

SCIENZA E TECNICA

Perché un subballast

Dott. Ing. Damiano ORLANDI

SOMMARIO – I risultati del calcolo a fatica di una serie di strutture di tipo tradizionale con diversi spessori di ballast dimostrano un comportamento a fatica insoddisfacente del ballast che determina un rapido decadimento del livello del binario. Il comportamento di una struttura con subballast è del tutto diverso in quanto in tal caso il ballast lavora esclusivamente a compressione e con esclusione di fenomeni di fatica.

La applicazione della legge di MINER al tipo di struttura considerato porta a valutare la vita teorica del subballast in circa un secolo.

Altro notevole vantaggio che offre il subballast è la sua capacità di conseguire una notevole omogeneizzazione della piattaforma.

La metodologia adottata, i cui risultati trovano conferma nelle prove in sito, può essere applicata agevolmente a diverse composizioni del traffico e a diverse caratteristiche della struttura.

1. In un precedente articolo [19] abbiamo illustrato il metodo per la valutazione dei fenomeni di fatica nella struttura sotto binario.

Mantenendo l'impegno allora assunto si forniscono ora i risultati di una ricerca condotta a tale riguardo.

1.1. Tensioni

La ricerca è stata condotta secondo il diagramma di flusso di fig. 1 sulla base della composizione di traffico considerata nel precedente articolo. Seguendo la 1^a colonna di tale diagramma,

si è proceduto anzi tutto alla valutazione delle sollecitazioni di tutta una serie di strutture sotto il carico di veicoli diversi (vedi fig. 2) utilizzando i parametri ed i metodi di calcolo adottati dall'ORE.

Un primo esame ha interessato delle strutture di tipo tradizionale (senza subballast) e con traverse da 2,60 m facendo variare lo spessore del ballast fra 30 e 50 cm. I valori massimi delle tensioni principali, in regime quasi statico, figurano nella tab. 1 e nella fig. 3 che si riferisce al carico di un locomotore viaggiatori.

Il fatto più rilevante che si nota è la presenza di sforzi di tra-

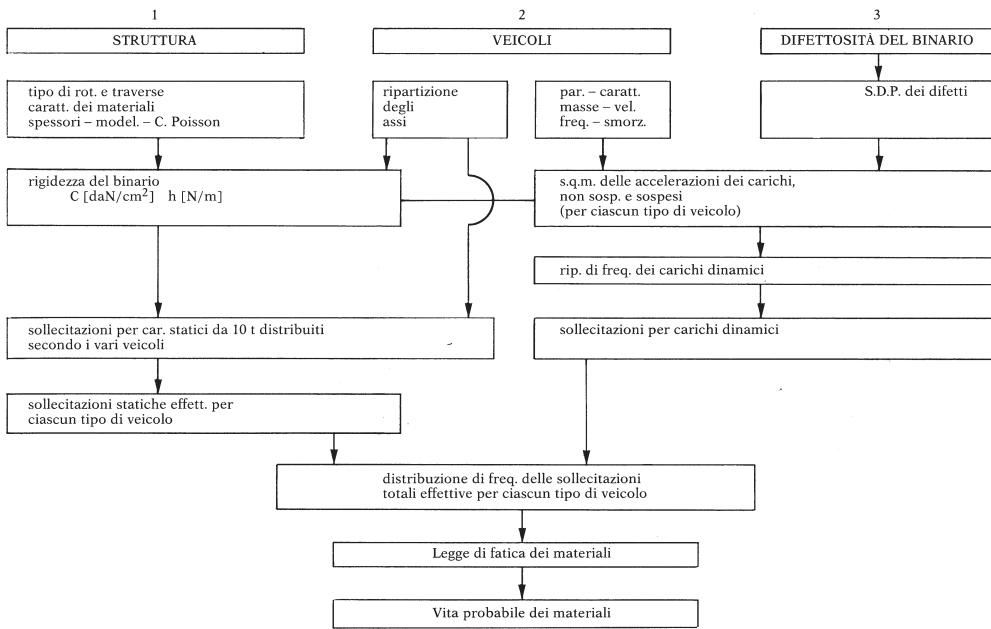


Fig. 1

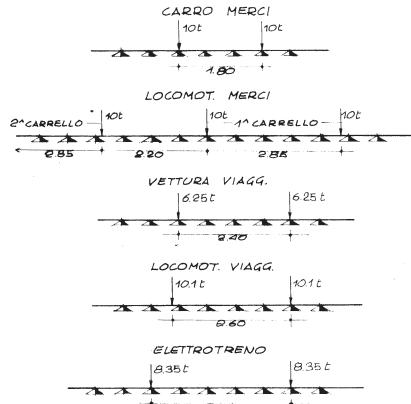


Fig. 2 – Schema dei carichi relativi ad un carrello.

TABELLA 1
STRUZZURA SENZA SUBBALLAST – TENSIONI PRINCIPALI
ALLA BASE DEL BALLAST (CARICHI STATICI)

| | SPESS. 35 cm $E = 1500 \text{ daN/cm}^2$ | σ_x | σ_y | σ_z |
|-----------------|---|------------|------------|------------|
| CARRO MERCI | 0.129 | 0.572 | -0.669 | |
| LOCOMOT. MERCI | 0.130 | 0.524 | -0.613 | |
| VETTURA | 0.090 | 0.322 | -0.374 | |
| LOCOMOT. VIAGG. | 0.147 | 0.506 | -0.589 | |
| ELETTROMOTRICE | 0.135 | 0.412 | -0.478 | |

re con subballast legato, dotato di una sia pure modesta resistenza a trazione, e formato da un misto bitumato o cementato, le cui caratteristiche sono indicate nelle figure da 4 a 6.

