

Modellazione del comportamento visco-elastico degli strati della sede ferroviaria

Visco-elastic modeling for railway track structure layers

Dott. Ing. Paola Di MASCIO ^(*)
Dott. Ing. Giuseppe LOPRENCE ^(*)
Dott. Ing. Federico MAGGIONI ^(**)

Sommario - Questo articolo propone una metodologia di calcolo per la valutazione dello stato tenso-deformativo negli strati della sede ferroviaria. Tale stato tenso-deformativo viene calcolato mediante la modellazione dei singoli elementi che compongono la struttura, considerando i carichi e il numero di ripetizioni di traffico, le caratteristiche dei materiali e le condizioni ambientali ed infine assumendo per gli strati della sede ferroviaria un comportamento visco-elastico.

Il metodo proposto è stato validato mediante i dati rilevati durante una campagna sperimentale eseguita da R.F.I. Il metodo è stato successivamente applicato per valutare teoricamente la durabilità di una sede ferroviaria, per date caratteristiche meccaniche degli strati che la compongono e valori della temperatura atmosferica di esercizio.

1. Introduzione

La manutenzione della "sede ferroviaria", composta dalla sovrastruttura e dal corpo stradale, incide, con i suoi costi diretti e indiretti, sulle economie di gestione dell'intero sistema di trasporto. La sede ferroviaria è progettata in funzione delle azioni esterne (carichi di traffico e condizioni ambientali) previste durante la vita utile, in modo che le tensioni da esse generate siano compatibili con le resistenze proprie dei materiali componenti i singoli elementi della struttura e considerando l'impatto sull'ambiente dovuto al rumore e alle vibrazioni [1], [2]. Durante la fase progettuale occorre pertanto considerare le seguenti condizioni fondamentali:

- le caratteristiche e le dimensioni dei vari elementi della sede ferroviaria devono essere tali da soddisfare le prestazioni funzionali nell'arco dell'intera vita utile, con particolare riferimento alla deformabilità globale del binario [3];

Summary – This article proposes a method of calculation for evaluating stresses and strains in the track structure. This condition is calculated by modelling the single elements composing the structure, considering the loads and the number of traffic repetitions, the characteristics of the materials, and the environmental conditions.

The method can be used both in the design phase to optimize the choice of the materials to be used and in the operation phase to verify the real service life of the structure in the presence of substantial variations in the data presumed in the design phase.

The method has been validated with the experimental data collected by R.F.I. The method has been applied to evaluate the service life of a track, considering the layer mechanical characteristics and the air temperatures.

1. Introduction

The maintenance of the railway track structure, consisting of the permanent way and the track formation, has an impact, with its direct and indirect costs, on the economy of running the entire transport system. The track structure is designed based on external factors (traffic loads and environmental conditions) foreseen during the useful life, so that generated stresses are acceptable considering the actual strengths of the materials composing the single elements of the structure and considering the environmental impact due to noise and vibrations [1], [2]. During the design phase, therefore, the following fundamental conditions must be considered:

- the characteristics and the dimensions of the various elements of the track must be adequate to satisfy the functional performance throughout the entire service life, with particular reference to the overall deformability of the track [3];
- the static design loads due to traffic should be suitably

^(*) Università di Roma "La Sapienza".
^(**) Technital S.p.A.

^(*) University of Rome "La Sapienza".
^(**) Technital S.p.A.

- i carichi statici di progetto, dovuti al traffico, devono essere opportunamente incrementati per tenere conto degli effetti dinamici dovuti a: imperfezioni geometriche presenti al contatto ruota rotaia, moto in curva, fase di accelerazione-decelerazione;
- l'influenza delle condizioni ambientali e della ripetizione del carico deve essere valutata tenendo conto delle caratteristiche meccaniche dei materiali granulari e termo-suscettibili (come ad esempio il conglomerato bituminoso), impiegati per gli strati sottostanti la sede ferroviaria (subballast, supercompattato);
- gli interventi di manutenzione sulla sede ferroviaria necessari a mantenerne la funzionalità e la loro cadenza temporale devono essere inclusi nel computo dei costi globali della struttura [4], [5].

Nel dimensionamento della sede ferroviaria, tradizionalmente vengono considerati separatamente gli elementi prefabbricati dell'armamento (rotaie, attacchi, traverse) rispetto agli strati presenti al di sotto delle traverse (ballast, subballast e strati granulari) utilizzando, di conseguenza, metodologie di calcolo differenti per le due semistrutture così definite [6].

La seconda semistruttura, essendo costituita come le pavimentazioni stradali da strati sovrapposti, ha la funzione principale di ripartire i carichi di traffico in modo tale da ridurre le sollecitazioni compatibilmente con le resistenze specifiche dei materiali impiegati. Nella fase di dimensionamento tali resistenze si fanno pertanto dipendere, adottando leggi di fatica diverse per i materiali legati e per quelli non legati, dal numero di ripetizioni e dalla tipologia dei carichi.

Il presente studio propone un metodo di calcolo che affronta separatamente la modellazione dell'armamento e degli altri strati legati e non legati ad esso sottostanti, adottando per questi ultimi modelli di comportamento visco-elastici con l'obiettivo di valutarne la durabilità con riferimento alle condizioni di traffico e climatiche applicate: in particolare per gli elementi dell'armamento si propone un metodo di analisi basato sulla teoria degli elementi finiti (E.F.), mentre per gli strati sovrapposti si propone una schematizzazione basata sulla teoria del multistrato elastico (M.S.E.).

Il processo di analisi prevede le seguenti fasi:

- analisi dei carichi da traffico ferroviario e della distribuzione stagionale nell'arco della vita utile;
- modellazione E.F. delle rotaie, degli attacchi e delle traverse poggianti su un supporto elastico;
- modellazione M.S.E. degli altri elementi della sede (ballast, subballast, supercompattato e sottofondo);
- determinazione delle ripetizioni di carico ammissibili sul sistema mediante verifica a fatica al variare delle condizioni al contorno;
- stima della durabilità dell'intero sistema.

increased to take into account the dynamic effects caused by: geometric imperfections in the wheel-rail contact, motion on curves, acceleration and deceleration phases;

- *the influence of environmental conditions and of the repetition of the load must be evaluated taking into account the mechanical properties of granular and thermo-susceptible materials (e.g. asphalt concrete) used for the underlying layers of the structure (sub-ballast, frost protective layer);*
- *the track maintenance operations and their frequencies should be included in the cost estimate for the overall cost of the structure [4], [5].*

In the design of the track structure, the elements of the track equipment (rails, fastenings, sleepers) are normally considered separately, in relation to the layers underlying the sleepers (ballast, sub-ballast and granular layers), therefore using different calculation methods for the two half-structures thus defined [6].

The main function of the lower half-structure, which like road paving consists of superimposed layers, is to distribute the traffic loads in such a way as to reduce the stresses to sustainable levels for the materials used. In the design phase, using different fatigue laws for bound and unbound materials, these strengths are considered dependent on the number of repetitions and the types of loads.

This study proposes a design method which deals separately with the modelling of the track equipment and the other bounded and unbounded underlying layers, with the aim of evaluation the durability with reference to the traffic and climatic conditions applied: in particular, for the elements of the track equipment the proposed method is based on the finite elements theory (F.E.), whereas for the superimposed layers the method is based on the elastic multi-layer theory (E.M.L.).

The analysis process envisages the following steps:

- *analysis of the railway traffic loads and their seasonal distribution over the entire design life;*
- *F.E. modelling of the track equipment (rails, fastenings, sleepers) on elastic support;*
- *E.M.L. modelling of the elements under the track equipment (ballast, sub-ballast, frost protective layer, and subsoil);*
- *determination of number of load repetitions to failure of the system by means of fatigue verification, changing the environmental conditions;*
- *estimate of the durability of the whole system.*

2. Traffic analysis and design load

In general, in the design phase, it is necessary to identify the load distribution in relation to all trains using the infrastructure. In this article, needing to validate with test results the stress-deformation condition of a real right of way

2. Analisi dei carichi e carico di progetto

In genere, nella fase di dimensionamento occorre individuare la distribuzione dei carichi relativamente a tutti i treni che interessano l'infrastruttura. In questo articolo, dovendo validare con risultanze sperimentali lo stato tenso-deformativo di una sede ferroviaria reale desunto dalla procedura proposta, è stato scelto un treno di progetto avente le stesse caratteristiche dei treni rilevati durante la fase sperimentali. In particolare si tratta del treno ETR 500 Y, avente la distribuzione di carico riportata nella fig. 1.

