria era composta da rettili raccordati da semplici curve circolari ad essi tangenti, per

cui nei punti di tangenza insorgeva, istantanea, la forza centrifuga che veniva parzialmente compensata dalla sopraelevazione della rotaia esterna.

Poiché, in generale, l'applicazione o la variazione istantanea di forze induce disagio per il viaggiatore e nocimento per i materiali, tali effetti negativi erano tollerati per valori di h_i e velocità abbastanza modesti.

Con l'incremento delle velocità la situazione è ovviamente cambiata, rendendo indispensabile l'approfondimento dello studio dei raccordi.

Altra causa di disagio per i viaggiatori e di stress per i materiali è determinata dalla variazione, più o meno repentina, dell'insufficienza di sopraelevazione e, conseguentemente, della accelerazione centrifuga. Quest'ultima variazione, che si definisce contraccollo, deve essere contenuta e graduale.

E' facile verificare che anche ai fini del contraccollo si ha una situazione di disagio se un rettifilo è direttamente raccordato con una curva circolare; tali discontinuità, pertanto, vanno limitate il più possibile e sono tollerate solo in punti singolari della linea quali le deviate degli scambi.

Per ovviare agli inconvenienti causati dalle discontinuità delle h_i , si inseriscono tra rettifili e archi di circonferenze planimetriche e fra archi di raggio diverso, curve verticali o raccordi di rampa che portano la rotaia esterna dalla sopraelevazione nulla in corrispondenza del rettifilo al valore finito h in corrispondenza della curva circolare e che consentono di ottenere delle variazioni graduali del contraccollo. Tali raccordi altimetrici si sviluppano in generale lungo l'intera estensione del raccordo planimetrico di transizione. Il raccordo ideale dovrebbe essere in grado di soddisfare tutti i seguenti requisiti:

- assenza di discontinuità nei punti di transizione tra gli elementi geometrici base del tracciato;
- gradualità e continuità di variazione di h_i e delle altre grandezze relative al moto, sia all'interno del raccordo che nei punti estremi;
- semplicità di rappresentazione analitica e facilità di realizzazione pratica sul binario.

Le curve di transizione possono dunque essere considerate come curve tridimensionali risultanti dalla combinazione di un raccordo planimetrico e di un raccordo altimetrico.

Se a_c è la accelerazione centrifuga, g è la accelerazione di gravità ed s è lo scartamento, si può definire la accelerazione efficace a_i :

$$a_i = a_c - h \text{ g/s} \quad (2)$$

Tale grandezza viene talvolta definita accelerazione non compensata, in quanto connessa alla insufficienza di sopraelevazione di cui alla (1).

Inoltre viene definita velocità di sollevamento V_m la variazione di sopraelevazione nel tempo:

$$V_m = dh/dt \quad (3)$$

Quest'ultima assume grande importanza alle estremità del raccordo, in quanto in tali tratti avviene la rotazione della cassa del veicolo intorno ad un asse longitudinale, passando dalla posizione di sopraelevazione nulla del rettifilo a quella inclinata in corrispondenza della curva, e viceversa.

E' del tutto evidente che una elevata velocità di sollevamento è causa di disagio per il viaggiatore.

I parametri, quindi, che meglio definiscono la qualità di un raccordo da un punto di vista dinamico sono:

- l'accelerazione efficace a_i ;

- il contraccollo, e cioè la variazione temporale dell'accelerazione efficace:

$$C = da/dt \quad (4)$$

- la velocità di sollevamento V_m .

Per le linee ad Alta Velocità, quindi, le problematiche principali sono legate allo studio dell'influenza delle azioni dinamiche che sono trasmesse dal binario ai mezzi, con la precisa finalità di ottenere una geometria tale da fare sì che queste azioni siano minime e con variazioni caratterizzate dalla massima gradualità. Si cerca pertanto di determinare, a seconda delle diverse situazioni progettuali, il raccordo che garantisca migliore continuità ed uniforme variabilità nelle sollecitazioni dinamiche imposte, fornendo quindi le più idonee condizioni di comfort e sicurezza.

2.4. Il monitoraggio

A seguito di quanto esposto, si pone con evidenza la necessità di un sistema di monitoraggio, al fine di sorvegliare il comportamento delle opere, delle strutture, dei terreni e dell'armamento, mantenendo sotto controllo l'evoluzione temporale dei fenomeni, elaborando previsioni e fornendo informazioni affidabili per la manutenzione.

I sistemi di acquisizione dati potranno essere di tipo continuo ovvero discreto, mentre le strumentazioni dovranno essere collegate a sistemi automatizzati in grado di dialogare con centri di elaborazione remoti.

3. LA GEOMETRIA DEL BINARIO IN CURVA

3.1. Lo scartamento

Si definisce scartamento la distanza fra i lembi interni dei funghi delle due rotaie misurata normalmente all'asse del binario ed alla quota di 14 millimetri al disotto del piano di rotolamento o piano del ferro.

Lo scartamento è pari a 1,435 m per i tratti di linea in rettifilo o con curve di grande raggio e, pertanto, deve essere mantenuto costante per le linee ad Alta Velocità.

Lo scartamento può essere misurato a binario carico o a binario scarico.

Evidentemente la prima misura è quella più probante perché la grandezza viene rilevata mentre il binario si trova in condizioni prossime a quelle del normale esercizio; è necessario, però, disporre di un convoglio ferroviario vero e proprio formato da un mezzo di trazione e da una carrozza registratrice (carrozza Amsler) oppure di un carrello registratore automotore (carrello MATISA PV9).

La misura a binario scarico, pur effettuata in condizioni diverse da quelle nelle quali si trova il binario durante il passaggio dei treni, è quella più comunemente usata perché è eseguibile con strumenti leggeri portatili (calibri) o con carrellini facilmente deragliabili (carrello Jezzi).

La misura dello scartamento può essere, poi, continua (effettuata con l'aiuto delle carrozze registratrici o dei carrelli registratori) o discontinua (eseguita mediante calibri).

È chiaro che il primo tipo di rilievo fornisce una visione completa dell'andamento dello scartamento; la maggior facilità del secondo tipo lo rende, però, più usuale. In questo caso sarà l'esperienza del rilevatore a supplire le deficienze del sistema di misura.

3.2. I raccordi planimetrici

Il raccordo planimetrico è una curva a raggio variabile che viene interposta tra un rettilineo ed una curva circolare, allo scopo di introdurre gradualmente la curvatura.

In mancanza del raccordo planimetrico tra rettilineo e curva circolare si verificherebbe l'insorgenza repentina dell'accelerazione centrifuga i cui effetti, a seconda della velocità del veicolo, determinerebbero disagio per i viaggiatori, la distruzione del binario e/o lo sviamento del veicolo; inoltre non sarebbe possibile introdurre la sopraelevazione con la gradualità e la regolarità necessarie.

3.3. La sopraelevazione

In curva occorre tenere conto degli effetti della forza centrifuga e ciò tanto nei riguardi delle sollecitazioni all'armamento e del pericolo del ribaltamento dei veicoli quanto nei riguardi del comfort dei viaggiatori.

Il classico sistema usato per eliminare tutti gli inconvenienti dovuti alla forza centrifuga è quello di far sì che la risultante della forza stessa e del peso proprio dei veicoli risulti normale al piano del binario.

Per ottenere ciò si inclina il piano stesso sopraelevando la rotaia esterna alla curva e cioè si dà al binario una certa sopraelevazione.

Ovviamente una volta che per una determinata curva si è fissata la sopraelevazione, la condizione in cui la risultante della forza centrifuga e della forza peso risulta normale al piano del ferro si verifica solo quando il moto del veicolo avviene ad una determinata velocità.

Tale sopraelevazione però non può essere aumentata quanto si vuole perché la stessa curva può essere percorsa anche da treni che abbiano una velocità ridotta o addirittura perché un treno potrebbe fermarsi in un tratto in curva. In tali condizioni, se la sopraelevazione assegnata al binario fosse eccessiva, sorgerebbero altri inconvenienti dovuti alla inclinazione dei veicoli rispetto all'orizzontale come, ad esempio, disturbo ai viaggiatori (si pensi alle vetture ristorante) oppure perché la rotaia interna risulterebbe troppo caricata od infine perché diverrebbero pericolose le condizioni di avviamento di un treno precedentemente fermatosi (svio per sormonto della ruota esterna, troppo scarica, sulla rotaia).

Per realizzare la sopraelevazione si alza in modo opportuno la quota della rotaia esterna, lasciando invariata quella della rotaia interna.

Tale soluzione introduce nella livelletta longitudinale una variazione di pendenza pari alla metà di quella del raccordo di sopraelevazione.

Quando si passa da un tratto in rettilineo ad un tratto in curva con una determinata sopraelevazione, occorre realizzare una rampa di raccordo altimetrico della rotaia esterna.

La pendenza da assegnare alle rampe per il raccordo di sopraelevazione della rotaia esterna è pari all'1‰ per velocità superiori ai 100 Km/h

3.4. Lo sghembo

Le due rotaie del binario sono la materializzazione di due rette parallele quando il binario è in rettilineo, sono due archi di circonferenza che giacciono su di una superficie conica quando il binario si trova in piena curva con una sopraelevazione, si possono assimilare a due rette sghembe quando il binario si trova in un raccordo di sopraelevazione.

Quando le due rotaie non giacciono sullo stesso piano si dirà, pertanto, che nel binario è presente uno sghembo.

Lo sghembo non è un difetto del binario, bensì una sua caratteristica geometrica (nei raccordi di sopraelevazione il binario sarebbe difettoso se non esistesse lo sghembo); esso, evidentemente, diventa un difetto del binario quando assume un valore differente da quello corretto.

La presenza dello sghembo impone che la pendenza delle due rotaie non sia la stessa. È possibile, allora, assumere come misura dello sghembo la differenza delle due pendenze.

Per l'esistenza dello sghembo i quattro punti della rotaia, sui quali si dovrebbe appoggiare il veicolo, non si trovano su di un piano, per cui il contatto ruota-rotaia avviene solamente su tre punti e la quarta ruota si trova sempre sollevata rispetto al piano individuato dai tre punti.

Una ruota del veicolo si viene a trovare, quindi, in presenza di sghembo, scaricata, cioè nelle condizioni più a rischio nei confronti dello svio.

Si comprende, allora, il motivo per cui i valori accettati dello sghembo nei raccordi di sopraelevazione (1‰, 1,5‰ e 2‰) siano così piccoli e decrescano con l'aumentare della velocità. Più alta è la velocità, infatti, maggiori sono le forze trasversali che, agendo sulla ruota scarica, potrebbero causarne il sormonto e il conseguente svio.

4. PROBLEMI RELATIVI AL TRACCIAMENTO DI UNA CURVA FERROVIARIA

Nella realizzazione del tracciato particolare perizia deve essere impiegata nel tracciamento delle curve; è qui infatti che si sovrappongono numerose condizioni geometriche imposte per il corretto accoppiamento veicolo-binario al fine di ottenere sicurezza e regolarità di marcia, e il minimo consumo degli organi costituenti il materiale rotabile e del binario.

Bastano piccoli errori nell'impostazione dei dati geometrici, perché la marcia dei convogli non sia più regolare o diventi addirittura insicura.

4.1. La picchettazione delle curve

Le procedure tradizionali di tracciamento delle curve ferroviarie utilizzano il sistema della picchettazione.

In corrispondenza dei punti significativi della curva compresi fra le tangenti calcolate estreme va posto in opera un picchetto di riferimento e la picchettazione va estesa anche alle coppie di punti che precedono e seguono immediatamente le tangenti stesse su ciascun rettilineo.