Come può rilevarsi da dette figure, che si riferiscono sempre al passaggio di un locomotore viaggiatori in regime quasi statico, il regime delle tensioni nel ballast è completamente cambiato. I

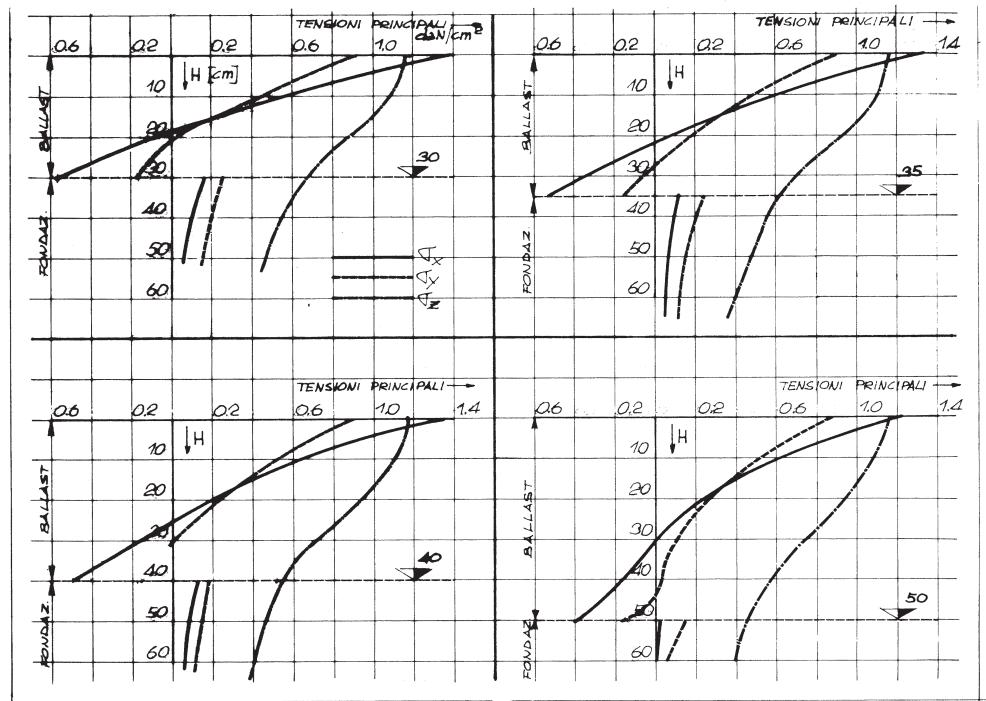


Fig. 3 – Tensioni in una struttura di tipo tradizionale al variare dello spessore del ballast (carico statico loc. viaggiatori).

zione nel ballast che, per uno spessore di 35 cm, impiegato in Italia nelle linee di grande traffico, e per un carico quasi statico raggiunge i 0.60 daN/cm^2 , interessando il ballast stesso per circa un terzo del suo spessore. Tale valore, includendo gli effetti dinamici, supera 1 daN/cm^2 a 3 s.q.m.

1.2. Successivamente sono state prese in esame delle struttu-

fatti più importanti sono la scomparsa di ogni sforzo di trazione e la conseguente notevole riduzione del taglio.

1.2.1. Per quanto concerne il misto bitumato (figg. 4 e 5) sono stati considerati per semplicità due valori del modulo (50.000 e 90.000 daN/cm^2) relativi uno al periodo caldo e l'altro al periodo freddo dell'anno ed uno spessore del subballast pari a 12 cm.

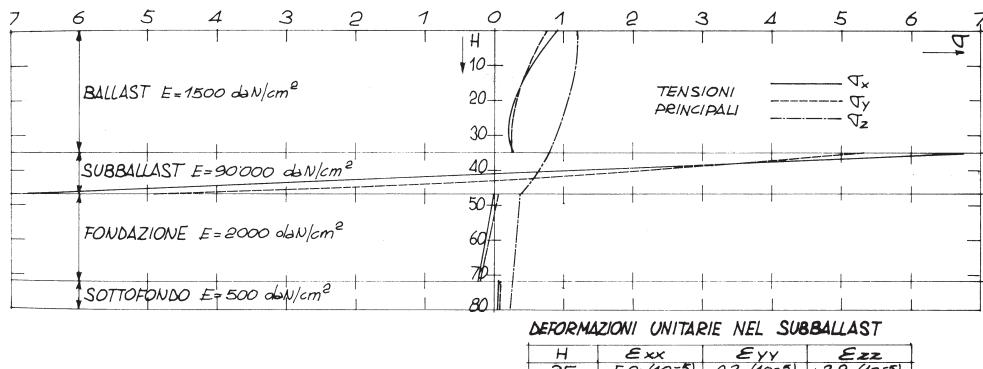


Fig. 4 – Tensioni e deformazioni statiche in una struttura con subballast in misto bitumato da 12 cm su fondazione da 25 cm – E = 90.000 DaN – Carico statico loc. viaggiatori.