L'incremento di sollecitazione dovuto all'interazione dinamica tra binario e materiale rotabile, è stato valutato mediante l'applicazione del *Coefficiente di Amplificazione Dinamica* (DAF).

In particolare esistono in letteratura diverse formulazioni che permettono di determinare il coefficiente DAF in funzione della velocità del treno e delle caratteristiche del binario.

La relazione adottata in questo studio è quella di EISENMANN [7]:

DAF=1+t·φ·(V-60)/140

Probabilità (%)	t	Campo di applicazione	Condizioni del binario	φ
68.3	1	Tensione di contatto, sottofondo	Molto buone	0.1
95.4	2	Carico laterale, piattaforma	Buone	0.2
99.7	3	Tensioni rotaia, attacchi, supporti	Pessime	0.3

- dove:
- t: fattore moltiplicativo della deviazione standard dipendente dall'intervallo di confidenza che in termini di probabilità esprime l'area della gaussiana. Ad esempio, per t=3 la possibilità di superare il massimo valore di tensione calcolato è pari solo a (100-99.7)/2=0.15%;
- φ: fattore dipendente dalla qualità del binario;
- V: velocità del treno [km/h].

3. Modellazione dell'armamento ferroviario

Al fine di valutare la capacità di trasferimento del carico dell'armamento ferroviario si possono adottare diverse schematizzazioni e soluzioni che prevedono in genere un elemento strutturale longitudinale continuo (rotaia) vincolato su appoggi discreti (traverse) caratterizzati da una cedevolezza "elastica" il cui valore caratteristico dipende dalla deformabilità globale degli strati sottostanti.

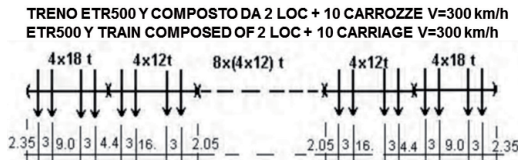


Fig. 1 - Distribuzione di carico del treno ETR 500 Y.
Fig. 1 - Load distribution of the train ETR 500 Y.

obtained by the proposed procedure, a design train was chosen with the same characteristics as the trains surveyed during the experimental phase. In particular, the chosen train was the ETR 500 Y passenger train, with the load distribution shown in fig. 1.

The increase of stress due to the dynamic interaction between the track and the rolling stock was evaluated by applying the Dynamic Amplification Factor (DAF).

It is a fact that in literature there are various formulations which allow the determination of the DAF in function of the speed of the train and the characteristics of the track.

The equation used in this study is the EISENMANN one [7] which can be expressed by the formula:

DAF=1+t·φ·(V-60)/140

Probability (%)	t	Application	Track condition	φ
68.3	1	Contact stress, subgrade	Very good	0.1
95.4	2	Lateral load, ballast bed	Good	0.2
99.7	3	Rail stresses, fastenings, supports	Bad	0.3

- where:
- t: multiplication factor of standard deviation which depends on the confidence interval that in terms of probability is the area of gaussian curve. For example, for t=3 the chance of exceeding the maximum calculated stress is only (100-99.7)/2=0.15%.
- φ: factor depending on track quality;
- V: train speed [km/h].

3. Modelling of the railway track equipment

In order to evaluate the load transfer capacity of the railway track equipment, various systems and solutions can be used which usually envisage a continuous longitudinal structural element (rail), fastened to adequate supports (sleepers) which are characterised by an "elastic" yielding quality, the typical value of which depends on the overall deformability of the underlying layers.

The capacity of the track to distribute the load may be

La capacità del binario di ripartizione del carico può essere valutata in maniera semplificata attraverso il coefficiente r_i definito, per la generica traversa i , dalla

$$r_i = \frac{Q_i}{Q_0}$$

che esprime il rapporto tra il carico Q_i trasmesso dall' i -esima traversa ed il carico applicato alla rotaia Q_0 . Nel caso di trave priva di rigidità flessionale e carico Q_0 posto in corrispondenza della traversa i -esima si ha $r_i=1$ e $r=0$ per tutte le altre traverse.

Ad esempio, la normativa sui ponti ferroviari [8] prevede una distribuzione dei carichi su tre traverse considerando il carico applicato sulla traversa i -esima distribuito secondo i seguenti coefficienti r :

- $r_{i-1}=0.25$;
- $r_i=0.50$;
- $r_{i+1}=0.25$.

3.1. Schematizzazione degli elementi dell'armamento ferroviario e delle traverse

È possibile valutare la capacità di trasferimento del carico del binario mediante un modello tridimensionale agli EF, che consenta di valutare non solo la ripartizione longitudinale del carico ma anche la distribuzione delle pressioni trasmesse dalle traverse alla massicciata.

Per fare ciò sono stati implementati due diversi modelli agli EF: il primo, longitudinale, per la valutazione della ripartizione del carico e il secondo, trasversale, per la valutazione della distribuzione delle pressioni.

3.1.1. Modello EF rotaia su traverse

Sono state previste le seguenti schematizzazioni (fig. 2):

- rotaia: elemento *beam*;
- piastra sottorotaia: un elemento *N-link* posto sotto la rotaia in corrispondenza di ciascuna traversa;

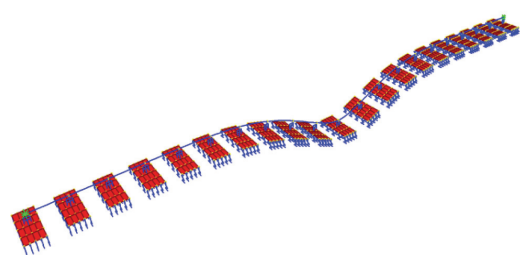


Fig. 2 - Modello agli elementi finiti della rotaia sulle traverse.
Fig. 2 - Finite elements model of the rail on the sleepers.

calculated in a simplified manner using the coefficient r_i defined, for the generic sleeper i , by

$$r_i = \frac{Q_i}{Q_0}$$

which expresses the ratio between the load applied to the rail Q_0 and the load transmitted by the i -th sleeper. In the case of a beam without flexural rigidity and load Q_0 placed at a i -th sleeper, $r_i=1$ and $r=0$ for all the other sleepers.

For example, the standards regarding Italian railway bridges [8] states a load applied over a sleeper and a distribution among three sleepers according to the following values of r coefficients:

- $r_{i-1}=0.25$;
- $r_i=0.50$;
- $r_{i+1}=0.25$.

3.1. Schematic representation of the elements of the railway track equipment

It is possible to evaluate the load transfer capacity of the track by means of a three-dimensional finite elements model which permits the evaluation not only of longitudinal load distribution but also of the distribution of the pressures transmitted by the sleepers to the ballast.

To do this, two different FE models were implemented: the first, longitudinal, for the evaluation of the load distribution and the second, transversal, for the evaluation of the distribution of the pressures.

3.1.1. E.F. Model of rail on sleepers

The following schematizations were foreseen (fig. 2):

- rail: beam element;
- rail-bearing plate: an N-link element placed under the rail at each sleeper;
- sleeper: group of shell elements placed under each N-link;
- granular layers: finished structure of spring elements placed at the nodes of the shell elements.

For the beam element, the elastic and inertial characteristics adopted were those of the UIC 60 type rail. The N-link element features the coefficient of elasticity r_p of the rail-bearing plate equal to 20×10^4 N/mm. The sleeper, which has a total length of 260 cm, rests on the ballast (characterized by the Winkler's modulus of subgrade reaction) for an effective area equal to the width of the sleeper by an effective length of 80 cm for each rail [9].