Ogni picchetto deve essere provvisto di un punto di riferimento. La linea ideale passante per i punti di riferimento di tutti i picchetti di una stessa curva rappresenta il tracciato corretto del binario.

Per l'impossibilità pratica di costruire una picchettazione stabile che definisca l'asse corretto del binario si è convenuto di portare l'asse di riferimento del nuovo tracciato fuori delle rotaie in modo che la distanza che intercorre fra il punto di riferimento dei picchetti ed il bordo interno della più vicina rotaia, considerando lo spostamento del binario, sia normalmente di 1,00 metri.

Tale distanza viene denominata "distanza base" e può essere, secondo i casi, anche diversa da 1,00 m.

Di conseguenza la distanza dei punti di riferimento dei picchetti dal bordo interno della più vicina rotaia, quando il binario è nella posizione rilevata, è la seguente:

$$D = D_0 \pm S \quad (5)$$

dove D_0 è la distanza base adottata e S il valore algebrico dello spostamento del binario risultante dal calcolo.

Tale spostamento va sommato alla distanza base se la picchettazione viene eseguita dal lato degli spostamenti positivi della curva, invece deve essere sottratto se viceversa i picchetti vengono posati dal lato degli spostamenti negativi.

Nelle linee a doppio binario con intervalla costante la picchettazione, comune ai due binari di corsa, va costruita nell'intervalla.

Se il binario rilevato è quello interno, la picchettazione verrà eseguita dal lato esterno di questo considerando una distanza base normale di 1,00 m. Se viceversa il binario frecciato è quello esterno alla curva, i picchetti, dovendo essere impiantati sull'intervalla, verranno a trovarsi dal lato interno del binario rilevato.

Poiché la picchettazione deve rappresentare l'asse di riferimento del binario interno, alla distanza base di 1,00 m si dovrà aggiungere oltre al valore dello scartamento normale del binario, anche la differenza fra l'intervalla corretta e il doppio della distanza base medesima, cioè si avrà:

$$D_0 = 1,00 + 1,435 + (I_0 - 2,00) = I_0 + 0,435 \quad (6)$$

dove I_0 è la grandezza dell'intervalla che dovrà intercorrere fra i due binari di corsa a correzione avvenuta.

Per l'intervalla normale di 2,12 m si avrà $D_0 = 2,555$ m.

Non sempre però è possibile eseguire la picchettazione nell'intervalla a causa della presenza di ostacoli di vario tipo che ne impediscono la costruzione.

In questo caso allora è necessario effettuare la posa dei picchetti all'esterno verso la banchina, riferendola al binario sul quale sono state misurate le frecce e uniformandosi ai criteri indicati per le linee a semplice binario.

In definitiva, prima di iniziare la picchettazione di una curva o di più curve rilevate in gruppo, occorre stabilire:

1. il numero di picchetti da impiantare per ogni curva;
2. da quale lato del binario rilevato si dovrà eseguire la picchettazione;
3. la distanza dei punti di riferimento dei picchetti dal bordo interno della fila esterna di rotaie del binario rilevato.

I picchetti di carattere permanente sono costituiti da spezzoni di rotaia fuori uso annegati in blocchetti di calcestruzzo interrati nella piattaforma (fig. 1).

Tali spezzoni di rotaia sono di tre tipi, caratterizzati dalla diversa lunghezza:

- tipo normale di lunghezza pari a 1,00 m;
- tipo speciale di lunghezza pari a 1,20 m;
- tipo speciale di lunghezza pari a 0,80 m.

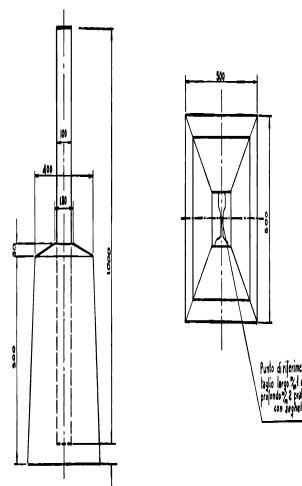


Figura 1 - Particolare del picchetto di riferimento tipo normale da 1,00 m.

Occorre osservare che la suola dello spezzone di rotaia va rivolta verso il binario cui si riferisce la picchettazione.

Per quanto riguarda poi la stampigliatura che viene riportata sullo spezzone, in particolare sulla suola, essa è costituita dal numero del picchetto e dal valore della distanza base (fig. 2).

Sul picchetto di tangenza viene inoltre riportata una T, che sta appunto ad indicare che il picchetto in esame ha la particolarità di rappresentare il picchetto di riferimento relativo al punto di tangenza sul binario (fig. 2).

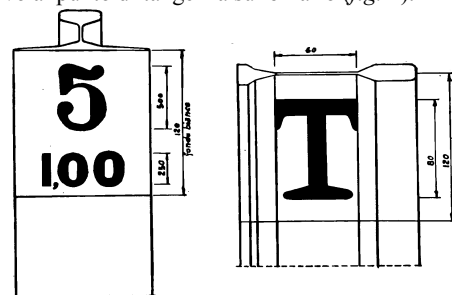


Figura 2 - Particolare della stampigliatura sui picchetti di riferimento.

5. DISPOSITIVI DI MISURA PER IL RILEVAMENTO E L'ANALISI DELLA GEOMETRIA DEL BINARIO SU BASE RELATIVA

In un sistema moderno di manutenzione del binario, i rotabili per il rilievo dei binari hanno un ruolo fondamentale, in quanto consentono il rilevamento geometrico degli impianti d'armamento e, grazie ad apparecchi elettronici di calcolo e di analisi sempre più sofisticati, anche l'analisi a bordo dei dati rilevati.

Ciò permette di valutare la necessità dei lavori per la correzione posizionale del binario, l'armonizzazione di tale necessità con i mezzi finanziari disponibili e, quindi, il loro impiego ottimale.

Le operazioni di misurazione, atte a stabilire se gli scostamenti delle grandezze geometriche del binario siano nella tolleranza prefissata, fanno parte dei principali compiti di controllo e cura del binario.

Fino al 1965 tutti i veicoli per la registrazione della geometria del binario erano equipaggiati con sistemi meccanici di misurazione, i quali trasmettevano i dati di misura, ottenuti nella maggior parte dei casi con

procedimenti di compensazione, tramite funi e rulli su un tavolo di misurazione.

La presenza di varie masse e resistenze negli elementi di trasmissione portava a delle distorsioni dei risultati in funzione della velocità, nel senso che le alte velocità di rilevamento di regola facevano “migliorare” la qualità del binario.

L’eliminazione di questo fenomeno richiedeva successive modifiche dei rilievi, peraltro molto complicate, quando la carrozza di misura non automotrice veniva inserita nella composizione di un convoglio.

Se si volevano evitare queste difficoltà, bisognava effettuare il rilievo della geometria del binario nell’ambito di una corsa speciale, ad una velocità costante relativamente bassa, che ostacolava l’esercizio corrente.

Per tali svantaggi, si è proceduto in due direzioni:

- sistemi di rilevamento privi d’inerzia con rilevatori elettronici e registrazione elettronica dei valori rilevati che consente anche l’ulteriore elaborazione dei dati nel quadro di una valutazione dello stato del binario;
- carrelli automotori che possono marciare almeno alla velocità dei treni merci, cioè a 80 Km/h, nell’operazione di rilievo della geometria del binario.

Entrambe le direzioni di sviluppo hanno prodotto, nel corso degli anni, diverse configurazioni.

Oggi, sia le carrozze veloci, ma non automotrici, che i carrelli automotori sono dotati di sistemi di rilevamento che abbinano la esplorazione meccanica (oppure elettromeccanica) del binario con la registrazione ed elaborazione elettronica dei dati.

Per quanto riguarda i metodi di misurazione, la valutazione della curvatura delle rotaie avviene tradizionalmente tramite misurazione delle frecce.

A fare da riferimento è di regola la cassa (o telaio) del veicolo che, pertanto, deve avere una sufficiente rigidità.

Il valore rilevato viene determinato tramite un circuito analogico o una conversione digitale a bordo del veicolo.

I sistemi di misurazione sono caratterizzati dalla particolarità di indicare un difetto geometrico isolato con dei picchi sul diagramma di registrazione.

Il livello trasversale (sopraelevazione della rotaia esterna rispetto a quella interna alla curva) viene misurato con sistemi giroscopici. I problemi di deriva e insufficienza di stabilità che affliggevano questi sistemi in passato, oggi possono ritenersi completamente risolti.

Notevole importanza, oltre al valore assoluto della sopraelevazione, riveste l’uniformità di questo parametro relativa ad una fissata base di misura, che porta alla definizione dello sghembo.

Il valore dello sghembo si ottiene dalla differenza delle sopraelevazioni calcolata su una certa base di misura; volendo variare la lunghezza di tale base di misura (ad esempio per valutare la qualità della via in relazione ad un rotabile ben preciso), si ricorre alla memorizzazione digitale dei valori misurati, calcolandone, in tempo reale o in tempi successivi, la differenza corrispondente alla lunghezza desiderata.

Per la misurazione dello scartamento si impiegano assi telescopici o palpatori striscianti sul bordo interno delle rotaie; in tal caso la loro particolare costruzione o un dispositivo specifico permettono di transitare senza alcun pericolo di svio sugli scambi.

Alcuni veicoli di rilievo consentono anche di valutare lo stato della superficie di rotolamento delle rotaie.

Si può affermare, senza peraltro commettere alcun errore, che i parametri geometrici classici del binario (scartamento, sghembo, sopraelevazione, ecc.) non sono indipendenti bensì collegati tra loro e responsabili, nel loro andamento spaziale, insieme alla velocità di marcia della eccitazione dinamica del rotabile.

Va osservato che il profilo trasversale offerto dalle rotaie acquista un’influenza fortemente crescente con l’aumento della velocità, sulla qualità di marcia dei veicoli, per cui la misurazione continua e la rappresentazione dei risultati rivestono grande importanza.

Finora si usava registrare le grandezze misurate in forma analogica continua, con l’aiuto di registratori - diagrammatori. Lo sviluppo dei procedimenti di analisi, invece, ha portato obbligatoriamente alla digitalizzazione dei valori per l’ulteriore elaborazione dei dati.

Gli sforzi per rendere più piccolo il tavolo di lavoro e la possibilità di sovrapposizione dei singoli canali di registrazione, hanno portato all’uso di plotter a comando digitale che consentono anche la stampa di testi esplicativi sui diagrammi di registrazione.

Il veicolo di rilievo misura una moltitudine di dati che poi vengono rappresentati sotto forma di diagrammi. Al fine di ridurre la sovrabbondanza di dati e di giungere ad una rappresentazione chiara ed efficace dei risultati, sono stati sviluppati procedimenti di analisi dei valori misurati.

Allo scopo di dare un’idea più precisa su come, in effetti, viene effettuata la misurazione dei parametri che definiscono la geometria del binario, mediante l’impiego di sistemi di misura ed analisi, di seguito verranno descritte alcune delle procedure adottate.

5.1. Dispositivo di misura della macchina EM 50 (Plasser & Theurer)

La macchina automotrice EM 50, prodotta dalla Plasser & Theurer, viene adottata attualmente in Italia per la misura e la registrazione dei parametri del binario.

Il dispositivo di misura è composto di una parte meccanica ed una elettronica e possiede canali di misurazione per i seguenti parametri:

- scartamento;
- sopraelevazione;
- sghembo;
- frecce di ambedue le file di rotaie;
- velocità di misurazione;
- chilometraggio;
- marcatura eventi.