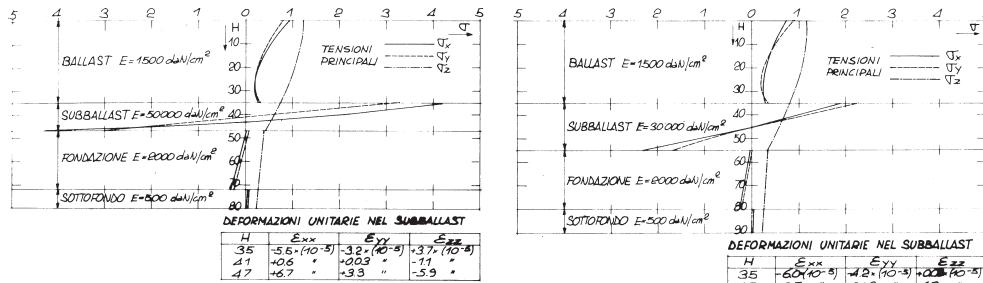


Fig. 5 – Tensioni e deformazioni statiche in una struttura con subballast in misto bitumato da 12 cm su fondazione da 25 cm – E = 50.000 DaN/cm². – Carico statico loc. viaggiatori.

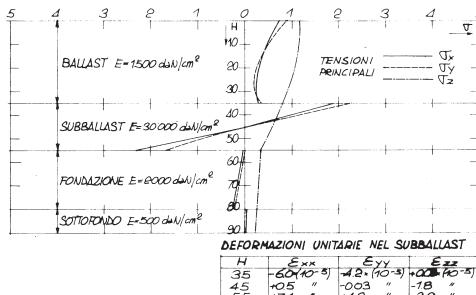


Fig. 6 – Tensioni e deformazioni statiche in una struttura con subballast in misto cementato da 20 cm su fondazione da 25 cm – E = 30.000 DaN/cm². – Carico statico loc. viaggiatori.

Il valore quasi statico delle deformazioni unitarie relativo al transito dei vari tipi di veicoli risulta dalla tabella n. 2.

1.2.2. Per il misto cementato (fig. 6) è stato assunto un valore del modulo di 30.000 DaN/cm² corrispondente al valore medio della resistenza a compressione riscontrato nei lavori della 2^a fase della DD Roma-Firenze (vedi fig. 7).

TABELLA 2
DEFORMAZIONI UNITARIE NEL SUBBALLAST IN MISTO BITUMATO SPESSEZZO 12 cm – CARICHI STATICI

| | | |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|
| E SUBBALLAST | 90000 daN/cm ² | 50000 daN/cm ² |
| E FONDAMENTA | 1500 daN/cm ² | |
| E SOTTOFONDO | 500 daN/cm ² | |
| CARRO MERCI | 6.7×10^{-5} | 7.8×10^{-5} |
| LOCOMOT. MERCI | 6.1×10^{-5} | 7.1×10^{-5} |
| VETTURA | 3.7×10^{-5} | 4.3×10^{-5} |
| LOCOMOT. VIAGG. | 5.7×10^{-5} | 6.8×10^{-5} |
| ELETTROMOTRICE | 1.7×10^{-5} | 5.5×10^{-5} |

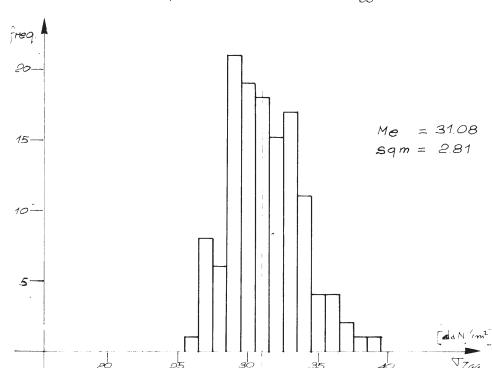


Fig. 7 – Distribuzione di frequenza della resistenza a compressione a 7 gg del misto cementato.

Al riguardo è stata applicata la relazione $E = 1000 K_{r7}$ della quale viene data giustificazione nell'appendice. Il valore delle tensioni di trazione del misto cementato da 20 cm, sempre in regime quasi statico, risulta dalla tabella 3.

TABELLA 3
TENSIONI NEL SUBBALLAST IN MISTO
CEMENTATO DA 12 cm TENUTO CONTO
DELLA FESSURAZIONE - $E = 30.000$
DaN/cm²

| | |
|-----------------|--------------------------|
| E FONDAMENTA | 2000 daN/cm ² |
| E SOTTOFONDO | 500 daN/cm ² |
| CARRO MERC | 3.3 daN/cm ² |
| LOCOMOT. MERC | 3.0 daN/cm ² |
| VETTURA | 1.8 daN/cm ² |
| LOCOMOT. VIAGG. | 2.9 daN/cm ² |
| ELETTROMOTRICE | 2.1 daN/cm ² |

Considerata la dispersione dei valori della resistenza di tale materiale sono stati assunti, anche in relazione a 3σ in più o in meno (v. fig. 8), valori del modulo pari a 20.000 e 40.000 daN/cm².

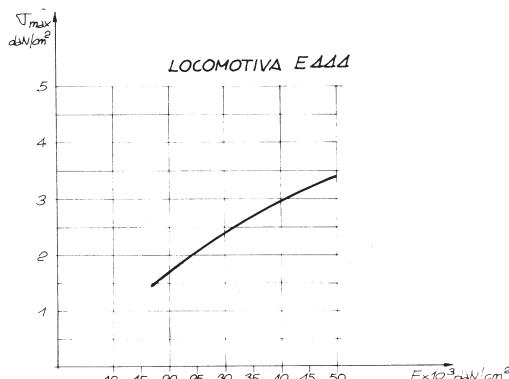


Fig. 8 - Tensioni nel misto cementato al variare del modulo.