The modulus of Winkler [N/mm²] was calculated by means of the following equation

$$k = \frac{k_v \cdot a}{A_t}$$

where

- traversa: insieme di elementi *shell* posti sotto ogni *N-link*;
- strati granulari: insieme finito di elementi *spring* posti ai nodi degli elementi *shell*.

Per l'elemento *beam* sono state adottate le caratteristiche elastiche ed inerziali proprie della rotaia tipo UIC 60. L'elemento *N-link* è caratterizzato dal coefficiente di elasticità r_p della piastra sottorotaia pari a 20×10^4 N/mm. La traversa, lunga complessivamente 260 cm, appoggia sulla massicciata (caratterizzata dal modulo di reazione del sottofondo di Winkler), per una superficie effettiva pari alla larghezza della traversa e per una lunghezza efficace u di 80 cm per ciascuna rotaia [9].

Il modulo di Winkler [N/mm²] adottato è stato calcolato mediante la seguente relazione:

$$k = \frac{k_v \cdot a}{A_t}$$

dove

- $A_t = b \cdot u$ superficie di appoggio effettiva della semitraversa [mm²];
- b larghezza delle traverse;
- u lunghezza efficace della semitraversa;
- a interasse tra le traverse [mm];
- k_v modulo di reazione del sottofondo definito dalla seguente espressione [9].

$$\frac{1}{k_v} = \left(\frac{1}{p_p} + \frac{1}{k_{vm} \cdot b \cdot u} \right) \frac{a^2}{b \cdot u}$$

con

- r_p coefficiente di elasticità della piastra sottorotaia [N/mm];
- k_{vm} modulo di reazione composito degli strati ballast, subballast e fondazione [N/mm³].

I valori di r_p sono forniti dai costruttori mentre il coefficiente k_{vm} può essere calcolato mediante la teoria di BURMISTER [10], schematizzando la sovrastruttura ferroviaria in tre strati - ballast, subballast e sottofondo - ciascuno caratterizzato dal modulo elastico dinamico E_{din} , misurabile con prove di carico su piastra.

Nella costruzione del modello viene considerata la simmetria geometrica e di carico del sistema, rispetto all'asse longitudinale del corpo stradale.

3.1.2. Modello EF della traversa su ballast

Per la valutazione del carico trasmesso dalle traverse al ballast è stato sviluppato un secondo modello agli elementi finiti (fig. 3). La traversa è stata schematizzata con elementi *shell*, aventi le stesse caratteristiche inerziali definite nel primo modello EF; la piastra sottorotaia è schematizzata con 9 elementi *N-Link* disposti in parallelo, di

- $A_t = b \cdot u$ effective contact area of the half sleeper [mm²];
- b width of the sleeper
- u effective length of the half sleeper
- a spacing between the sleepers [mm];
- k_v modulus of the subgrade reaction defined by the following expression [9]

$$\frac{1}{k_v} = \left(\frac{1}{p_p} + \frac{1}{k_{vm} \cdot b \cdot u} \right) \frac{a^2}{b \cdot u}$$

with

- r_p coefficient of elasticity of the rail-bearing plate [N/mm];
- k_{vm} composed modulus of ballast, sub-ballast and subbase reaction [N/mm³].

The values of r_p are supplied by rail bearing-plate producers, while the coefficient k_{vm} can be calculated by means of BURMISTER'S theory [10] schematizing the permanent way in three layers - ballast, sub-ballast and subgrade - each characterized by the dynamic elastic modulus E_{din} , measurable with plate load tests.

In the setting up of the model, the geometric and system loading symmetry is considered, in relation to the longitudinal axis of the track formation.

3.1.2. F.E. model of sleepers on ballast

For the evaluation of the load transmitted from the sleepers to the ballast, a second finite elements model was developed (fig. 3). The sleeper was schematized with shell elements having the same characteristics of inertia as defined in the first FE model. The rail-bearing plate is schematized with 9 N-Link elements arranged parallel to one another, with the same characteristics as those used earlier, to simulate the complete contact between the plate itself and the sleeper. The rail is reproduced with a frame element which has the characteristics of inertia of UIC 60 steel rails, fixed longitudinally so as to respect the congru-

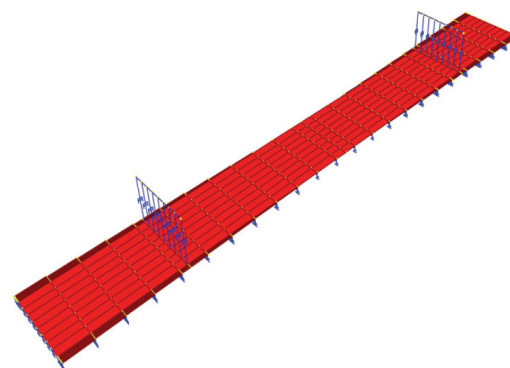


Fig. 3 - Modello agli elementi finiti della traversa sul ballast.
Fig. 3 - Finite elements model of the sleeper on the ballast.

caratteristiche uguali a quelle utilizzate in precedenza, per simulare il completo contatto tra la piastra stessa e la traversa. La rotaia è riprodotta con un elemento *frame* con le caratteristiche inerziali del profilato in acciaio UIC 60, vincolato longitudinalmente in modo da rispettare le condizioni di congruenza del problema. Gli strati granulari sono caratterizzati da elementi *spring* con coefficiente di elasticità pari al coefficiente di reazione del sottofondo precedentemente calcolato con la teoria di BURMISTER. Il coefficiente k è moltiplicato per l'area di influenza di ciascun elemento *spring*.

Il carico Q' applicato al modello è quello dell'asse moltiplicato per il coefficiente di ripartizione r e per il coefficiente di amplificazione dinamica DAF:

$$Q' = q_0 \cdot r \cdot \text{DAF}$$

Tale formulazione è in accordo a quanto previsto da ESVELD [11] che prevede l'utilizzo del DAF anche per il calcolo delle tensioni verticali negli strati di ballast e sotto ballast.

Nella fig. 4 è riportato un esempio di calcolo della distribuzione delle pressioni sotto la traversa, indotte dal transito dell'asse del treno sulla traversa direttamente caricata.

4. Modellazione degli strati della sede ferroviaria (ballast, subballast e supercompattato)

Per la determinazione dello stato tenso-deformativo negli strati della sede ferroviaria è stata applicata la teoria del multistrato elastico (MSE) di Burmister, considerando la distribuzione delle pressioni all'interfaccia tra traversa e ballast calcolata con il modello agli elementi finiti di cui al paragrafo precedente. Il calcolo delle tensioni e deformazioni indotte, è stato effettuato, secondo la teoria del multistrato elastico, mediante il programma KENLAYER [12] il quale, come tutti i programmi analoghi, considera il carico applicato su impronta circolare ed una pressione costante. Questa approssimazione, che ben si adatta al caso stradale (nel cui ambito il programma trova largo impiego) per la schematizzazione della superficie di contatto tra pneumatico e pavimentazione, nel caso ferroviario richiede invece una ridefinizione della distribuzione continua delle pressioni sottotraversa in un insieme discreto di impronte circolari che approssimino l'andamento delle pressioni stesse e che, sommandosi secondo il principio di sovrapposizione degli effetti, abbia un valore complessivo pari al carico dell'asse.

ence conditions of the problem. The granular layers are characterised by spring elements with an elasticity coefficient equal to the coefficient of subgrade reaction calculated previously with BURMISTER'S theory. The coefficient k is multiplied by the area of influence of each spring element.

The load applied to the model is that of the axis multiplied by the distribution factor r and by the dynamic amplification factor DAF:

$$Q' = q_0 \cdot r \cdot \text{DAF}$$

This formulation agrees with ESVELD [11] that uses the DAF also for the calculate the maximum vertical stress on the formation layers.