La parte meccanica consiste in tre assi telescopici di misura con relativi bracci longitudinali articolati di collegamento con il telaio del veicolo o con gli assi principali.

Il moto relativo tra assi di misura e/o telaio del veicolo viene rilevato mediante estensimetri e trasformato in segnali elettronici proporzionali. La trasformazione in tensioni elettroniche elimina la trasposizione meccanica complicata e soggetta a guasti, ed offre inoltre il vantaggio che le scale di misurazione possono essere variate entro limiti piuttosto vasti.

Il dispositivo di misurazione è composto dalle seguenti apparecchiature:

- palpatori;
- trasduttore con trasmissione elettrica;
- registratore;
- motorizzazione degli apparecchi di registrazione e misurazione del percorso;

- sistema di calcolo.

I singoli palpatori sono disposti in modo da poter essere adibiti a diversi compiti di misurazione (frece, scartamento ecc.). Si tratta di tre assi telescopici spostabili lateralmente, con i quali vengono misurate le frecce, il livello dei giunti e lo scartamento.

Lo sghembo viene calcolato di continuo, su una base di misura selezionabile e partendo dai valori della sopraelevazione che a sua volta viene misurata tramite un sistema di rilevamento delle accelerazioni con compensazione della forza centrifuga, montato in cabina sopra l'asse posteriore.

La trasmissione del segnale avviene direttamente al computer di bordo tramite interfaccia digitale analogica. In qualità di convertitori del segnale vengono utilizzati trasduttori di spostamento lineare.

5.2. Carrello MPV 9E (Matisa)

Il carrello MPV 9E (prodotto dalla Matisa) è un veicolo di registrazione della geometria del binario (fig. 3).

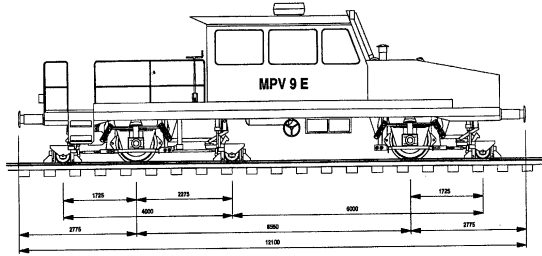


Figura 3 - Carrello MPV 9E (Matisa).

È un carrello di media grandezza, progettato e costruito secondo le norme internazionali applicabili ai veicoli su rotaia ed, inoltre, è concepito per circolare in un convoglio come un vagone standard.

Il sistema di misura è costituito da tre carrelli di misura, ciascuno dei quali porta due palpatori a rotelle e due contropalpatori che permettono l'attraversamento degli scambi evitando l'insorgere di problemi.

Il telaio del veicolo, essendo indeformabile, viene preso come riferimento per la misura dei parametri geometrici del binario.

La misura dei difetti (salti) del livello longitudinale delle rotaie nel piano verticale avviene con riferimento ad una base costituita da tre punti: due di essi sono individuati dai punti di contatto della singola rotaia con le ruote 1 e 3 appartenenti ai due assi principali mentre il terzo punto è individuato dal punto di contatto della ruota 2 di un asse di misura con la medesima rotaia (fig. 4).

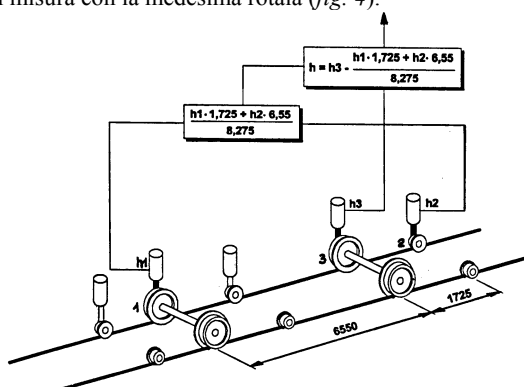


Figura 4 - Schematizzazione della misura del difetto del livello longitudinale.

Gli spostamenti verticali rispetto al riferimento (costituito dal telaio rigido del veicolo di misura), rilevati da sensori elettronici montati sul veicolo, sono rappresentati dai valori h_1 , h_2 e h_3 .

Il difetto del livello longitudinale h corrisponde allo spostamento verticale che si ha sulla ruota 3, avendo assunto come base di misura (pari a 8,275 m) la distanza tra l'asse della ruota 1 e quello della ruota 2, dato dalla seguente espressione:

$$h = h_3 - \frac{h_1 \cdot 1,725 + h_2 \cdot 6,550}{8,275} \quad (7)$$

Occorre osservare che, si può anche effettuare la misura del difetto del livello longitudinale di ciascuna rotaia con riferimento ad una base di misura pari a 10 m (distanza tra i due assi di misura estremi del veicolo); in tal caso l'espressione di h diventa:

$$h = h_3 - \frac{h_1 \cdot 1,725 + h_2 \cdot 8,275}{10} \quad (8)$$

dove questa volta lo spostamento verticale h_1 è misurato sulla ruota (dell'asse di misura) posizionata all'estremo opposto del veicolo, sulla medesima rotaia, rispetto alla ruota 2.

Tra i parametri che definiscono la geometria del binario, misurabili dal carrello MPV 9E, vi è anche lo sghembo.

Come già affermato in precedenza, lo sghembo è rappresentato dalla variazione della posizione altimetrica relativa delle rotaie considerata su una lunghezza di misurazione nota.

Ai fini della sua misura, però, lo sghembo può anche essere definito come la differenza di livello tra due profili trasversali misurata su una base di lunghezza nota.

Dal punto di vista operativo, la misura dello sghembo mediante l'utilizzo del carrello MPV 9E, viene effettuata sfruttando appunto quest'ultima definizione data per lo sghembo (fig. 5).

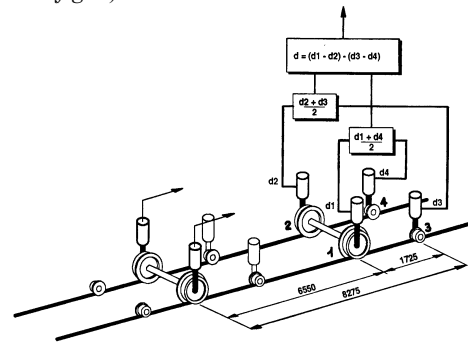


Figura 5 - Schematizzazione della misura dello sghembo.

In particolare, i sensori elettronici (montati sul telaio rigido) rilevano i valori d_1 , d_2 , d_3 e d_4 degli spostamenti verticali relativi rispettivamente alle ruote 1, 2, 3 e 4, quindi si ottiene il valore dello sghembo d secondo la seguente espressione:

$$d = (d_1 - d_2) - (d_3 - d_4) \quad (9)$$

È evidente che, possono utilizzarsi diverse lunghezze (ad esempio 6,550 m o anche 8,275 m) della base di misura in funzione degli assi che vengono presi in considerazione.

Nell'acquisizione dei dati relativi alla misura dello sghembo, generalmente viene utilizzata la base di misura più corta, come peraltro è evidenziato nello schema riportato in figura 5.

È bene osservare che, i dati rilevati corrispondenti ad una determinata base di misura possono essere commutati in seguito alla variazione della lunghezza della base di

misura.

Il carrello MPV 9E fornisce, inoltre, il valore dello scartamento ΔE (fig. 6).

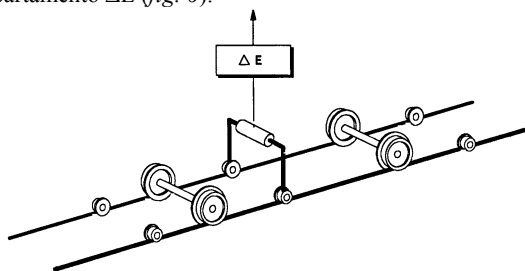


Figura 6 - Schematizzazione della misura dello scartamento.

Per il rilevamento dei valori delle frecce, è necessario osservare innanzitutto che la misura viene effettuata dal carrello MPV 9E separatamente su ciascuna rotaia.

Tale misura corrisponde al movimento del palpatore a rotelle sull'asse di misura centrale, tenuto conto anche dei movimenti dei due palpatori a rotelle sugli assi di misura esterni (fig. 7).

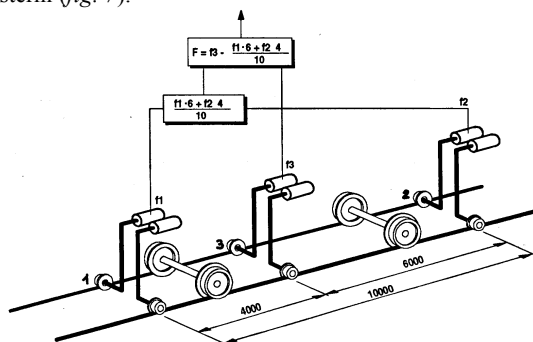


Figura 7 - Schematizzazione della misura delle frecce.

L'espressione che fornisce il valore della freccia F in funzione degli spostamenti orizzontali f_1 , f_2 e f_3 , rilevati dai sensori elettronici, sulle ruote (che rotolano su una medesima rotaia) degli assi di misura, è la seguente:

$$F = f_3 - \frac{f_1 \cdot 6 + f_2 \cdot 4}{10} \quad (10)$$

Un ulteriore parametro geometrico del binario, che può essere misurato mediante l'impiego del carrello MPV 9E, è la sopraelevazione. Essa è rappresentata dalla differenza altimetrica, misurata in un piano verticale normale all'asse del binario, tra le due rotaie.

La sopraelevazione (della rotaia esterna rispetto a quella interna alla curva) viene misurata attraverso un pendolo elettronico montato sul veicolo di misura.

L'influenza della forza centrifuga è compensata elettronicamente tramite i dati che arrivano dai sensori elettronici e la misura della velocità (fig. 8).

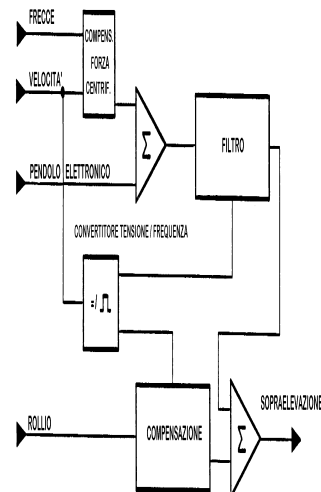


Figura 8 - Schema di misura della sopraelevazione.

Anche il rollio viene compensato mediante i dati forniti dai sensori elettronici che controllano, in particolare, l'assetto dell'asse di misura centrale.

Sul diagramma di registrazione (fig. 9) sono riportati i diagrammi dei singoli parametri geometrici del binario misurati dal veicolo di misura, cioè:

- livello longitudinale su ciascuna rotaia;
- sopraelevazione;
- sghembo;
- freccia per ogni singola rotaia;
- scartamento;
- distanza percorsa dal veicolo.

Inoltre, sempre sul diagramma di registrazione vengono evidenziati gli eventi o dettagli (ad esempio gallerie, ponti, stazioni, scambi, ecc.).