Un valore $E = 50.000$ è stato anche riportato per diverse caratteristiche del modulo.

I relativi valori delle tensioni figurano nella tabella n. 4.

2. Fluttuazioni dinamiche

2.1. Seguendo lo schema delle colonne 2 e 3 del diagramma di flusso e sviluppando gli integrali di cui al punto 3.4 del precedente articolo, si perviene ai valori dello scarto quadratico medio delle accelerazioni dei vari carichi sospesi e non sospesi (vedi tab. 5) e quindi alle fluttuazioni dinamiche dei carichi (vedi tab. 6) e relative probabilità di frequenza.

Tali valori vengono poi sommati ai valori statici, ottenendo così i valori totali effettivi delle fluttuazioni dinamiche per ogni tipo di struttura e di veicolo e relativa probabilità di frequenza.

2.2. Una conferma della validità delle valutazioni susepine (riassunte nella tabella 6), si ha da una serie di prove eseguite dalla SNCF nell'ambito dei lavori del Comitato C 113 ("Aumento del limite di carico dei carri circolanti in regime S e SS"), su un tratto di linea armato con rotaie U33 del peso di 46 kg/m, in medie condizioni di manutenzione, al transito di carri e carrelli di tipo moderno alla velocità di 110 km/h. Queste hanno fornito su 384 misure un valore dello scarto quadratico medio delle fluttuazioni dinamiche del carico ruota pari a 1,28 t.

Un calcolo eseguito per le stesse condizioni di velocità, tipo di veicolo e armamento e un valore del parametro della difettosità del binario $A=1,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ tipico di un binario di circa 10 anni di vita (vedi il precedente articolo, punto 3.4) fornisce un valore delle accelerazioni relative alle masse sospese e non sospese pari rispettivamente a 0,873 e 0,064 m/s². Il conseguente scarto quadratico medio delle fluttuazioni dinamiche del carico ruota risulta pari a 1,31 t che differisce poco da quello rilevato nelle prove in linea.

3. Fenomeni di fatica

3.1.1. Nel caso di una struttura di tipo tradizionale, già in condizioni statiche, si verificano nel ballast forti scarti fra le tensioni principali e sforzi di trazione da considerare elevati per un materiale granulare non legato (fig. 3).

Pertanto le ipotesi fatte per il calcolo non sono più valide ed in particolare non è più valida l'ipotesi di comportamento elastico e di aderenza fra ballast e sottofondo.

Gli sforzi di taglio raggiungono valori ragguardevoli con conseguente scorrimento dei grani.

Ciò comporta, oltre che una parziale frantumazione dei grani, una sensibile modifica della tessitura del ballast che subisce un vero e proprio fenomeno di rincrudimento, per far fronte nel modo migliore ai carichi in transito con una diversa disposizione dei grani stessi. Il ballast tende così ad una sistemazione staticamente soddisfacente, grazie anche ad una specie di precompresione residua, dopo il passaggio di un certo numero di carichi.

Data però la mancanza di omogeneità, ciò avviene a prezzo di cedimenti differenziati del piano di rotolamento con perdita del livello longitudinale e trasversale.

Una successiva operazione di livello corregge tale situazione

| E MISTO CEMENTATO | 20.000 daN/cm ² | 30.000 daN/cm ² | 40.000 daN/cm ² | 50.000 daN/cm ² |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| E FONDAMENTA | 2.000 daN/cm ² | | | |
| E SOTTOFONDO | 500 daN/cm ² | | | |
| CARRO MERC | 2.4 daN/cm ² | 3.3 daN/cm ² | 4.1 daN/cm ² | 4.8 daN/cm ² |
| LOCOMOT. MERC | 2.2 " | 3.0 " | 3.7 " | 4.4 " |
| VETTURA | 1.3 " | 1.8 " | 2.7 " | 2.7 " |
| LOCOMOT. VIAGG. | 2.1 " | 2.9 " | 3.6 " | 4.2 " |
| ELETTROMOTRICE | 1.7 " | 2.4 " | 2.9 " | 3.1 " |

TABELLA 4

TENSIONI NEL
SUBBALLAST IN MISTO
CEMENTATO DA 12 cm
AL VARIARE DEL SUO
MODULO (TENUTO CONTO
DELLA FESSURAZIONE)