Fig. 4 shows an example of the distribution of pressures under the sleeper induced by the transit of the train axis on the directly loaded sleeper.

4. Modelling the elastic multi-layer (ballast, subballast and frost protective layer)

To determine the stresses and strains in the layers of the track structure, Burmister's elastic multi-layer theory (EML) was used, considering the distribution of the pressures at the interface between sleeper and ballast calculated with the finite elements model discussed in the previous paragraph. The calculation of stresses and strains was performed in accordance with the elastic multi-layer theory by means of KENLAYER [12] programme which, like all similar programmes, considers the load applied on a circular contact area assuming a constant pressure. This approximation is well suited to the case of roads (context in which the programme is widely used) to schematize the contact area between tyre and paving. In the case of railways, however, it is necessary to re-define the continuous distribution of the pressures under the sleeper in a fair number of circular prints which approximate the trend of the pressures and which, in accordance with the superimposition principle, has an overall value equal to the axle load.

For this method, the load system composed of the circular area set representing the contact pressure between sleeper and ballast is not easy to treat and requires long run time. For this reason, an equivalent axle load has been introduced. This axle produce the same vertical deformation of the real load at the same depth.

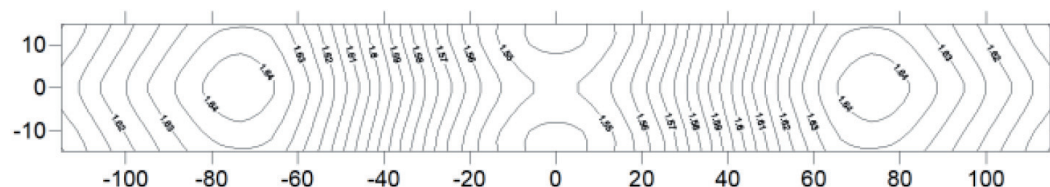


Fig. 4 - Distribuzione delle pressioni sotto la traversa direttamente caricata in daN/cm².
Fig. 4 - Distribution of the pressures under the directly loaded sleeper in daN/cm².

Ai fini di questa procedura di calcolo, il sistema di carico, costituito dall'insieme di impronte di forma circolare maggiormente aderenti alla distribuzione delle pressioni di contatto tra massicciata e traversa, è difficilmente gestibile e comporta tempi computazionali eccessivi. A tale scopo si è deciso di ridurre il carico iniziale equivalente a quello applicato ad un solo asse che produca le stesse deformazioni verticali alle profondità considerate. È stato pertanto individuato il raggio della coppia di impronte di carico per le quali le deformazioni verticali dei due sistemi di carico (fig. 5) si eguagliano.

4.1. Calcolo delle tensioni negli strati

Per la risoluzione di un problema elastico in simmetria assiale, come quello in esame, è conveniente determinare una *stress function* che soddisfi le equazioni differenziali e le condizioni al contorno che regolano il sistema, con la quale determinare le sollecitazioni e i cedimenti nella struttura.

La funzione di sforzo per ogni strato è caratterizzata da quattro costanti di integrazione proprie dello strato; per l'ultimo strato le costanti sono solo due a causa dell'ipotesi di spessore infinito. Quindi, per un sistema con n strati, il numero totale di costanti da determinare è $4n-2$, per la cui determinazione si hanno a disposizione due condizioni al contorno (tensione verticale in corrispondenza dell'impronta di carico è pari alla pressione esterna applicata e lo sforzo di taglio è nullo) e quattro condizioni di continuità per ogni strato (di tensione verticale, sforzo di taglio, deformazione verticale e deformazione radiale).

Nel caso di più impronte di carico, vale il principio di sovrapposizione degli effetti: in un punto, le tensioni e le deformazioni verticali dovute ai carichi possono essere sommate direttamente, mentre le tensioni radiali e tangenziali e gli sforzi di taglio devono essere scomposti lungo le direzioni di riferimento.

Quindi, dopo aver definito, attraverso la scomposizione, le tensioni $s_x, s_y, s_z, t_{xy}, t_{xz}, t_{yz}$, si determinano le tre tensioni principali che caratterizzano lo sforzo in un punto. Da queste si risale alle tre deformazioni principali, caratteristiche di ciascuno strato e dipendenti dal modulo elastico e dal coefficiente di Poisson caratteristico di ciascuno strato, che vengono utilizzate nell'analisi non lineare e nelle analisi di danno:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]\end{aligned}$$

Dalle deformazioni così calcolate può essere fatta la verifica del danno cumulato sia per fenomeni di fatica

Thus the radius has been identified for the pair of load prints for which the vertical deformations of the two load systems are equal (fig. 5).

4.1. Calculation of the stresses in the layers

To solve an elastic problem in axial symmetry, like the one under study, it is opportune to define a stress function which satisfies the differential equations and the surrounding conditions which regulate the system, with which to determine the stresses and deformations in the structure.

The stress function for each layer is characterized by four integrating constants of the layer, except for the last layer which has only two constants owing to the infinite thickness hypothesis. Thus for a structure with n layers, the total number of constants to be determined is $4n-2$, for the definition of which two surrounding conditions are available, (the vertical stress at the load print point is equal to the external pressure applied and the shear force is nil) and for continuity conditions for each layer (vertical stress, shear stress, vertical strain and radial strain).

In the case of more than one load print, the principle of the superimposition of the effects rules (fig. 7): in one point, the stresses and the vertical strains due to the loads may be summed directly, while the radial and tangential stresses and the shear forces must be separated along the reference directions.

Therefore, once the stresses $s_x, s_y, s_z, t_{xy}, t_{xz}, t_{yz}$ have been defined, the three main stresses which characterize the force in a point can be determined. From these it is

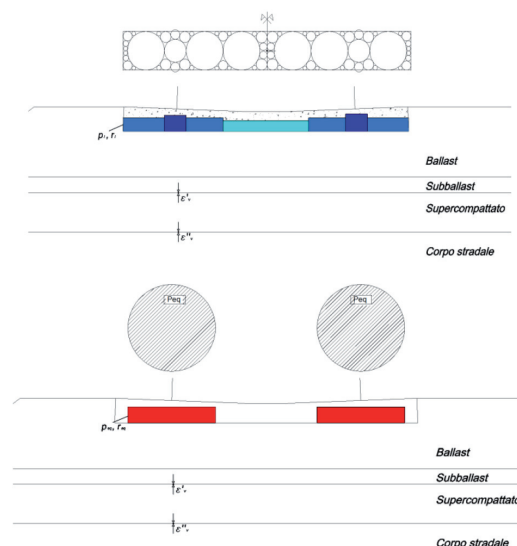


Fig. 5 - Impronte di carico equivalenti.
Fig. 5 - Equivalent load prints.

dei materiali che per accumulo di deformazioni permanenti, per stimare la vita utile della struttura considerata.

Il codice KENLAYER inoltre può effettuare l'analisi di danno sulla struttura considerata, dividendo il periodo di osservazione per un valore limite di 24 intervalli temporali differenti, nei quali è possibile assegnare ai materiali caratteristiche o condizioni ambientali qualsiasi.

4.2. Caratterizzazione del conglomerato bituminoso dello strato di subballast

Il software KENLAYER consente di integrare la trattazione del multistrato elastico con l'analisi del comportamento visco-elastico dello strato di sub-ballast realizzato in conglomerato bituminoso.

L'applicativo può analizzare problemi non lineari attraverso il calcolo iterativo delle caratteristiche di rigidità dei materiali e può riprodurre il comportamento dei materiali visco-elastici, quali il conglomerato bituminoso costituente il subballast, sensibili alla temperatura e alla durata del carico applicato.

Esistono in generale due metodi per caratterizzare un mezzo visco-elastico: il primo si basa sull'applicazione dei modelli di meccanica delle terre, e il secondo passa attraverso l'analisi della curva di comportamento viscoso (*creep compliance curve*, CCP). Poiché il tempo di applicazione del carico ha un'influenza relativamente piccola sul modulo di Poisson, quest'ultimo è assunto come indipendente dal tempo. L'unica caratteristica influenzata dalla durata del carico sarà il modulo elastico dinamico E_n .