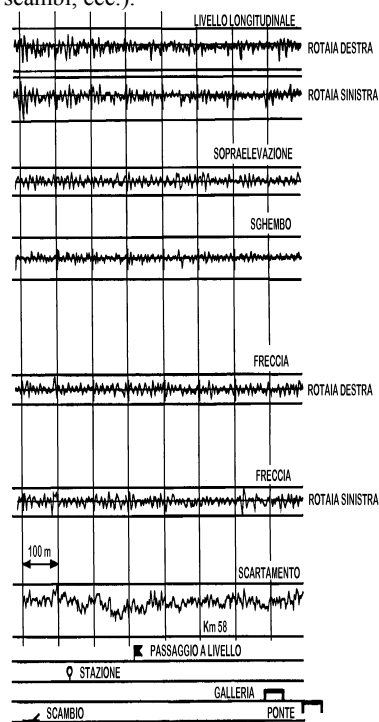


Figura 9 - Diagramma di registrazione.

5.3. Considerazioni sulle macchine di misura

La precisione delle grandezze rilevate e registrate mediante l'impiego delle apparecchiature di misura descritte nei paragrafi precedenti è elevata, perché sono del tutto assenti i fenomeni di inerzia tipici degli organi di trasmissione meccanica e, inoltre, perché vengono compensati tutti i possibili movimenti orizzontali e verticali del carrello e della cassa della vettura di misura.

Tuttavia, la rappresentazione del livello longitudinale e della curvatura risente di alterazioni, rispetto ai valori reali delle grandezze, dovute alle caratteristiche intrinseche del sistema di misura, in quanto le grandezze sono rilevate rispetto a riferimenti non assoluti (le basi di misure considerate sono infatti riferimenti di tipo relativo).

In effetti, l'andamento delle rotaie, nel piano orizzontale ed in quello verticale, può essere pensato come scomponibile in una somma di infinite componenti sinusoidali di differente lunghezza d'onda.

Per ogni componente sinusoidale esiste, per effetto del sistema di misura su corde, un ben preciso rapporto fra valore reale del difetto e valore rilevato; inoltre, il difetto rilevato è sfasato rispetto al difetto reale.

La funzione che fornisce lo sfasamento ed il rapporto fra detti valori dei difetti si chiama funzione di trasferimento.

Tanto più è ampio il campo di lunghezza d'onda nel quale il valore del citato rapporto è uguale o prossimo all'unità (in tal caso il difetto reale è circa pari al difetto rilevato) tanto più il sistema di misura è fedele.

Per conseguire tale obiettivo, nelle macchine di misura moderne, la misura delle frecce viene effettuata in modo asimmetrico, cioè in un punto non centrale della corda.

Inoltre, poiché è opportuno estendere l'indagine conoscitiva del binario a lunghezze d'onda sufficientemente grandi, alle quali l'assetto del binario condiziona fortemente la qualità di marcia dei rotabili, in particolare per la curvatura e per i difetti di livello longitudinale, devono essere impiegate basi relative di misura lunghe il più possibile.

5.4. Sistemi di analisi della geometria del binario

Nel campo della manutenzione e del rinnovamento dell'armamento si avverte in misura crescente il bisogno di adottare criteri di pianificazione che consentano di raggiungere i seguenti risultati:

- migliorare la qualità del binario;
- contenere il volume degli interventi;
- comprimere i costi;
- ottimizzare l'allocatione delle risorse;
- prevenire le avarie;
- ridurre la soggezione alla circolazione.

Per conseguire tali obiettivi è necessario svincolarsi dalla rigidità temporale e tipologica dei vecchi criteri, che prevedono interventi generalizzati da ripetersi secondo una cadenza rigida.

L'intento che si va affermando è di pervenire ad una pianificazione dinamica e calibrata sulle effettive necessità di intervento delle singole sezioni di binario.

In tale ottica la programmazione degli interventi va orientata in maniera differenziata in funzione di due distinte tipologie di difetti:

1. puntuali (cioè concentrate in zone limitate di binario);
2. diffusi (cioè sparsi in tratte più o meno estese di binario).

I difetti del primo tipo possono avere implicazioni sulla sicurezza dell'esercizio, allorché superino determinate soglie. Essi vanno analizzati in tempo reale (al momento stesso del rilevamento) e sono generalmente oggetto di interventi localizzati.

I difetti del secondo tipo sono di solito analizzati in tempi successivi, in un contesto di elementi il più ampio possibile (dati tecnici, risorse, dati di esercizio, ecc.).

Infatti, poiché questi ultimi comportano un vasto volume di interventi continui con conseguenti ripercussioni notevoli su molti settori (risorse, circolazione, ecc.), si rende opportuno un processo di ottimizzazione che non può essere gestito in tempo reale (cioè al momento dell'acquisizione sul campo dei dati).

5.4.1. Supporto informatico GILDA

Come supporto al processo di ottimizzazione degli interventi è stata sviluppata, dalla Divisione Informatica delle FS, l'applicazione GILDA (Gestione Indici Linee Difettosità Armamento).

Essa rientra all'interno di un progetto di ampio respiro, il progetto PRIMA (PRogrammazione Integrata Manutenzione Armamento), di cui costituisce una prima realizzazione.

Il sistema che si vuole realizzare ha in generale l'obiettivo di raccogliere e gestire le informazioni relative alla qualità delle linee ferroviarie.

Di questo progetto, GILDA rappresenta quella quota di sistema che si preoccupa dei seguenti aspetti:

- rappresentare i valori geometrici dell'armamento;
- supportare la pianificazione delle attività di manutenzione;
- verificare il livello di qualità delle linee ferroviarie.

Pertanto, l'applicazione GILDA ha lo scopo di presentare in maniera interattiva la sintesi integrata degli elementi implicati nei processi di diagnosi e pianificazione (consistenza, tracciato, condizioni, ecc.) e la sua evoluzione nel tempo per consentire all'utilizzatore di seguire lo sviluppo dei vari elementi e, attraverso l'impostazione di soglie di accettabilità, di selezionare le tratte di binario che necessitano di interventi.

GILDA consente la visualizzazione e stampa di grafici bidimensionali nei quali, per qualunque tratta della rete ferroviaria, vengono rappresentati i dati che informano sulla qualità geometrica del binario.

Tali dati vengono raccolti periodicamente da una vettura di rilievo del binario.

5.4.2. Sistema analitico CMA-E (Plasser & Theurer)

Ancora pochi anni or sono l'impiego di strumenti elettronici per l'analisi delle misurazioni della geometria del binario era una possibilità quasi sconosciuta. Le grandezze misurate venivano rappresentate in forma puramente grafica, il che richiedeva una loro analisi attraverso un processo laborioso da affidare soltanto a personale altamente qualificato che ne dava comunque una valutazione soggettiva.

Il desiderio di semplificare e razionalizzare il lavoro analitico ha fatto sì che venissero messi a punto sistemi elettronici di analisi, ai quali l'ingegnere ferroviario ricorre per la programmazione ed il controllo dei lavori di manutenzione dell'armamento.

Il CMA-E è un sistema analitico di questo tipo e si basa sul programma ADA III che serve per il controllo della sicurezza dei parametri rilevati sul binario e/o sul

programma ADA II per il calcolo dei coefficienti di qualità del binario, che possono essere utilizzati direttamente per la programmazione degli interventi di macchine per la manutenzione dell'armamento.

Il programma di elaborazione ADA III evidenzia automaticamente tutti quei tratti di binario dove vengono superate le soglie di tolleranza dei singoli parametri misurati (scartamento, sopraelevazione, ecc.), indicando per ciascun difetto rilevato che superi la soglia più alta, la posizione chilometrica, la sua estensione ed ampiezza.

In questo modo viene definita sia l'urgenza che anche il tipo di intervento da effettuare per rendere nuovamente sicuri quei punti del binario che si sono rivelati pericolosi per l'esercizio.

I valori di soglia del programma di elaborazione ADA III sono facilmente modificabili, con il conseguente notevole vantaggio di poterlo utilizzare anche per la programmazione di interventi che hanno come scopo l'eliminazione di difetti locali non ancora pregiudizievoli per la sicurezza dell'esercizio, ma che comunque influenzano negativamente il comfort di viaggio e la periodicità della manutenzione sistematica.

Il programma analitico ADA II serve per il calcolo in tempo reale dei coefficienti di qualità del binario già nel corso del viaggio di misurazione.

Questi coefficienti si basano sulle variazioni delle accelerazioni verticali ed orizzontali, rilevate per sezioni, che subirebbe un veicolo percorrendo il binario alla velocità massima consentita e seguendo in ogni momento esattamente la posizione reale del binario.

Le variazioni di accelerazione vengono calcolate continuamente dai difetti di freccia, livello longitudinale e scartamento, tenendo conto della velocità massima consentita nella sezione di rilevamento.

I coefficienti di qualità del binario, calcolati generalmente per tratti di 500 m o di 1000 m, costituiscono la base per la compilazione di un elenco dei lavori di manutenzione da effettuare sul binario, suddivisi secondo la loro priorità.

6. DISPOSITIVI DI MISURA ED ANALISI PER IL RILEVAMENTO DEL BINARIO RISPETTO AD UN SISTEMA DI RIFERIMENTO ASSOLUTO

Le Amministrazioni Ferroviarie di molti Paesi mirano all'Alta Velocità e ad un generale incremento delle velocità medie di viaggio e di trasporto, oltre che all'aumento della densità del traffico.

Pertanto è indispensabile una esatta geometria del binario, a garanzia della sicurezza, del comfort di marcia e della durabilità del sistema.

Questi requisiti vengono precisati sotto forma di valori teorici per l'allineamento, il livello longitudinale e la sopraelevazione del binario, contenuti negli elaborati di progetto.

La misurazione della geometria reale del binario e il suo confronto con quella teorica, finalizzato al calcolo dei valori di correzione da impostare sulle macchine operatrici, oggi viene effettuata sempre più diffusamente adottando metodi automatici e utilizzando macchine (o carrozze) di misura dotate di apparecchiature elettroniche di elevata precisione.

Tali strumenti, forniti dalla notevole evoluzione della tecnologia avutasi nell'ultimo decennio, hanno reso possibile la riduzione dell'elevato impiego di personale e di risorse economiche di cui necessitavano i metodi tradizionali di misura dei parametri geometrici del binario adottati in passato.

6.1. Macchina EM-SAT (Plasser & Theurer)

Il rilevamento delle frecce e del livello longitudinale del binario nella condizione reale si effettua, mediante l'impiego della macchina EM-SAT, con riferimento a punti fissi sulla base di una corda lunga costituita da un raggio laser.

Tale rilevamento avviene, come è noto, a settori (fig. 10) con moto della macchina di tipo discontinuo, caratterizzato da soste in corrispondenza dei punti fissi di riferimento PF, per cui il moto può essere definito "a scatti".

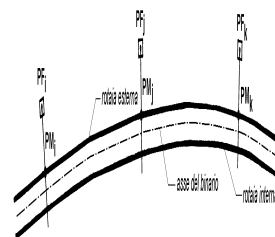


Figura 10 - Punti fissi PF e punti di marcatura PM.

Dal punto di vista operativo il rilievo della geometria del binario, eseguito con la macchina EM-SAT, consta di tre fasi fondamentali (fig. 11):

1. Operazioni preliminari (Fase 1);
2. Operazione di rilievo (Fase 2);
3. Trasferimento dei carrelli nei punti di marcatura successivi (Fase 3).