TABELLA 5
SCARTO QUADRATICO MEDIO DELLE ACCELERAZIONI DELLE MASSE SOSPESE E NONSOSPESE - BINARIO NUOVO

| | <i>h</i> [Ruota] mm | <i>A_{ns}</i> [g] | <i>A_{s1}</i> [g] | <i>A_{s2}</i> [g] | <i>V</i> Km/h |
|--|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|
| BALLAST $E = 1500 \text{ daN/cm}^2$ | | | | | |
| CARRO MERCI | 4.80 | 0.841 | 0.067 | - | - 120 |
| LOCOMOT. MERCI | 5.30 | 0.669 | 0.069 | 0.018 | 0.035 120 |
| VETTURA | 5.60 | 1.339 | 0.127 | 0.018 | 0.012 200 |
| LOCOMOT. VIAGG. | 5.80 | 1.206 | 0.063 | 0.024 | 0.016 200 |
| ELETTROMOTRICE | 6.10 | 1.676 | 0.146 | 0.028 | 0.014 250 |
| BALLAST + SUB-BALLAST IN M. BIT. ($E=50000 \text{ daN/cm}^2$) | | | | | |
| CARRO MERCI | 5.80 | 0.948 | 0.061 | - | - 120 |
| LOCOMOT. MERCI | 6.50 | 0.787 | 0.066 | 0.018 | 0.035 120 |
| VETTURA | 6.80 | 1.513 | 0.120 | 0.018 | 0.012 200 |
| LOCOMOT. VIAGG. | 7.10 | 1.373 | 0.060 | 0.024 | 0.016 200 |
| ELETTROMOTRICE | 7.20 | 1.905 | 0.137 | 0.028 | 0.014 250 |
| BALLAST + SUB-BALLAST IN M. BIT. ($E=90000 \text{ daN/cm}^2$) | | | | | |
| CARRO MERCI | 6.00 | 0.959 | 0.061 | - | - 120 |
| LOCOMOT. MERCI | 6.80 | 0.778 | 0.066 | 0.018 | 0.035 120 |
| VETTURA | 7.10 | 1.539 | 0.120 | 0.018 | 0.012 200 |
| LOCOMOT. VIAGG. | 7.30 | 1.391 | 0.060 | 0.024 | 0.016 200 |
| ELETTROMOTRICE | 7.60 | 1.926 | 0.137 | 0.028 | 0.014 250 |
| BALLAST + SUB-BALLAST IN M. CEM. ($E=30000 \text{ daN/cm}^2$) | | | | | |
| CARRO MERCI | 5.80 | 0.948 | 0.061 | - | - 120 |
| LOCOMOT. MERCI | 6.00 | 0.752 | 0.065 | 0.017 | 0.035 120 |
| VETTURA | 6.70 | 1.500 | 0.120 | 0.018 | 0.012 200 |
| LOCOMOT. VIAGG. | 6.80 | 1.346 | 0.059 | 0.024 | 0.016 200 |
| ELETTROMOTRICE | 7.20 | 1.883 | 0.137 | 0.028 | 0.014 250 |
| <i>h</i> RIGIDEZZI DEL BINARIO IN t/mm ($E = \text{CARICO RUOTA}$) | | | | | |
| <i>A_{ns}</i> ACCELERAZ. MASSE NON SOSPESE | | | [g] | | |
| <i>A_{s1}</i> ACCELERAZ. MASSE DEL CARRELLO (FR. ACCOP. BASSA) | | | " | | |
| <i>A_{s1}</i> " " " | | | (FR. ACCOP. ALTA) | | |
| <i>A_{s2}</i> ACCELERAZ. MASSE DELLA CASSA | | | " | | |
| <i>V</i> VELOCITÀ IN Km/h | | | | | |

TABELLA 6
SCARTO QUADRATICO MEDIO DELLE FLUTTUAZIONI DINAMICHE DEI CARICHI (BINARIO NUOVO) (kg)

| S.q.m. [kg] | BALLAST | MISTO BITUM. | | MISTO CEMENT. | |
|---------------------------|---------|--------------|-------|---------------|-----------|
| | | 12 cm | 20 cm | 20 cm | 20 cm |
| E [daN/cm^2] | | E | E | E | E |
| 1500 | 50000 | 90000 | 20000 | 30000 | 30000 |
| CARRO MERCI | 1075 | 1155 | 1165 | 1146 | 1155 1165 |
| LOCOMOT. MERCI | 1157 | 1272 | 1305 | 1269 | 1278 1291 |
| VETTURA | 1664 | 1872 | 1903 | 1843 | 1850 1875 |
| LOCOMOT. VIAGG. | 1799 | 1936 | 2041 | 1939 | 1952 2019 |
| ELETTROMOTRICE | 2148 | 2412 | 2437 | 2302 | 2392 2415 |

ma ripropone la situazione iniziale innescando di nuovo il fenomeno.

Quanto precede viene confermato dal rapido decadimento

del livello nel tempo, secondo la ben nota legge logaritmica come risulta dalla documentazione *ORE*.

3.1.2 In una struttura con subballast legato invece, considerando il valore delle tensioni principali nel ballast, effetti dinamici inclusi (che come già detto sono in tal caso sempre positive), la applicazione del criterio di DRUCKER e PRAGER⁽¹⁾ porta a valori delle σ sempre contenuti nel campo delle deformazioni reversibili, anche se non lineari.

La situazione è poi in pratica sensibilmente migliorata in particolare per il mutuo incastro dei grani.

Ballast e subballast pertanto lavorano unitariamente e gli sforzi di trazione sono nettamente confinati nel subballast che, data la loro modesta entità, è in grado di sopportarli.

In pratica abbiamo realizzato un ballast armato.

3.2.1. Esaminato il comportamento del ballast nelle varie condizioni sopra illustrate, occorre ora considerare i fenomeni di fatica nel subballast sotto i carichi dinamici.

Per un subballast in misto bitumato da 12 cm su sottofondo e fondazione caratterizzati da valori del modulo elastico pari rispettivamente a $2.000^{(2)}$ e 500 daN/cm^2 – considerato sia il periodo caldo che quello freddo dell'anno – l'applicazione dei diagrammi di Völer proposti da Verstraeten-Camomilla porta a valori delle deformazioni compatibili con una durata teorica a fatica di poco inferiore a 100 anni.

3.2.2. Per il misto cementato da 20 cm, l'applicazione della curva di Eisenmann relativa ad un valore della resistenza a compressione a 7 gg. di 30.8 daN/cm^2 e ad un modulo di 30.000 daN/cm^2 (con lo stesso tipo di fondazione e sottofondo sopra indicati), la durata risulta superiore ai 100 anni, pur tenuto conto nella valutazione delle tensioni della presenza di fessurazioni, mediante un coefficiente di maggiorazione pari ad 1,2.