Il carico permanente, dovuto alla sovrastruttura, è uniformemente distribuito su tutta la superficie della piattaforma e quindi non ci sono deformazioni differenziate. Inoltre, l'entità del carico trasmesso dalla sovrastruttura è trascurabile rispetto ai carichi dovuti al traffico. Per questi motivi sono trascurati gli effetti del carico permanente.

In questo studio, il metodo adottato per caratterizzare il mezzo visco-elastico è quello della determinazione della sua *creep compliance* in corrispondenza di vari valori del tempo t . La *creep compliance* $D(t)$ è definita come:

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma}$$

in cui $\varepsilon(t)$ è la deformazione dipendente dal tempo sotto una condizione di tensione costante σ . La *creep compliance* è l'inverso del modulo dinamico del conglomerato bituminoso per la stessa durata di carico t .

Per il modello reologico generalizzato (combinazione dei modelli reologici di KELVIN e MAXWELL) l'espressione della *creep compliance* diviene

$$D(t) = \frac{1}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{T_i} \right) \right]$$

in cui:

possible to arrive at the three main strains which are used in the non linear analysis and in the analysis of damage:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_2 + \sigma_1)]$$

Finally, on the basis of the strains thus calculated, the accumulated damage due both the fatigue phenomena of the materials and the permanent deformations can be verified, and then evaluate the service life of the structure considered.

Moreover, KENLAYER can perform the analysis of damage to the structure considered, dividing the period of observation into a maximum of 24 different time intervals, in which it is possible to assign to the materials different characteristics and environmental conditions.

4.2. Characterization of the asphalt concrete of the sub-ballast layer

KENLAYER can consider the asphalt concrete sub-ballast visco-elastic behaviour in the MLE theory.

KENLAYER can also analyse non linear problems through the iterative calculation of the rigidity characteristics of the materials and can reproduce the behaviour of the viscous-elastic materials, such as the asphalt concrete in the sub-ballast, which is sensitive to the temperature and to the duration of the applied load.

Generally there are two methods for characterizing a viscous-elastic material: the first is based on the application of models for soil mechanics, and the second passes through the analysis of the creep compliance curve (CCP). Since the time of application of the load has a relatively small impact on Poisson ratio, this is considered independent of time, and the only characteristic affected by the duration of the load will be the dynamic elastic modulus E_n .

The permanent load due to track is uniformly distributed on the surface of formation, and therefore any differential settlements are present. In addition, the magnitude of the load transmitted by the track elements is negligible if compared to the traffic loads. For these reasons the effects of the permanent load are neglected.

In this study, the method used for characterizing a viscous-elastic material is that of determining its creep compliance at various time values t . The creep compliance $D(t)$ is defined as

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma}$$

where $\varepsilon(t)$ is the time-dependent strain under a constant

E_n è il modulo dinamico della miscela per la durata t_n ;

T_n è il *relaxation time*, calcolato come λ/E_n , in cui λ è la viscosità del bitume.

Conoscendo la curva di *creep compliance* di un dato materiale si può risalire, attraverso il metodo degli scarti successivi, alla determinazione delle sue caratteristiche visco-elastiche.

In questo studio è stata analizzata una tipica miscela di conglomerato bituminoso le cui caratteristiche compositive sono riportate in tabella 1.

Sono state inoltre considerate le caratteristiche del bitume riportate in tabella 2.

Dalle caratteristiche degli aggregati e del bitume riportate nelle tabelle 1 e 2 e mediante le relazioni sperimentali fornite della Shell [13], sono stati ricavati i valori del modulo elastico dinamico riportati in tabella 3, per diverse durate di carico.

Tali valori costituiscono la curva di *creep compliance*,

TABELLA 1 TABLE 1

MISCELA DEGLI AGGREGATI COMPONENTI IL CONGLOMERATO BITUMINOSO
MIXTURE OF THE AGGREGATES OF THE ASPHALT CONCRETE

		%
Volume di bitume Volume of bitumen	V_b	13
Volume di aggregato grosso Volume of coarse aggregate	V_G	72
Volume di aggregato fino Volume of fine aggregate	V_g	9
Volume dei vuoti Volume of the voids	V_v	6

TABELLA 2 - TABLE 2

CARATTERISTICHE DEL BITUME COMPONENTE IL CONGLOMERATO BITUMINOSO
CHARACTERISTICS OF THE BITUMEN OF THE ASPHALT CONCRETE

Caratteristica Characteristic	Unità di misura Unit	Valore Value	Standard
Penetrazione a 25°C Penetration at 25°C	0.1 mm	60	EN 1426
Punto di rammollimento Palla Anello Softening point - Ring and ball test	°C	65	EN 1427
Indice di plasticità Plasticity index		2.47	

stress σ . The creep compliance is the reciprocal of the dynamic modulus of the asphalt concrete for the same load duration t .

For the generalized rheological model (combination of the rheological models of KELVIN and MAXWELL) the creep compliance expression becomes

$$D(t) = \frac{1}{E_o} \left(1 + \frac{t}{T_o} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left[1 - \exp \left(- \frac{t}{T_i} \right) \right]$$

where:

E_n is the dynamic modulus of the mixture for the duration t_n ;

T_n is the relaxation time, calculated as λ/E_n , in which λ is the viscosity of the bitumen.

Knowing the creep compliance curve of a material, it is possible, through the ordinary least squares, to arrive at the determination of its viscous-elastic properties.

In this study, a typical asphalt concrete mixture has been analysed, the component characteristics of which are shown in table 1.

The characteristics of the bitumen were also considered and are shown in table 2.

From the characteristics of the aggregates and the bitumen shown in tables 1 and 2, and by means of the experimental relations supplied by Shell [13], the values of the dynamic elastic moduli (shown in table 3) were obtained for different load durations.

TABELLA 3 – TABLE 3

VALORI DEL MODULO ELASTICO DINAMICO E CREEP COMPLIANCE DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO PER DIVERSE DURATE DEL CARICO
VALUES OF THE DYNAMIC ELASTICITY MODULI OF THE ASPHALT CONCRETE FOR VARIOUS LOAD DURATION

Durata [s] Duration	E_n [N/m²]	D [m²/N]
0,001	2,20E+09	4.55E-10
0,003	1,80E+09	5.56E-10
0,01	1,30E+09	7.69E-10
0,03	9,00E+08	1.11E-09
0,1	6,00E+08	1.67E-09
0,3	4,10E+08	2.44E-09
1	3,00E+08	3.33E-09
3	2,00E+08	5.00E-09
10	1,10E+08	9.09E-09
30	8,00E+07	1.25E-08
100	5,00E+07	2.00E-08

TABELLA 4 – TABLE 4

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COMPONENTI GLI STRATI
DEL CORPO STRADALE
CHARACTERISTICS OF THE MATERIALS COMPOSING THE TRACK
FORMATION LAYERS

Strato Layer	Spessore [cm] Thickness (mm)	Mod. El. Dinamico Dynamic Elasticity Modulus [N/mm ²]	Coeff. Poisson Poisson Ratio
Ballast	35	130	0,40
Subballast	12	Var.	0,35
Supercompattato Frost protective layer	30	80	0,40
Corpo Stradale Track formation		50	0,45

utilizzata nel programma di calcolo KENLAYER e rappresentata in fig. 6.

4.3. Calibrazione del modello

La calibrazione del modello descritto è stata effettuata mediante il confronto tra i risultati calcolati e quelli ottenuti da campagne sperimentali.

Nel 1992 RFI ha realizzato un "Progetto di sperimentazione" sul corpo stradale della linea ferroviaria "Direttissima Roma-Firenze", progettata per un traffico AV, con caratteristiche geometriche e strutturali analoghe al caso di studio [14].