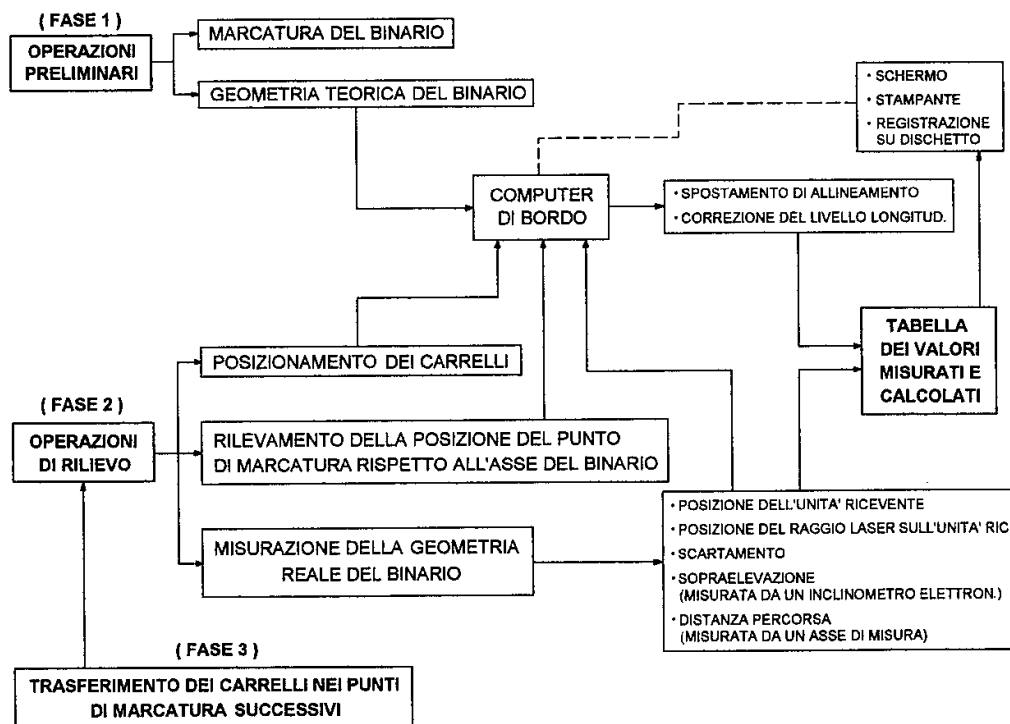


Figura 11 - Schema operativo del rilevamento della geometria del binario mediante l'impiego della macchina EM-SAT.

Nelle operazioni preliminari (Fase 1) occorre eseguire la marcatura del binario in corrispondenza dei punti fissi di riferimento, ottenendo i cosiddetti punti di marcatura PM (posizionati sulla fila esterna dal lato interno dell'anima della rotaia) su questi punti viene applicata una pellicola riflettente del diametro di 5 cm per consentire il rilevamento meccanizzato.

Inoltre, nelle operazioni preliminari, è indispensabile fornire la geometria teorica del binario (valori teorici delle frecce, almeno ogni 5 m, e del livello longitudinale sulla base di un rilevamento con corda lunga) al computer di bordo.

Dopo aver effettuato le operazioni preliminari, si passa poi alle operazioni di rilievo (Fase 2).

Le principali operazioni che caratterizzano la Fase 2 sono le seguenti:

- Posizionamento dei carrelli (carrello misuratore e carrellino satellite) sui punti di marcatura del binario (cioè in corrispondenza dei punti fissi di riferimento), con l'ausilio di due videocamere (una per ciascuna rotaia) e di un monitor posto in cabina. Ad esempio, il carrello misuratore (su cui è montata l'unità ricevente laser) si mette sul punto di marcatura PM_i (fig. 10) mentre il carrellino satellite (su cui è montata l'unità emittente laser) sul punto di marcatura PM_j;
- Rilevamento della posizione del punto di marcatura rispetto all'asse del binario. Questa operazione è svolta da un microregolatore automatico, il quale calcola la distanza e l'altezza dell'asse del binario rispetto al punto di marcatura;
- Misurazione della geometria reale del binario. Nel corso di tale operazione, i valori reali sono misurati e letti dal software del computer di bordo; in particolare, vengono rilevati:
 - posizione dell'unità ricevente;

- posizione del raggio laser sull'unità ricevente;
- scartamento;
- sopraelevazione (misurata da un inclinometro elettronico);
- distanza percorsa (misurata da un asse di misura).

Il software installato nel computer di bordo della macchina EM-SAT utilizza i valori teorici riguardanti la geometria del binario (acquisiti nella Fase 1) per confrontarli con quelli reali (misurati nella Fase 2) e determinare quindi i valori dello spostamento e della correzione del livello longitudinale del binario.

È importante notare che, i valori rilevati si ottengono in seguito alla mediazione che viene eseguita sull'elevato numero di singole misure.

In definitiva, come output del computer si ottengono i valori dei parametri geometrici del binario misurati e quelli calcolati, i quali vengono visualizzati sullo schermo in forma tabellare; inoltre, essi possono essere stampati su carta dalla stampante collegata al computer o registrati su dischetto (per essere poi utilizzati in analisi successive ovvero inseriti nel computer di guida automatica della rinalzatrice).

A questo punto, avviene il trasferimento dei carrelli nei punti di marcatura successivi (Fase 3). Ad esempio, il carrellino satellite passa dal punto di marcatura PM_j a quello PM_k mentre il carrello misuratore lascia il punto di marcatura PM_i per portarsi in quello PM_j (fig. 10).

Va osservato che, proprio durante il trasferimento dei carrelli il computer, non essendo temporaneamente impegnato nell'acquisizione di nuovi dati rilevati, effettua il confronto tra la geometria teorica e quella reale del binario, relativamente all'ultimo settore rilevato.

Infine, nella fase di trasferimento della macchina gli assi di misura, i quali nella fase di misurazione sono pressati contro la rotaia da cilindri pneumatici, vengono sollevati e

bloccati sotto il telaio della macchina in modo da ridurre la loro usura.

La macchina EM-SAT, come è noto, può essere usata in combinazione con una rincalzatrice, alla quale trasferisce i valori rilevati (via radio oppure tramite dischetto).

6.2. Il sistema Palas (J. Müller AG)

Nell'operazione di controllo del binario, il PALAS utilizza un rilevatore laser (RALF) della posizione dei punti fissi di riferimento e una bussola giroscopica (DRU) per calcolare continuamente la posizione assoluta del binario, fornendo un elevato grado di precisione.

Sotto l'aspetto prettamente operativo possono distinguersi due fasi fondamentali che caratterizzano il controllo del binario con il PALAS (fig. 12):

1. Operazioni preliminari.
2. Operazioni di rilievo.

Le operazioni preliminari da effettuare prima di passare al rilievo del binario sono le seguenti:

- Collocazione dei triploprismi sui punti fissi di riferimento (posizionati sui pali della T.E.).
- Immissione nel computer del PALAS dei dati riguardanti la posizione dei punti fissi di riferimento.
- Immissione nel computer del PALAS dei dati teorici riguardanti la geometria del binario.

Le operazioni di rilievo del binario vengono eseguite dal PALAS combinando i due seguenti tipi di rilievo:

- a. Rilievo su base assoluta.

Rilievo su base relativa. Il rilievo su base assoluta è possibile grazie all'impiego simultaneo dei due apparecchi elettronici fondamentali che costituiscono il dispositivo di misura:

- Rilevatore laser RALF (Rotating Angle measurement by Laser reFlecting) che sfrutta i fasci di luce riflessi da un triploprisma (collocato su ogni punto fisso di riferimento) per misurare gli angoli orizzontali e verticali. In realtà, il RALF effettua il rilevamento secondo due modi operativi: il modo-F (misura in avanti - forward) e il modo-S (misura di lato - side). Nel modo-F il RALF misura l'angolo orizzontale e quello verticale dalla sua posizione collimando in avanti verso il triploprisma. Nel modo-S il RALF misura, normalmente all'asse del binario, la distanza orizzontale e verticale tra questo e il punto fisso su cui è montato il triploprisma. Nelle operazioni di rilievo è importante rispettare i limiti D_{max} e D_{min} relativi alla distanza tra il RALF e il triploprisma.
- Bussola giroscopica DRU (Dynamic Reference Unit) che determina in modo continuo gli orientamenti del carrello in uno spazio tridimensionale con riferimento alla direzione nord e a quella della gravità terrestre; in pratica, essa determina i seguenti tre orientamenti: angolo orizzontale o azimuth (azimuth); angolo verticale o d'inclinazione longitudinale (pitch); angolo d'inclinazione trasversale o rollio (roll).

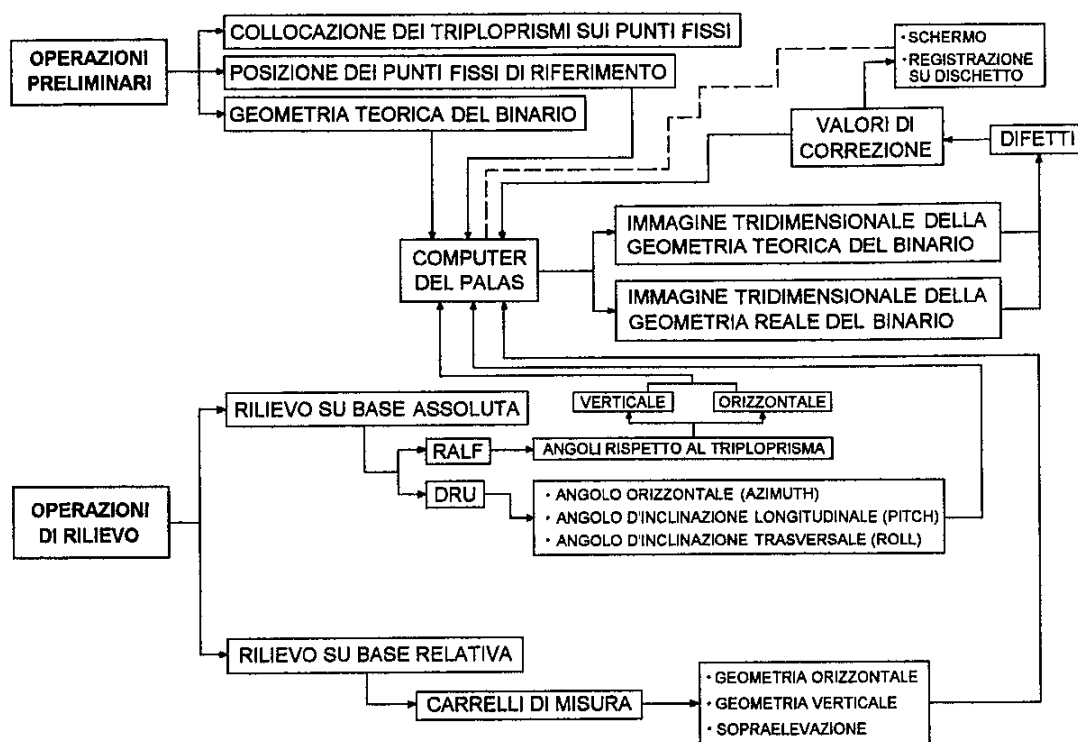


Figura 12 - Schema operativo del rilevamento della geometria del binario mediante l'impiego del sistema PALAS

Il rilievo su base relativa si fonda sul rilievo del binario in tre punti diversi per mezzo di tre carrelli di misura appartenenti alla macchina operatrice, sotto la cui parte anteriore è montato il PALAS.

Dal rilievo su base relativa si ottengono i valori relativi alle seguenti categorie di parametri:

- geometria orizzontale (rettifili, curve di transizione, curve circolari, ecc.);

- geometria verticale (rampe, raccordi altimetrici, ecc.);
- sopraelevazione.