Si è parlato di resistenza a fatica teorica in quanto, a lunga scadenza, intervengono, sia per il misto bitumato che per il misto cementato, fenomeni di deterioramento, indipendenti dai carichi-applicati, che riducono in pratica la vita utile del subballast.

È di estremo interesse rilevare come, al variare della resistenza a rottura del misto cementato fra i valori estremi $K_{f7} + 3\sigma = 39.2 \text{ daN/cm}^2$ e $K_{f7} - 3\sigma = 22.4 \text{ daN/cm}^2$ ed al conseguente variazione del modulo, variano nello stesso senso nel subballast anche le sollecitazioni, mantenendo pressoché invariato il rapporto σ/E_r .

Conseguentemente pertanto il fenomeno di fatica resta invariato (v. fig. 8).

3.3. Un esempio di calcolo a fatica del subballast in misto bitumato, viene riportato nella tabella 7 che si riferisce a 2000 assi giornalieri di carri merci di tipo recente a carrelli.

Il numero di cicli di carico è stato trasformato in numero di carichi standard da 40 t (di poco superiore al massimo carico dinamico di un asse di locomotiva) equivalenti a fatica. Considerato che il subballast di questo tipo può sopportare 4.152.054 cicli di carico da 40 t, effetti dinamici inclusi, e che i 2000 assi annuali da 20 t equivalgono a 36.832 carichi standard, ne deriva che (per i soli carri merci considerati) la durata teorica del subballast può essere valutata in

$$\frac{4.152.054}{36.832} = 113 \text{ anni}$$

(1) Il termine a denominatore della formula n. 12 dell'art. al n. 19 della bibliografia va sotto radice.

(2) 2000 daN/cm^2 e non 1000 come erroneamente indicato nell'art. al n. 19 della bibliografia.

TABELLA 7
ESEMPIO DI CALCOLO A FATICA NEL MISTO BITUMATO
($E = 50.000 \text{ daN/cm}^2$). NUMERO DI ASSI STANDARD
DA 40 T EQUIVALENTI A 365.000 ASSI ANNUI DA 20 T
DI UN CARRO MERCI MODERNO, EFFETTI DINAMICI INCLUSI

| SCARTI QUAD. MEDI | PROB. CUMULATI | PROB. INTERVALLO | COEFFICIENTE DINAMICO | N. PARZIALE CAR. EQUIV. | N. ACCUM. CAR. EQUIV. |
|----------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 3.000 | 0.9987 | 0.9987 | 1.4280 | 215 | 215 |
| 2.880 | 0.9980 | 0.0010 | 1.3924 | 110 | 325 |
| 2.750 | 0.9970 | 0.0010 | 1.3781 | 149 | 471 |
| 2.650 | 0.9960 | 0.0010 | 1.3667 | 143 | 617 |
| 2.575 | 0.9950 | 0.0050 | 1.3320 | 615 | 754 |
| 2.326 | 0.9900 | 0.0100 | 1.2934 | 1085 | 2454 |
| 2.054 | 0.9800 | 0.0200 | 1.2497 | 1874 | 4328 |
| 1.751 | 0.9600 | 0.0200 | 1.0219 | 1701 | 6029 |
| 1.555 | 0.9400 | 0.0200 | 1.1998 | 1574 | 7603 |
| 1.405 | 0.9200 | 0.0200 | 1.1826 | 1481 | 9084 |
| 1.282 | 0.9000 | 0.0500 | 1.1484 | 3264 | 12348 |
| 1.037 | 0.8500 | 0.0500 | 1.1199 | 2931 | 15279 |
| 0.842 | 0.8000 | 0.0100 | 1.0748 | 4918 | 20197 |
| 0.524 | 0.7000 | 0.0100 | 1.0361 | 4205 | 24102 |
| 0.253 | 0.6000 | 0.0100 | 1.0000 | 3614 | 28016 |
| 0.000 | 0.5000 | 0.0100 | 0.9639 | 3088 | 31104 |
| 0.253 | 0.4000 | 0.0100 | 0.9252 | 2593 | 33697 |
| 0.524 | 0.3000 | 0.0100 | 0.8801 | 1047 | 34744 |
| 0.842 | 0.2000 | 0.0500 | 0.8516 | 910 | 35654 |
| 1.037 | 0.1500 | 0.0500 | 0.8174 | 305 | 35959 |
| 1.282 | 0.1000 | 0.0200 | 0.8002 | 279 | 36238 |
| 1.405 | 0.0800 | 0.0200 | 0.7781 | 247 | 36485 |
| 1.555 | 0.0600 | 0.0200 | 0.7503 | 212 | 36697 |
| 1.751 | 0.0400 | 0.0200 | 0.7066 | 82 | 36779 |
| 2.054 | 0.0200 | 0.0100 | 0.6680 | 39 | 36811 |
| 2.326 | 0.0100 | 0.0050 | 0.6333 | 5 | 36816 |
| 2.575 | 0.0050 | 0.0000 | 0.6219 | 5 | 36821 |
| 2.650 | 0.0040 | 0.0010 | 0.6076 | 4 | 36825 |
| 2.750 | 0.0030 | 0.0010 | 0.5891 | 3 | 36828 |
| 2.880 | 0.0020 | 0.0007 | 0.5720 | 4 | 36832 |
| 3.000 | 0.0013 | N° CARICHI EQUIVALENTI DA 40 t | | 36832 | |

3.4. Per valutare i fenomeni di fatica del sottofondo si confrontano i diagrammi di fig. 3 con quelli delle figure da 4 a 6. Nel caso della struttura di tipo tradizionale (fig. 3) si rilevano notevoli scarti fra i valori delle tensioni principali (fino a $\sigma_x = 5 \sigma_z$). Detti scarti invece sono assai contenuti nel caso di una struttura con subballast ($\sigma_z = 2 \sigma_x$), con conseguente notevole riduzione degli sforzi taglienti.