In questa sperimentazione sono state monitorate, in continuo nel tempo, le sovrappressioni verticali indotte dai carichi dinamici dei treni ETR Y 500 e la loro diffusione a varie profondità. A tale scopo fu strumentata una sezione trasversale del rilevato utilizzando otto celle di carico disposte ad una profondità variabile fino alla quota di 4.00 m a partire dal fondo dello strato di subballast, in asse al binario ed all'interfaccia.

Assegnando agli strati componenti il corpo stradale le caratteristiche riportate in tabella 4, la modellazione EF del binario, in cui è stato assunto un coefficiente di

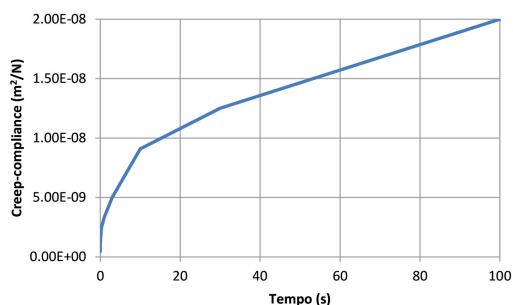


Fig. 6 - Curva di creep compliance adottata per il subballast.
Fig. 6 - Creep compliance curve.

These values constitute the creep compliance curve, used in the software KENLAYER and given in fig. 6.

4.3. Calibration of the model

The calibration of the model was achieved by comparing the calculated results with those obtained in the experimental test.

In 1992 RFI carried out a "Test Project" on the track formation of the "Rome-Florence direct railway line", designed for high speed traffic, with geometric and structural characteristics similar to the case study [14].

This testing included the continuous monitoring over time of the overpressures induced by the dynamic loads of the ETR Y 500 trains and their diffusion to various depths. To do this, instruments were placed in a cross section of the embankment itself, using eight load cells placed at varying depths up to 4.00 m from the sub-ballast layer, both in axis with the track and midway between the tracks.

Assigning to the layers composing the track formation the characteristics shown in table 4, the FE modelling of the track, using a subgrade reaction modulus k calculated according to Burmister's theory, produced a scheme of load distribution very close to that assumed by the standard [8], thus confirming its validity, as can be seen by the following coefficients r :

- $r_{i-1}=0.2473$;
- $r_i=0.5054$;
- $r_{i+1}=0.2473$.

Fig. 7 shows the trends of the pressures measured and calculated for the speed of 200 km/h, at various depths of the railway track structure.

4.4. The effect of temperature

Stresses and strains are calculated considering the effect induced by the atmospheric temperature on the rigidity of the asphalt concrete layer (sub-ballast). The year was divided into four climatic seasons, characterized by the average temperatures shown in table 5, on the basis of which the temperatures in the middle point of the bituminous conglomerate layer were calculated by means of the following test relation [15]:

$$T_{sb}(z) = (1.467 + 0.043 \cdot z) + (1.362 - 0.005 \cdot z) \cdot T_{atm}$$

With reference to the temperatures of table 5, the trends of the pressures on the upper surface of the frost protective layer and of the first layer of the track formation are given in figs. 8 and 9 respectively.

sottofondo k calcolato secondo la teoria di Burmister, ha prodotto uno schema di ripartizione del carico gravante molto prossimo a quello assunto dalla normativa [8] confermandone la validità, come si evince dai valori dei coefficienti r ottenuti:

- $r_{i-1}=0.2473$;
- $r_i=0.5054$;
- $r_{i+1}=0.2473$.

In fig. 7 sono stati infine riportati gli andamenti delle pressioni rilevate e calcolate per la velocità di 200 km/h, a diverse profondità della sede ferroviaria.

4.4. L'effetto della temperatura

Lo stato tensionale e deformativo è calcolato considerando l'effetto indotto dalla temperatura atmosferica sulla rigidità dello strato di conglomerato bituminoso (subballast). L'anno è stato diviso in 4 stagioni climatiche, caratterizzate dalle temperature medie riportate

TABELLA 5 – TABLE 5
TEMPERATURE MEDIE DELL'ATMOSFERA E DELLO STRATO IN CONGLOMERATO BITUMINOSO NELLE 4 STAGIONI
AVERAGE TEMPERATURES OF THE ATMOSPHERE AND OF THE ASPHALT CONCRETE LAYER IN THE 4 SEASONS

	Estate Summer		Autunno Autumn		Inverno Winter		Primavera Spring	
	T _{atm}	T _{subballast}	T _{atm}	T _{subballast}	T _{atm}	T _{subballast}	T _{atm}	T _{subballast}
°C	30	37	12	17	5	9	20	26

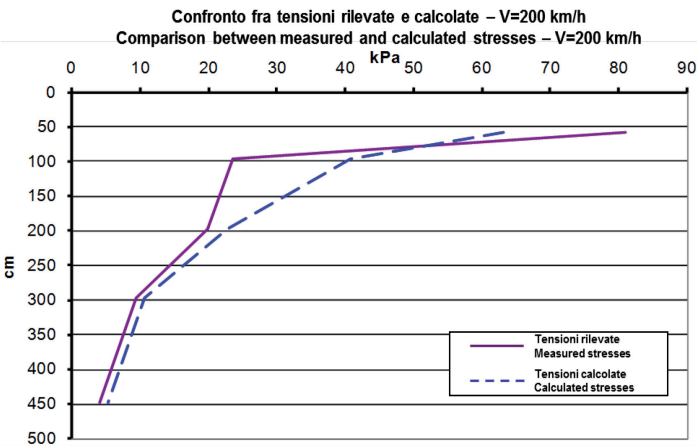


Fig. 7 - Confronto tra pressioni rilevate e calcolate.
Fig. 7 - Comparison between measured and calculated pressures.

5. Fatigue verification and duration of the right of way

On the basis of the stresses and strains calculated, the fatigue of the sub-ballast and the track formation was verified, using the testing procedures defined by the Asphalt Institute and implemented in the KENLAYER: the criterion of durability for the unbound layers is a function of the maximum vertical strain ϵ at the top of the layer considered according to the following expression:

$$N_t = f_1(\epsilon_v)^2$$

where f_1 and f_2 are experimental coefficients defined by the Asphalt Institute [16] equal to:

$$f_1=1,365 \times 10^{-9} \text{ and } f_2=4,477$$

The criterion for the verification of the durability of the sub-ballast layer in asphalt concrete, on the other hand, is a function of the maximum horizontal traction strains ϵ_t which occur on the bottom of the bituminous layer, according to the expression:

$$N_t = f_1(\epsilon_t)^{f_2}(E_d)^{f_3}$$

where f_1 , f_2 and f_3 are experimental coefficients which, again according to the evaluation of the Asphalt Institute, may be assumed to be equal to:

$$f_1=0,0796, f_2=3,291, f_3=0,854$$

The durability thus calculated was compared with that obtained using the following equation of HEUKELOM-KLOMP [17], usually used in the railway field:

$$\sigma_{am} = \frac{0,006 E_d}{1 + 0,7 \log N_t}$$

where:

σ_{am} is the maximum vertical stress acceptable on a layer of granular material;

E_d is the dynamic modulus of the asphalt concrete;

N_t is the allowable number of repetitions.

In this study, two different materials for the track formation were analysed, one with an elasticity modulus $E_d = 40 \text{ N/mm}^2$ and the other with $E_d = 50 \text{ N/mm}^2$; the stresses calculated and the allowable number of load repetitions are shown in Tables 6 and 7 respectively.

Table 8 gives the same parameters for the frost protective layer.

Fig. 10 gives the trend of allowable load repetitions, according to HEUKELOM

tate in tabella 5, in base alle quali sono state calcolate le temperature nel punto medio dello strato in conglomerato bituminoso mediante la seguente relazione sperimentale [15]:

$$T_{sb}(z) = (1.467 + 0.043 \cdot z) + (1.362 - 0.005 \cdot z) \cdot T_{atm}$$

In funzione delle temperature di tabella 5, gli andamenti delle pressioni sulla superficie superiore dello strato del supercompattato e del primo strato del corpo stradale sono riportate nelle figg. 8 e 9 rispettivamente.