Il computer del PALAS utilizza i dati rilevati, sia su base assoluta che su base relativa, li confronta continuamente con i dati teorici (immessi nel computer nella fase preliminare) al fine di determinare gli eventuali difetti e costruisce contemporaneamente due immagini tridimensionali del binario, una relativa ai dati teorici (che

prevede anche la posizione dei punti fissi di riferimento) mentre l'altra derivante dai dati reali rilevati.

Entrambe le geometrie (reale e teorica), oltre ad essere visualizzate sullo schermo posto nella cabina dell'operatore, possono essere registrate su dischetto per successive analisi.

In definitiva, dal computer del PALAS si ottengono i valori di correzione dei parametri geometrici del binario, i quali, nel caso in cui il PALAS venga usato nel modo di lavorazione, sono utilizzati continuamente dal computer allo scopo di guidare in modo automatico la macchina di manutenzione nelle operazioni di ripristino del binario.

Occorre osservare che, prima di iniziare un passaggio di rilevamento o di manutenzione, l'operatore deve selezionare dai dati base il punto di partenza del tratto di binario in esame.

Le procedure di calcolo eseguite dal computer iniziano automaticamente non appena la macchina operatrice accoppiata al PALAS viene condotta oltre il punto di partenza.

6.3. Sistema di picchettazione "Bosco"

Il sistema tradizionale di picchettazione di riferimento per le curve ferroviarie è realizzato, come è noto, mediante picchetti di riferimento posti in corrispondenza delle sole curve dei tracciati ferroviari, materializzati con spezzoni di rotaia.

Il sistema di picchettazione "Bosco", prodotto dalla ditta Bosco, è caratterizzato dal fatto di sostituire gli spezzoni di rotaia (caratteristici del sistema di picchettazione tradizionale) con dei pozzetti in calcestruzzo, sicuramente più stabili, contenenti un perno solidale al pozzetto stesso, il quale permette l'applicazione di strumenti di misurazione di alta precisione.

Tale perno è inamovibile, pertanto materializza un punto di riferimento assoluto per il controllo e la correzione delle curve.

Il sistema di picchettazione "Bosco" trova immediato impiego presso le FS e in tutti quei settori che presentano la stessa esigenza di disporre di una struttura fissa atta a misurare con esattezza gli spostamenti di una rotaia dalla propria sede (sia in senso orizzontale che verticale), senza peraltro costituire ostacolo nei riguardi del corretto funzionamento delle macchine di manutenzione del binario.

Il pozzetto (fig. 13), che rappresenta lo strumento essenziale per l'adozione del sistema di picchettazione "Bosco", è costituito dai seguenti elementi:

- rivestimento esterno (a) in cls prefabbricato con foro centrale alla base (il foro ha la doppia funzione di riferimento per il posizionamento e di eventuale deflusso delle acque meteoriche);
- massello interno (b) in cls prefabbricato dotato di quattro scanalature laterali confluenti nel fondo del pozzetto verso il foro di deflusso delle acque;
- boccia filettata (c) doppiamente zincata a caldo, annegata nel massello in cls, per l'alloggiamento del perno di riferimento assoluto;
- perno (d) realizzato in ottone filettato con testa esagonale e parte cilindrica per l'ancoraggio dello strumento di misura;
- piastrina in ottone (e), posizionata sulla parte superiore del massello, sulla quale deve essere incisa la distanza orizzontale che il perno (punto fisso) deve

avere dal bordo interno della rotaia nel punto decimetrato corrispondente;

- piastrina in ottone (f) sulla quale deve essere riportata la quota della superficie di rotolamento della rotaia rispetto alla punta del perno;
- elemento di copertura (g) realizzato in cls.

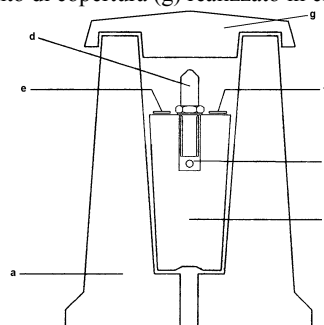


Figura 13 - Pozzetto in cls prefabbricato.

Va osservato che, durante la posa in opera del pozzetto, è importante assicurare la perfetta verticalità del perno; ciò è realizzato mediante un perno a vite con bolla sferica (fig. 14) utilizzato durante il collocamento del massello all'interno della custodia.

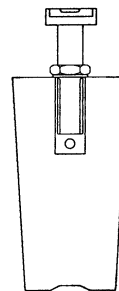


Figura 14 - Perno a vite con bolla sferica per il rispetto della verticalità.

È opportuno sottolineare alcuni aspetti di carattere generale che riguardano il sistema di picchettazione "Bosco" e che ne fanno apprezzare l'impiego:

1. Il picchetto non può essere interessato, in alcun modo, da eventuali agenti esterni che possano vararne la posizione; ciò è assicurato dall'ubicazione del perno al di sotto del piano di campagna, dalla protezione da parte dell'elemento di copertura e dal collocamento del pozzetto al di fuori del corpo stradale.
2. L'inamovibilità del picchetto consente di effettuare il rilevamento per il controllo della curva con la certezza di appoggiare il riferimento a punti esatti.
3. I pozzetti, essendo posti oltre la sede del corpo stradale e non generando sporgenze sul piano di campagna, non interferiscono in alcun modo con le operazioni effettuate dalle macchine profilatrici, di conseguenza viene evitato il problema del ripristino dei picchetti spostati o sradicati da tali macchine.
4. Gli strumenti di misura adottati per eseguire il rilevamento ed il controllo del tracciato ferroviario consentono un'elevata precisione nelle misure e una notevole semplicità d'impiego; quest'ultima caratteristica si ripercuote positivamente sui tempi di rilevamento.
5. È possibile effettuare anche il rilievo dell'andamento altimetrico della rotaia.

6. Dal punto di vista economico, il costo del pozzetto e la sua posa in opera è molto contenuto rispetto al sistema tradizionale di picchettazione delle curve ferroviarie. Inoltre va detto che, le spese relative ai successivi controlli e alla manutenzione, non essendo necessari i controlli sulla picchettazione o il ripristino dei picchetti, sono pressoché nulle.

In conclusione si può dire che il sistema di picchettazione "Bosco" presenta molti vantaggi tra i quali spiccano la notevole semplicità operativa e l'elevata stabilità.

6.4. Il rilevamento globale del binario in coordinate assolute

Il controllo dell'assetto del binario, con particolare riferimento alle caratteristiche plano-altimetriche del piano di rotolamento, ha sempre rappresentato, nell'ambito delle FS, un problema di fondamentale importanza.

Ancora oggi, nonostante il notevole progresso tecnologico che ha caratterizzato gli anni di fine millennio, la correzione ed il controllo del tracciato ferroviario si effettuano, nella maggioranza dei casi, con il tradizionale metodo Hallade e la verifica delle condizioni geometriche della linea avviene con l'ausilio delle macchine di misura.

Il metodo Hallade consente la correzione del tracciato ma, sebbene conservi una sua validità, rappresenta un sistema relativo che comporta reiterate micro-modifiche del tracciato ogni qualvolta si sottopone quest'ultimo ad un nuovo studio e prescinde dalla posizione altimetrica e dalla correzione dei rettifili (o rette).

Infatti, le FS adottano il sistema di controllo della posizione del binario per mezzo dei picchetti di curva disposti lungo le linee consentendo la verifica delle sole curve su punti relativi (i picchetti) e senza alcuna possibilità di operare su rette e quote.

Da quanto appena detto, è scaturita l'esigenza di adottare un nuovo sistema di controllo dell'assetto del binario.

L'avvento tecnologico ha favorito la realizzazione di un sistema topografico per il rilievo, il posizionamento ed il controllo del binario.

Esso si basa sul seguente principio: note le coordinate topografiche (x,y,z) di un punto del binario nello spazio, verificare che quel punto non abbia subito degli spostamenti e, in caso contrario, determinare la loro entità, in maniera da rendere possibile un riposizionamento corretto del punto stesso.

Il sistema riporta, quindi, la posizione del binario nello spazio in maniera assoluta però, affinché ciò sia vero anche in pratica, bisogna che il rilievo ed il controllo avvengano in un sistema di coordinate assolute.

A tale scopo si realizza una rete di punti topografici fissi distribuiti lungo la linea ferroviaria in prossimità del binario (i pali T.E. sono l'alloggiamento preferito) e tali da consentire il rilievo, il posizionamento ed i successivi controlli del binario.

In questo modo si ha la possibilità di ripristinare la posizione del binario ogni qualvolta fosse necessario un intervento, senza apportare micro-modifiche al tracciato e, soprattutto, aggiungendo ai dati corretti delle curve quelli relativi ai rettifili e alla posizione altimetrica.

La rete ferroviaria tedesca è già controllata con tale sistema così come quella norvegese mentre la rete svizzera ha in corso di completamento la rete di punti fissi utilizzando, attualmente, un sistema misto.

Altre strutture ferroviarie si stanno attrezzando nella direzione tracciata dai tedeschi, prediligendo il sistema

assoluto rispetto alla relatività della picchettazione tradizionale delle curve.

Nell'approfondire il discorso riguardante il rilevamento ed il controllo del binario con riferimento ad un sistema topografico assoluto, è necessario evidenziare le fasi operative che lo caratterizzano:

1. Sulla rete ferroviaria va inserita una maglia di punti topografici fissi determinati mediante triangolazioni e poligonazioni.
2. Con un adeguata apparecchiatura topografica va effettuato il rilievo planoaltimetrico del binario in ogni suo punto utile legando il rilievo stesso alla rete di punti fissi per mezzo di intersezioni topografiche e rilievi di tipo celerimetrico (questa operazione deve essere coadiuvata da un'attrezzatura che tenga legata la posizione del prisma riflettente col binario in maniera tale da consentire un rilievo in condizioni di offset stabile).
3. Il rilievo del binario va confrontato con le caratteristiche ottimali di tracciato determinate per mezzo di adeguati software di progettazione e studio; quindi, valutati gli scarti della posizione attuale (o reale) del binario rispetto a quella ottimale (o teorica), è possibile effettuare un riposizionamento corretto del binario stesso.
4. Nel tempo, con reiterati controlli, il sistema consente il ripristino della posizione corretta del binario con un "passaggio topografico" sulla tratta in esame.

Nel prosieguo della trattazione verranno descritti, in maniera più o meno dettagliata, alcuni sistemi moderni di posizionamento topografico in coordinate assolute e di controllo del binario, i quali, per ora, sono stati sperimentati in Italia solo su brevi tronchi di alcune linee ferroviarie ma che, in breve tempo, verranno impiegati diffusamente su tutta la rete ferroviaria.

6.5. Sistema AGEOS di posizionamento e controllo del binario

Il sistema di posizionamento (assoluto) e controllo del binario realizzato dalla Società AGEOS è costituito essenzialmente dai seguenti componenti:

- un teodolite elettronico con distanziometro incorporato (GDM 4000), di tipo motorizzato e dotato di aggancio automatico al prisma per il rilievo robotizzato;
- un'unità remota (RPU) per il controllo e l'esecuzione del rilievo del prisma;
- un carrello (Surver) in grado di scorrere sul binario, isolato, calibrato e dotato di una serie di misuratori per il rilievo di scartamento e sopraelevazione e di un sistema di trasmissione dei dati da/e per un PC portatile integrato al carrello stesso.

Il Servizio Armamento e Opere Civili ha acquistato tutte le attrezzature che compongono tale sistema, e l'Ufficio Opere Civili di Napoli ha curato una prima fase di sperimentazione effettuata sulla linea Caserta - Foggia sulla tratta Vitulano - S. Lorenzo.