Anche per il sottofondo l'applicazione del criterio di DRUCKER e PRAGER porta a valori del campo plastico, nel caso della struttura di tipo tradizionale, e nel campo delle deformazioni reversibili, nel caso della struttura con subballast.

4. Conclusioni

Da quanto precede possiamo affermare che le esigenze di un traffico intenso e ad alta velocità non possono essere soddisfatte da una struttura di tipo tradizionale, perché soggetta a rapida perdita del livello longitudinale e trasversale.

La adozione di un subballast, dotato di una sua pure debole resistenza trazione e con gli spessori sopra indicati, soddisfa invece appieno tale esigenza, per una linea interessata da un traffico prevalentemente viaggiatori del tipo da noi ipotizzato e da un limitato numero di treni merci composti da veicoli a carrello di tipo moderno.

Queste conclusioni sono confermate da 16 anni di esperienza acquisita su due tratti (già soggetti a rallentamenti permanenti ed a frequentissimi interventi per il risanamento della massicciata) delle linee DD Roma-Napoli e Venezia-Trieste nei quali il misto cementato sotto binario si presenta perfettamente conservato.

Ad ulteriore conferma si aggiunge che per quanto concerne in particolare la DD Roma-Firenze un diagramma Hamsler rilevato nove mesi dopo una operazione di levellamento risulta di alta qualità e pressoché identico a quello rilevato subito dopo il levellamento stesso.

È comunque da tener presente che, per diverse condizioni di traffico e diverse caratteristiche della struttura, occorrerà procedere ad una apposita valutazione che tenga conto delle suddette diverse condizioni.

È infine da considerare che il subballast, con la sua rigidezza, costituisce l'elemento determinante della cedevolezza della struttura; pertanto variazioni, anche sensibili, delle caratteristiche della fondazione e del sottofondo sono poco influenti ai fini della rigidezza del complesso e quindi ai fini della valutazione della ripartizione dei carichi statici e degli effetti dinamici e ciò a notevole differenza di quanto avviene per una struttura tradizionale senza subballast.

APPENDICE

Per quanto concerne la resistenza a compressione del misto cementato si dispone dei seguenti dati relativi alla seconda fase dei lavori della DD Roma-Firenze:

- resistenza a compressione a 7 giorni: $31,08 \text{ daN/cm}^2$
- resistenza a compressione a 28 giorni: $45,00 \text{ daN/cm}^2$
- scarso quadratico medio a 7 giorni: $2,81 \text{ daN/cm}^2$
- resistenza a trazione diretta (prova Brasiliana) sempre > $0,10 K_r$

Poiché in campo stradale si ammette una resistenza a 120 giorni superiore al doppio di quella a 7 giorni, si può prudenzialmente assumere un valore $K_{r120} = 2 \times 31,08 = 62,16 \text{ daN/cm}^2$. La resistenza media a trazione per flessione può essere perciò assunta pari a

$$\frac{62,16}{10 \times 0,6} = 10,36 \text{ daN/cm}^2$$

(A. GUERRIN: *Traité de béton armé*).

Con riferimento a tali valori sono stati valutati quelli del modulo elastico facendo riferimento a rilevamenti recenti compiuti in campo stradale mediante prove dinamiche in situ su basi in misto cementato.

In queste prove sono stati determinati valori del modulo variabili fra 51.000 e 60.000 daN/cm^2 per basi in misto cementato di $4 \div 11$ anni di vita la cui resistenza a compressione a 7 gg era risultata a suo tempo variabile fra 40 e 60 daN/cm^2 . In relazione a questi valori si è ritenuto di poter assumere per il modulo la relazione

$$E = 1000 K_{r7} \text{ daN/cm}^2$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. BURMISTER: "The general theory of stress and displacement in layered system", Journal of applied Physics - Febr. Mar. May 1945
- [2] G. AUSSÉDAT, Ch. AZIBERT e M.F. MONNIOT: "Méthode pratique pour le dimensionnement des chaussées à la fatigue", Revue générale des Routes et des Aérodromes, n. 495, Feb. 1974
- [3] F. BERARDI: "Calcolo delle travate su suolo elastico con appoggio discontinuo mediante elaboratore" (in corso di pubblicazione)
- [4] G. CAMOMILLA e M. FERRARI: "Le pavimentazioni semirigide nel-