5. Verifica a fatica e durata della sede ferroviaria

In base allo stato tensionale e deformativo della sede ferroviaria, la verifica a fatica del subballast e del corpo stradale è stata effettuata con le leggi sperimentali definite dall'Asphalt Institute ed implementate nel codice di calcolo KENLAYER: il criterio di durabilità per gli strati non legati è funzione della massima deformazione verticale e_v , alla sommità dello strato considerato secondo la seguente espressione:

$$N_f = f_1 (\epsilon_v)^2$$

in cui f_1 e f_2 sono coefficienti sperimentali definiti dall'Asphalt Institute [16] pari a:

$$f_1 = 1,365 \times 10^{-9} \text{ e } f_2 = 4,477$$

Il criterio di verifica di durabilità per lo strato di subballast in conglomerato bituminoso è invece funzione delle massime deformazioni orizzontali di trazione e_t che si verificano sul fondo dello strato bituminoso, secondo l'espressione:

$$N_f = f_1 (\epsilon_t)^{f_2} (E_1)^{f_3}$$

in cui f_1 , f_2 e f_3 sono coefficienti sperimentali che, sempre con riferimento alla valutazione dell'Asphalt Institute, possono essere assunti pari a:

$$f_1 = 0,0796, f_2 = 3,291, f_3 = 0,854$$

La stima della durabilità così calcolata è stata confrontata con quella ottenuta con la seguente relazione di

-KLOMP, with the variation of the atmospheric temperature, for the track formation and frost protective layers. The value of 10^6 repetitions is the value commonly accepted to assure good levels of durability for the considered track formation layer.

This means that the elastic characteristics of the track formation and of the frost protective layer, for the standard of durability seen above (according to the HEUKELOM-KLOMP criterion) are the following:

- frost protective layer $E_d = 80 \text{ N/mm}^2$;
- track formation $E_d = 50 \text{ N/mm}^2$.

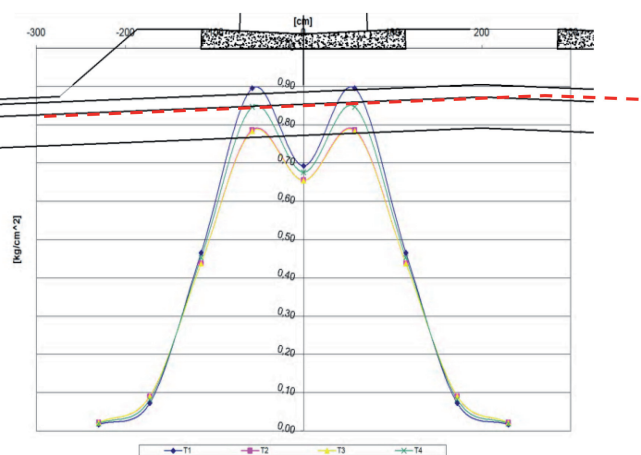


Fig. 8 - Pressioni sulla superficie superiore dello strato super compattato.
Fig. 8 - Pressures on the upper surface of the frost protective layer.

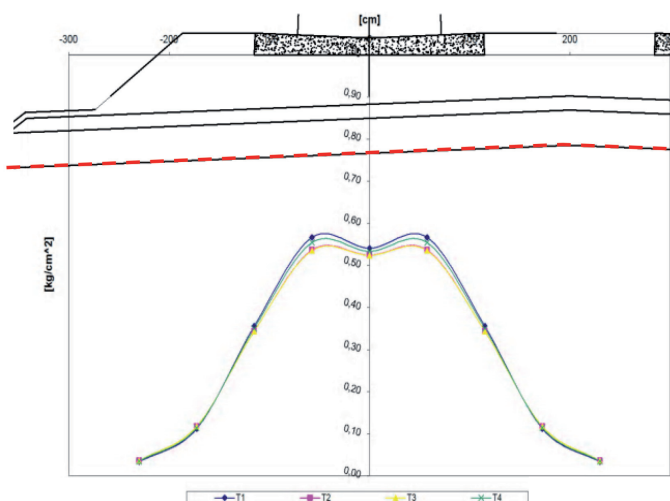


Fig. 9 - Pressioni sulla superficie superiore del primo strato del corpo stradale.
Fig. 9 - Pressures on the upper surface of the first layer of the track formation.

TABELLA 6 – TABLE 6

TENSIONI E NUMERO DELLE RIPETIZIONI DI CARICO AMMISSIBILI PER UNO STRATO DEL CORPO STRADALE DI $E_d = 40 \text{ N/mm}^2$
STRESSES AND ALLOWABLE NUMBER OF LOAD REPETITIONS FOR A TRACK FORMATION LAYER OF $E_d = 40 \text{ N/mm}^2$

$E_d \text{ N/mm}^2$	N_t	$s_{am} \text{ N/mm}^2$	$T_{atm} [^\circ\text{C}]$
40	4,94E+04	0,56	30
40	5,76E+04	0,55	20
40	9,04E+04	0,54	12
40	9,29E+04	0,54	5

HEUKELOM-KLOMP [17], generalmente impiegato in ambito ferroviario:

$$\sigma_{am} = \frac{0,006E_d}{1+0,7\log N_t}$$

dove:

σ_{am} è massima tensione verticale ammissibile su uno strato di materiale granulare;

E_d è il modulo dinamico del conglomerato bituminoso;

N_t è il numero di ripetizioni ammissibili.

In questo studio, sono stati analizzati due diversi materiali per il corpo stradale, uno con modulo elastico E_d pari a 40 N/mm^2 e l'altro con E_d pari a 50 N/mm^2 . Le tensioni calcolate ed il numero delle ripetizioni di carico ammissibili sono riportate rispettivamente nelle tabelle 6 e 7.

In tabella 8 sono invece riportati gli stessi parametri per il supercompattato.

Nella fig. 10 è diagrammato l'andamento delle ripetizioni di carico ammissibili, secondo HEUKELOM-KLOMP al variare della temperatura atmosferica, per gli strati di corpo stradale e supercompattato. Il valore di 10^6 ripetizioni è il valore comunemente accettato per avere valori di vita utile accettabili per lo strato di sede ferroviaria considerato.

Da ciò risulta che le caratteristiche elastiche del corpo stradale e del super compattato, per lo standard di durabilità sopra definito (secondo il criterio di HEUKELOM-KLOMP), siano le seguenti:

- Supercompattato $E_d=80 \text{ N/mm}^2$;
- Corpo stradale $E_d=50 \text{ N/mm}^2$.

L'analisi svolta con gli stessi valori di E_d , ma secondo il criterio di durabilità dell'Asphalt Institute, fornisce risultati inferiori a quelli ottenuti secondo il criterio di Heuke- lom-Klomp. Come si vede dal grafico di fig. 11, i valori,

TABELLA 7 – TABLE 7

TENSIONI E NUMERO DELLE RIPETIZIONI DI CARICO AMMISSIBILI PER UNO STRATO DEL CORPO STRADALE DI $E_d = 50 \text{ N/mm}^2$
STRESSES AND ALLOWABLE NUMBER OF LOAD REPETITIONS FOR A TRACK FORMATION LAYER OF $E_d = 50 \text{ N/mm}^2$

$E_d \text{ N/mm}^2$	N_t	$s_{am} \text{ N/mm}^2$	$T_{atm} [^\circ\text{C}]$
50	1,39E+06	0,57	30
50	2,03E+06	0,55	20
50	3,57E+06	0,54	12
50	3,69E+06	0,54	5

TABELLA 8 – TABLE 8

TENSIONI E NUMERO DELLE RIPETIZIONI DI CARICO AMMISSIBILI PER LO STRATO DI SUPERCOMPATTATO
STRESSES AND ALLOWABLE NUMBER OF LOAD REPETITIONS FOR THE FROST PROTECTIVE LAYER