In virtù di quanto è emerso dal test e di quanto è stato detto, si possono dedurre alcuni aspetti di fondamentale importanza in relazione ai possibili sviluppi futuri del sistema sperimentato e di eventuali altri sistemi che potranno essere realizzati nel corso dei prossimi anni.

Come già accennato in precedenza, le scelte riguardanti la tipologia e la logistica della rete di punti di appoggio

devono essere regolamentate da norme in maniera da consentire la standardizzazione delle operazioni.

Per il rilievo della poligonale e dei punti fissi occorre una integrazione delle apparecchiature e un appropriato studio delle metodologie operative.

Il rilievo del binario con tale metodo va rivisto alla luce di un carrello (Surver) sicuramente diverso da quello facente parte del sistema sperimentato; infatti, esso presenta una serie di inconvenienti, primo fra tutti, il considerevole peso che rende difficoltoso il suo impiego.

Va, inoltre, perfezionata la meccanica di alcune apparecchiature del carrello per consentire, in particolare, una lettura dei dati di rilievo beneficiata da scarti di valore più contenuto rispetto a quelli ottenuti nel test effettuato.

È sicuramente da mettere in risalto, nelle operazioni di rilevamento del binario, l'apporto dato dal rilievo robotizzato frutto della tecnologia dell'ultimo decennio e perfezionato fino a consentire il rilievo topografico con scarti estremamente contenuti.

Questo sistema evita difatti tutti quegli errori derivanti dalle operazioni di tipo manuale pur richiedendo un'apparecchiatura più complessa da un punto di vista sia elettronico che meccanico, con il conseguente aumento delle dimensioni e del peso.

Una considerazione particolare occorre fare a proposito della gestione dei dati ottenuti dalle operazioni di rilievo effettuate con il sistema sottoposto al test.

Trattandosi di un sistema che in futuro dovrà essere impiegato su tutta la rete ferroviaria nazionale e, con l'attenzione rivolta all'ottimizzazione delle prestazioni, si ravvede la necessità di un software specifico ed efficace che consenta una procedura standard nella gestione dei dati di rilievo, nella progettazione ed ottimizzazione del tracciato e nel controllo dello stesso.

Inoltre, al software si richiede la capacità di gestire le procedure (e quindi i dati) relative al posizionamento del binario di tipo assoluto con particolare riferimento alle linee ferroviarie esistenti, le quali sono notevolmente condizionate da eventuali vincoli presenti.

Infine, in merito ai valori numerici ottenuti nel corso del test effettuato si può affermare che gli stessi, sebbene perfezionabili, sono da considerarsi buoni e quindi accettabili ai fini delle misurazioni del binario; poi, l'aggiunta di tutti i valori relativi alle rette e alle quote del binario (non ottenibili con il metodo tradizionale) rappresenta un aspetto certamente positivo dell'impiego del sistema AGEOS.

6.6. Sistema GRP2000 (Progetto Leica)

Il sistema GRP2000, progettato dalla Leica, è un sistema che consente il rilevamento globale in coordinate assolute della posizione reale dell'asse del binario e l'analisi delle caratteristiche geometriche corrette dello stesso.

La stazione automatica che consente la misura della posizione tridimensionale del carrellino è una stazione

totale robotizzata Leica TCA2003, ma è prevista anche la possibilità di usare un sistema GPS in tempo reale.

La stazione Leica TCA2003 è una stazione totale robotizzata di altissima precisione, universale per tutti i rilievi di precisione.

Essa possiede un sistema di puntamento automatico ATR1 con camera CCD e utilizza prismi passivi. Inoltre, sono previsti servomotori per le rotazioni automatiche sui due assi.

La precisione del sistema di puntamento automatico è inferiore ad 1 mm per una distanza pari a 200 m mentre la portata dello stesso sistema supera i 1000 m.

Il rilievo del binario mediante l'impiego del sistema GRP2000 (Leica) avviene in due fasi operative fondamentali (fig. 15):

1. Operazioni preliminari.
2. Operazioni di rilievo automatico.

Nella prima fase operativa vengono eseguite le seguenti operazioni:

- Individuazione dei punti fissi di riferimento (materializzati mediante perni porta prisma sui pali della T.E. o propri basamenti oppure sui piedritti in galleria).
- Collegamento dei punti fissi di riferimento con una poligonale di alta precisione, alla quale verranno topograficamente riferiti i punti lungo il tratto di linea ferroviaria oggetto del rilievo.
- Immissione della geometria teorica del binario nel PC portatile, sul quale è installato il software GRPW in di gestione globale del sistema di rilievo automatico.

La seconda fase è invece caratterizzata dalle operazioni di rilievo automatico:

- Rilievo robotizzato della geometria reale del binario con stazioni libere collegate ai punti fissi di riferimento.
- Rilievo delle sezioni in galleria (ovviamente nel caso in cui il tratto di linea oggetto del rilievo sia interessato da una o più gallerie).

Il rilievo robotizzato della geometria reale del binario viene eseguito mediante stazionamento libero sui punti fissi di riferimento, posizionando in tali punti lo strumento elettronico TCA2003 di elevata precisione.

Una volta determinate le proprie coordinate nel sistema di riferimento assoluto, lo strumento TCA2003 aggancia il prisma posto sul carrellino, insegue lo stesso sulle successive posizioni e, infine, fornisce le nuove coordinate della posizione raggiunta dal carrellino.

Un computer portatile, con software GRPWin installato, comanda tutte le operazioni di rilievo, acquisizione e registrazione dati attraverso un sistema di collegamento radio (radio link) con i sensori elettronici di misura sul carrellino e con la stazione totale TCA2003.

Grazie ad uno speciale supporto, il PC portatile può essere tenuto sulle spalle dall'operatore.

SISTEMA GRP2000 (LEICA) – SCHEMA OPERATIVO

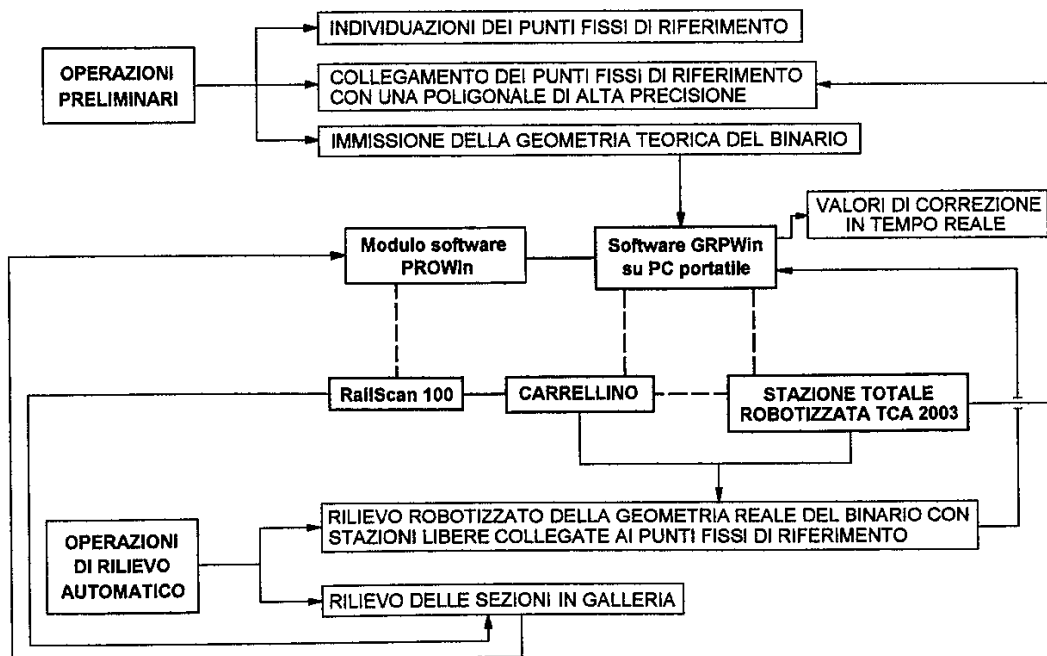


Figura 15 - Schema operativo del rilevamento della geometria del binario mediante l'impiego del sistema GRP2000 (Leica).

Va evidenziato il fatto che, una volta completate le operazioni di messa in stazione dello strumento elettronico e calcolo delle coordinate della stazione nel riferimento assoluto, non sarebbe più necessaria la presenza di alcun operatore in quanto tutti i movimenti di collimazione dovuti allo spostamento del carrellino avvengono automaticamente.

Sempre in automatico, è possibile ottenere anche i valori di scartamento e di sopraelevazione reali, misurati da sensori elettronici (encoder digitale per la misura dello scartamento e inclinometro di misura della sopraelevazione) posti sul carrellino.

Il software GRPWin, avendo acquisito sia i dati riguardanti la geometria teorica sia quelli della geometria reale del binario, fornisce i valori di correzione in tempo reale per ogni punto del tratto di linea.

Il rilievo automatico delle sezioni in galleria (o del profilo minimo degli ostacoli adiacenti la linea ferroviaria), rispetto all'asse reale del binario, viene eseguito dal sistema RailScan100, il quale è posizionato sul carrellino ed è controllato dal modulo software PROWin.

Il modulo software PROWin viene gestito direttamente dal software GRPWin e consente la restituzione delle sezioni di galleria misurate.

Infine, il sistema GRP2000 può gestire moduli software per l'analisi dei dati misurati, l'elaborazione degli elementi geometrici dell'asse reale del binario e la generazione dei dati di input per progettazione e/o file dati per la rinalzatrice.

6.7. Nuovo sistema di posizionamento e controllo del binario in uso presso le DB e le NSB (Ferrovie di Stato tedesche e norvegesi)

Il sistema proposto interessa sia il posizionamento di nuovi binari sia il controllo di quelli già esistenti.

Il suo impiego necessita dell'esistenza, lungo il tratto di linea interessato, di punti topografici di riferimento preventivamente determinati mediante rete di inquadramento o poligonale di precisione.

Ai predetti punti di appoggio, facenti parte di reti di inquadramento e di poligonali di precisione, vanno successivamente riferiti e determinati, sempre con metodi topografici tradizionali, i punti materializzati mediante bulloni porta prisma avvitati su pali e/o portali della T.E., su basamenti in calcestruzzo dei medesimi o sui piedritti delle gallerie.

I punti così materializzati vengono utilizzati per il posizionamento "a stazione libera" dello strumento di misura; il software di sistema prevede diversi metodi di calcolo delle coordinate di stazione rendendo così possibile il posizionamento dello strumento in qualunque punto lo desideri l'operatore.

Quindi, risulta subito evidente uno dei vantaggi fondamentali rispetto ai sistemi tradizionali di rilevamento: i supporti porta prisma una volta misurati e noti in coordinate, non saranno più influenzati da spostamenti intervenuti a causa, per esempio, di una macchina rinalzatrice; qualora per cause esterne un supporto venga rimosso, sarà facilmente rimpiazzabile, esattamente nella posizione corretta.

Il binario, ed in particolare il suo asse, sarà pertanto riferito ad un sistema di coordinate assolute.

Il sistema è composto da i seguenti elementi:

- stazione totale topografica robotizzata Geodimeter modello 4000 (GDM 4000);
- veicolo di misura da posizionare sul binario, completo di unità centrale di calcolo;
- software di sistema;
- prismi e relativi supporti.

La stazione totale topografica robotizzata GDM 4000 rappresenta uno strumento di misura che compendia elevate precisioni nelle misure dei valori lineari ed angolari, con servo motori, funzioni di auto inseguimento del prisma e trasmissione radio dei dati al veicolo di misura.