- l'esperienza della Società Autostrade*", L'Industria Italiana del Cemento, Novembre 1976
- [5] G. CHOMTOM, J.M. FENNEVEYRE e J. BARDET: "Conception moderne des enrobés bitumineux routiers", Revue générale des Routes et des Aérodromes, n. 495, Feb. 1974
- [6] A. DE HENAU e J. VERSTRAETEN: "Resistance en fatigue par flexion répétée de bétons maigres de fondation de chaussées", XIV^e Congrès Mondial Association International Permanente des Congrès de la Route, Praga 1971
- [7] L. DOMENICHINI e A. MARCHIONNA: "Influenza del rapporto di sollecitazione sul dimensionamento a fatica delle pavimentazioni in calcestruzzo", Autostrade
- [8] EISENMANN: "Bemessung Von Zemenbetondecken" Forschungsarbeiten aus den Strassenwesen, n. 82, Kirschbaum Verlag, July 1970
- [9] R. FRULLINI, C. CASINI e G. TACCI: "Nuove tecniche per il controllo dinamico e selettivo dell'evoluzione della geometria dell'infrastruttura ferroviaria e per la valutazione degli standard di qualità di marcia del veicolo" XXX Convegno Intern. delle Comunicazioni - Genova 1982
- [10] G. GIANNINI e G. CAMOMILLA: "Procedure for structural design of pavement used on italian motorways", 4th International Conference on the structural design of asphalt pavements
- [11] F. GIANNINI, G. CAMOMILLA e F.M. FRASCHETTI: "Aspetti critici dell'applicazione di un metodo razionale di calcolo delle sovrastrutture", Autostrade, Marzo 1974
- [12] J.C. JAEGER e N.G.W. COOK: "Fundamentals of rock Mechanics", Methuen & Co Ltd
- [13] López PITA: "El disegno integral del sistema balasto-plataforma", AIT, n. 23, agosto 1978.
- [14] PH.D. MYKLESTAD: "Foundamentals of vibration analysis", McGraw-Hill Book Company, Inc. 1956
- [15] D. ORLANDI: "La stabilizzazione della piattaforma stradale esigenza di una ferrovia moderna: esperienze e prospettive delle ferrovie italiane", Ingegneria Ferroviaria, n. 12, Dicembre 1970
- [16] D. ORLANDI: "Der Planumskörper der Schnellstverkehrsstrecke Roma-Firenze", Schnellfahrt und Oberbau, 1973
- [17] D. ORLANDI: "Mejora del comportamiento dinámico de la plataforma, mediante la introducción de elementos aglomerantes", Simposio sobre Dinámica Ferroviaria, Ait, Madrid Mayo 1977
- [18] D. ORLANDI: "Objetivo Mantenimiento Cero", Simposio sobre Tecnicas avanzadas en proyecto, construcción y conservación de vía, Ait, Novembre 1981
- [19] D. ORLANDI: "I fenomeni di fatica nella struttura sotto binario", Ingegneria Ferroviaria, n. 6, giugno 1984
- [20] M.A. PRUD'HOMME: "La voie", Rgcg gen 1970
- [21] G. ROBERT: "Calculo del binario", Ing. Ferr. Feb. Mar. Apr. 1950
- [22] M.F. SCLOSSER: "Comportement des milieux granulaire", C.R.A.c.Sc. Paris 30/9/1968
- [23] S. TIMOSCHENKO e B.F. LANGER: "Stress in railroad track", Trans of Am. Soc. of Mech., eng. 1935
- [24] ZIMMERMANN: "Die Berechnung des Eisenbahn-Oberbaues", Berlin 1888

Sommaire**Summary****Zusammenfassung****POURQUOI UN SUBBALLAST**

Résultats du calcul à fatigue d'une série de structures du type traditionnel avec différentes épaisseurs de ballast, desquels on déduit un comportement à la fatigue non satisfaisant du ballast qui détermine une déchéance rapide du niveau de la voie. Le comportement résulte tout à fait différent étant donné qu'en ce cas le ballast travaille exclusivement à compression et avec l'exclusion de phénomènes de fatigue.

L'application de la loi de Miner porte à évaluer la vie théorique du subballast à un siècle environ.

Un autre avantage remarquable que le subballast offre est sa capacité d'atteindre une homogénéisation considérable de la plateforme.

La méthodologie adoptée peut être aisément appliquée à de différents compositions du trafic et à de différentes caractéristiques de la structure.

WHY A SUB-BALLAST

Results of the fatigue calculation of a series of traditional-type structures with different ballast thicknesses from which is deduced an unsatisfactory behaviour of the ballast to fatigue, which brings about a rapid lowering of the track level. Behaviour is quite different in that in this case the ballast works exclusively in compression with the exclusion of fatigue phenomena.

The application of the law of Miner leads to evaluate the theoretical life of the sub-ballast at about a century.

Another considerable advantage offered by sub-ballast is its capacity to achieve a considerable homogenization of the formation.

The methodology adopted can be easily applied to different traffic compositions and to different structure characteristics.

WARUM EIN SUBBALLAST

Ergebnisse der Ermüdberechnung einer Reihe von Strukturen traditioneller Art mit verschiedenen Ballaststärken aus denen sich ein unbefriedigendes Ermüdbungsverhalten des Ballastes ergibt, was einen raschen Zerfall der Gleishöhe verursacht. Es ergibt ein ganz anderes Verhalten, weil der Ballast in diesem Fall nur unter Kompression arbeitet und die Ermüdbungsphänomene ausgeschlossen sind.

Die Anwendung des "Gesetzes von Miner" erlaubt es das theoretische Leben des Subballastes ungefähr auf ein Jahrhundert festzusetzen.

Ein weiterer erheblicher Vorteil des Subballastes ist der, dass eine beträchtliche Gleichförmigkeit der Fahrbahn erzielt wird.

Die angewandte Methodologie kann leicht für verschiedene Verkehrsarten und unterschiedliche Strukturcharakteristiken verwendet werden.