Pertanto, una volta completate le operazioni di posizionamento sul treppiede e calcolo delle coordinate di stazione, non è più necessaria la presenza di alcun operatore in quanto tutti i movimenti di collimazione dovuti allo spostamento del veicolo avverranno automaticamente.

Il veicolo di misura, dotato di ruote in teflon, è opportunamente isolato così da non chiudere i circuiti di binario ed equipaggiato con tre sensori ed un'unità centrale di calcolo.

Un primo sensore (RPU) comprende il prisma utilizzato dallo strumento di misura e l'unità radio ricevente i dati riferiti alla posizione del veicolo.

Un secondo sensore consiste in un inclinometro digitale in grado di leggere la sopraelevazione della rotaia esterna rispetto a quella interna del binario; un terzo sensore ha, invece, il compito di rilevare con continuità lo scartamento.

Le combinazioni dei dati forniti dai tre sensori, confluenti nell'unità centrale di calcolo, permetterà la determinazione continua delle coordinate del binario.

Inoltre, un sensore esterno denominato RMT consente in qualunque momento il controllo delle misure effettuate costituendo quindi esso stesso una sorta di "punto trigonometrico attivo".

Attraverso dei test effettuati dalle DB (Ferrovie di stato tedesche) su linee ad alta velocità in fase di costruzione, si sono ottenute precisioni, relative al posizionamento assoluto del binario, sempre al di sotto dei 5 mm per distanze del veicolo inferiori ai 300 m dalla stazione di misura.

Considerando che non dovranno più essere posizionati spezzoni di rotaia ogni 10 m, con tutti gli oneri derivanti (costo della rotaia, messa in opera gravosa, spostamento degli spezzoni in fase di rinalzatura, ecc.), bensì punti fissi comunque ripristinabili e di basso costo, si deducono immediatamente i vantaggi economici che il sistema presenta.

Un indubbio vantaggio operativo consiste nel fatto che la stazione di misura è posizionata al di fuori dell'influenza del passaggio dei convogli, pertanto è possibile mettere in opera i prismi sui relativi supporti e impiantare la stazione anche durante il passaggio dei treni senza che l'esercizio debba essere interrotto.

In effetti anche le operazioni di misura del binario potranno essere svolte senza pregiudizi per l'esercizio, in quanto il veicolo di misura, all'occorrenza, può anche essere rimosso data la sua leggerezza.

Infine, è opportuno osservare che, la rete topografica d'appoggio potrà sicuramente essere utilizzata come

sistema di riferimento generale, cioè non solo per le misure relative al binario ma anche per operazioni topografiche che esulano dal rilievo del solo tracciato ferroviario, in quanto i prismi impiegati sono di tipo standard.

7. CONCLUSIONI

Nella disamina di tutte le apparecchiature per il rilevamento e il controllo dei parametri geometrici del binario, in uso o in via di adozione presso le FS, sono stati analizzati i seguenti aspetti fondamentali:

- caratteristiche costruttive delle apparecchiature;
- principi di funzionamento delle apparecchiature;
- procedure operative di rilievo della geometria del binario;
- valutazione dei dati rilevati.

Proprio quest'ultimo aspetto risulta alla base della determinazione del grado di efficienza di un tratto di linea ferroviaria.

Il grado di efficienza del tratto di linea viene valutato sia da un punto di vista geometrico, strettamente legato alla sicurezza, sia in relazione al comfort di marcia per i viaggiatori.

Un problema di fondamentale importanza è rappresentato dalla necessità di adottare un sistema di riferimento caratterizzato da coordinate di tipo assoluto.

Al tal fine è necessario applicare al binario un concetto topografico molto semplice ma notevolmente efficace: "nota la posizione $P(x, y, z)$ di un punto P nello spazio, riferita ad un sistema di assi cartesiani, comunque si sposti il punto P , la sua posizione originaria può essere ripristinata".

A tutt'oggi il rilievo dei parametri geometrici del binario, eseguito mediante l'impiego di carrelli registratori con l'ausilio di un elaboratore elettronico dotato di apposito software di gestione ed analisi dei dati rilevati, fornisce indicazioni dei difetti e quindi dello stato di efficienza del binario ma non consente di individuare la posizione dei difetti stessi, e quindi, la loro entità assoluta.

In sostanza, come già affermato in precedenza, i carrelli registratori effettuano il rilevamento della geometria del binario su base relativa, per cui sono del tutto incapaci di rilevare l'esatta posizione dei difetti del binario rispetto ad un sistema di riferimento di tipo assoluto.

Ogni qualvolta, a seguito di un controllo, si renda necessario eseguire delle microvarianti per ripristinare i parametri corretti della geometria del binario, come ovvia conseguenza, si ha che la linea ferroviaria non resta geometricamente immutata nel tempo.

Quand'anche l'entità di queste continue variazioni sia minima, con il passare del tempo possono dare origine a situazioni (notevole differenza dell'assetto geometrico risultante dalle ripetute microvarianti apportate rispetto a quello originario) tali da rendere necessari lavori di riassetto del binario onerosi sia in termini di tempo che in termini di possibile intralcio alla circolazione dei veicoli ferroviari sul tratto di linea.

La elaborazione di progetti analitici delle linee ferroviarie appoggiati ad un sistema di riferimento di tipo assoluto, permette di determinare il valore e la direzione dello spostamento subito da un qualunque punto del tracciato ferroviario nel tempo.

Dunque, conoscendo le componenti dello spostamento di un qualsiasi punto secondo gli assi del riferimento

assoluto, sarà possibile effettuare il riposizionamento nello spazio del punto in questione.

In conclusione, un modo di procedere del tutto generale per realizzare un corretto riposizionamento del binario, rispetto ad un sistema di riferimento di tipo assoluto, dovrebbe essere caratterizzato dalle seguenti fasi operative:

1. Creazione di una rete di punti topografici a ridosso della linea ferroviaria in esame opportunamente collegata a punti IGM (Istituto Geografico Militare).
2. Rilievo dell'assetto geometrico del binario allo stato attuale eseguito mediante l'impiego di strumentazioni topografiche (vedi sistemi AGEOS o GRP2000 della Leica).
3. Definizione di un progetto analitico del tracciato ferroviario sulla base dei dati teorici (o corretti) e di quelli ottenuti attraverso il rilievo della geometria del binario.
4. Esecuzione dei lavori con macchine di manutenzione (rincalzatrici) del binario dotate di sistema integrato per il controllo e posizionamento del binario (vedi sistema PALAS).

Tale modo di procedere è in perfetta sintonia con le crescenti esigenze di:

- efficienza;
- sicurezza;
- comfort di marcia;

che caratterizzano le linee ferroviarie moderne.

Infine, circa la possibilità di utilizzare il GPS (Global Positional System) per le operazioni di controllo della geometria del binario, c'è da affermare che alla attualità non sono stati ancora raggiunti quei livelli di risoluzione a terra che renderebbero efficace il metodo. Tuttavia è presumibile che, nell'immediato futuro, l'avanzamento tecnologico consentirà tale procedura.

8. BIBLIOGRAFIA

1. ANGELERI G.: *"Le curve delle linee ferroviarie. Geometria e cinematica"*, Ed. CIFI, Roma 1987
2. ANTONUCCI E.: *"Infrastrutture ferroviarie"*, Pitagora Editrice, Bologna, 1993.
3. ARENNILLAS MELENDO J.: *"L'alta velocità ferroviaria in Spagna"*, Ingegneria Ferroviaria, 6 1994.
4. BAUMGARTNER J.P.: *"Alta velocità in Europa: 'arcipelago' o 'rete'?"*, Vie e Trasporti - Anno LVI, 551 Agosto-Settembre 1987.
5. BENEDETTO C.: *"Alta Velocità Ferroviaria - Le problematiche ambientali"*, Le Strade - anno XCVII n.1309 - Marzo 1995.
6. BONO G., FOCACCI C., LANNI S.: *"La Sovrastruttura Ferroviaria"*, C.I.F.I., Roma, 1997.
7. CAVAGNARO M.: *"Standard e modello dell'Alta Velocità ferroviaria al servizio delle città del terzo millennio"*, Ingegneria Ferroviaria - Aprile 1997
8. COLELLA M., MARINO M., PERSIA P., SDOGA S.: *"La nuova linea ad Alta Velocità Roma - Napoli. Ponti e viadotti"*, Ingegneria Ferroviaria - Luglio 1999
9. COLONNA P., PISCIOTTA M.: *"L'Alta velocità ferroviaria"*, Vie & Trasporti - n. 607, 1995
10. COLONNA P.: *"Studio su alcune caratteristiche dei materiali per ballast, con particolare riferimento alla composizione granulometrica ed all'uso di scorie siderurgiche"*, Ingegneria ferroviaria, 6 1983
11. LAGANÀ A.: *"L'Alta Velocità e le grandi aree metropolitane"*, Ingegneria Ferroviaria - Aprile 1997
12. Litra Service d'Information pour les Transport Publics: *"L'alta Velocità: la Svizzera e l'Europa"*, Le strade - anno XCVI - Giugno 1994.
13. MARAINI E.: *"La rete europea ad alta velocità: prospettive e programmi"*, Ingegneria Ferroviaria - Luglio 1999
14. MAYER L.: *"Impianti ferroviari. Tecnica ed esercizio"*, C.I.F.I., Roma, 1986.
15. MONTEPARA A., SANTAGATA F., VIRGILI A.: *"Una curva di frenatura per infrastrutture viarie con variazione continua del contraccolpo con legge sinusoidale (FCS): Possibile utilizzazione nel campo ferroviario"*, Ingegneria Ferroviaria, Febbraio 1991.
16. NATONI F.: *"Curve di transizione nei tracciati ferroviari"*, La tecnica professionale, ottobre 1982
17. NATONI F.: *"La nuova linea ad Alta Velocità Roma - Napoli. Gli impianti d'armamento"*, Ingegneria Ferroviaria - Luglio 1999
18. PANDOLFO A.: *"La direttissima Roma-Firenze - L'attivazione dell'ultima tratta"*, Ingegneria Ferroviaria, Novembre 1993.
19. PETRICCIONE P.: *"La linea ad Alta Velocità Roma - Napoli"*, Ingegneria Ferroviaria - Luglio 1999
20. RANZO A.: *"Alta Velocità ferroviaria in Italia - Una richiesta irrinunciabile di ricerca avanzata"*, Le Strade - anno XCIV n. 1285 - Giugno 1992.
21. TESORIERE G., SIMONE L.: *"Sulla scelta di un idoneo raccordo plano-altimetrico nelle curve di linee ferroviarie ad alta velocità"*, Ingegneria Ferroviaria, Settembre 1987.
22. TESORIERE G.: *"Strade Ferrovie Aeroporti"*, UTET, Torino, 1990.
23. TILLI F.: *"Convegno a Toronto sulle Alte Velocità ferroviarie - Aspirazioni e progetti in tutto il mondo"*, Ingegneria Ferroviaria, Gennaio 1994.
24. VICUNA G.: *"Organizzazione e tecnica ferroviaria"*, C.I.F.I., Roma, 1986.
25. ZACCARIA M., FOCACCI C., GENNARI G.: *"Manuale del tecnico del binario" - Vol. 7 "Caratteristiche geometriche del binario"*, C.I.F.I., Roma, 1978.
26. ZACCARIA M.: *"Gli elementi dei tracciati ferroviari"*, C.I.F.I., Roma, 1985.