$E_d \text{ N/mm}^2$	N	$s_{amm} \text{ N/mm}^2$	$T [^\circ\text{C}]$
80	1,71E+06	0,89	30
80	4,65E+06	0,85	20
80	1,97E+07	0,77	12
80	2,08E+07	0,78	5

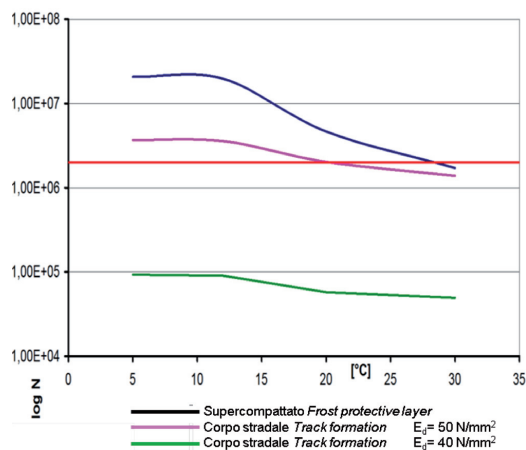


Fig. 10 - Andamento delle ripetizioni di carico ammissibili, secondo HEUKELOM-KLOMP, al variare della temperatura atmosferica.
Fig. 10 - Trend of the allowable load repetitions, according to HEUKELOM-KLOMP, with the variation of the air temperature.

accettabili con il criterio HEUKELOM-KLOMP, risultano insufficienti secondo il criterio dell'Asphalt Institute.

Per ottenere standard di durabilità sufficienti (ripetizioni di carichi ammissibili superiori a 10^6) è necessario fornire agli strati granulari le seguenti caratteristiche di rigidità:

- Supercompattato $E_d=110 \text{ N/mm}^2$;
- Corpo stradale $E_d=70 \text{ N/mm}^2$.

I risultati dell'analisi a fatica ottenuti per tali valori sono riportati in fig. 12, dalla quale si nota la maggiore durabilità del subballast rispetto agli strati granulari sottostanti e che il corpo stradale è il primo strato ad entrare in crisi.

6. Conclusioni

In questo studio è stata esposta una metodologia di calcolo per la valutazione della durabilità della sede ferroviaria in funzione dei carichi di traffico e delle condizioni climatiche. La metodologia può essere utilizzata sia nella fase progettuale per ottimizzare la scelta dei materiali da impiegare, sia nella fase di esercizio, per verifica-

The analysis carried out with the same values of E_d but according to the criterion of durability of the Asphalt Institute, gives lower results than those obtained according to the HEUKELOM-KLOMP criterion. As can be seen in the graph of fig. 11, the values prove to be acceptable with the HEUKELOM-KLOMP criterion, but are insufficient according to the Asphalt Institute.

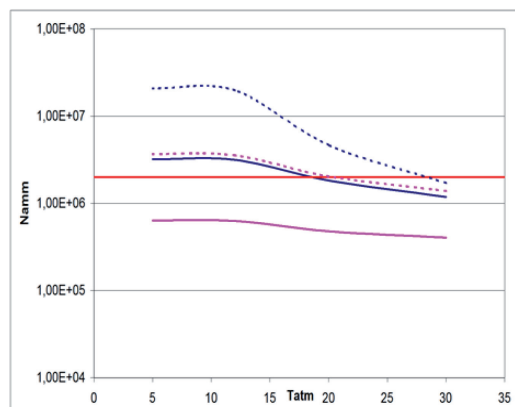
To obtain adequate durability standards (allowable load repetitions greater than 10^6) it is necessary to ensure that the granular layers have the following rigidity characteristics:

- Frost protective layer $E_d=110 \text{ N/mm}^2$;
- Track formation $E_d=70 \text{ N/mm}^2$.

The results of the fatigue analysis obtained for such values are shown in fig. 12, in which one can note the greater durability of the sub-ballast with respect to the underlying granular layers and that the track formation is the first layer to enter a critical condition.

6. Conclusions

This article presents the study of method of calculation for evaluating the durability of the railway track in function of the traffic loads and the climatic conditions. The method can be used both in the design phase to optimize the choice of the materials to be used and in the operation phase to verify the real useful life of the structure in the presences of substantial variations in the data assumed in the design phase.



Heukelom-Klomp

- Supercompattato $E_d= 80 \text{ N/mm}^2$
- Frost protective layer $E_d= 80 \text{ N/mm}^2$
- Corpo stradale $E_d= 50 \text{ N/mm}^2$
- Track formation $E_d= 50 \text{ N/mm}^2$

Asphalt Institute

- Supercompattato $E_d= 80 \text{ N/mm}^2$
- Frost protective layer $E_d= 80 \text{ N/mm}^2$
- Corpo stradale $E_d= 50 \text{ N/mm}^2$
- Track formation $E_d= 50 \text{ N/mm}^2$

Fig. 11 - Andamento delle ripetizioni di carico ammissibili al variare della temperatura atmosferica: confronto fra le relazioni di HEUKELOM-KLOMP e dell'Asphalt Institute.

Fig. 11 - Trend of the allowable load repetitions with the variation of the air temperature: comparison between the HEUKELOM-KLOMP and Asphalt Institute equations.

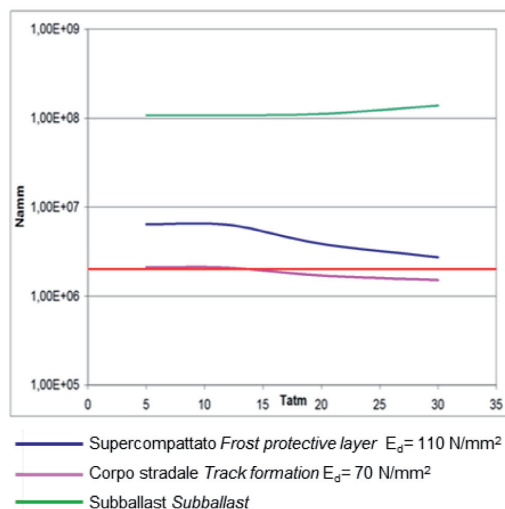


Fig. 12 - Andamento delle ripetizioni di carico ammissibili, secondo Asphalt Institute, al variare della temperatura atmosferica.

Fig. 12 - Trends of the allowable load repetitions, according to the Asphalt Institute, with the variation of atmospheric temperature.

re la vita utile effettiva della struttura in presenza di variazioni sostanziali dei dati assunti nella fase di progetto.

Il metodo utilizza due diversi approcci di modellazione: uno per l'armamento (rotaie, attacchi, traverse), basato sulla teoria agli elementi finiti; l'altro per il corpo stradale (ballast, subballast e supercompattato), basato sulla teoria del multistrato elastico. All'analisi tenso-deformativa segue la determinazione delle ripetizioni di carico ammissibili sul sistema e la stima della durabilità dell'intero sistema. Quest'ultima è stata valutata seguendo due criteri: quello dell'Asphalt Institute e quello di HEUKELOM-KLOMP, (di largo uso in ambito ferroviario). È stato analizzato il caso di una linea ferroviaria AV con rotaie tipo UIC 60, considerando il passaggio dei treni ETR Y 500.

L'analisi ha prodotto risultati che hanno trovato un buon riscontro nei dati sperimentali pubblicati da RFI e ha messo in evidenza che il criterio di verifica a fatica di HEUKELOM-KLOMP, tende a sottostimare le caratteristiche elastiche da assegnare agli strati, rispetto ai risultati forniti dal criterio delle deformazioni verticali residue dell'Asphalt Institute e adottato nel codice di calcolo KENLAYER.

Alla luce dei risultati, la metodologia può essere quindi considerata un valido strumento per il dimensionamento degli elementi costituenti la sede ferroviaria. Considerando gli strati superficiali della sede e quelli più profondi, si ottiene una caratterizzazione più particolareggiata di tutti i materiali costituenti la sede ferroviaria, con evidenti benefici tecnici ed economici.

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano il Dott. Alessandro BUONANNO ed il Dott. Stefano GORELLI.

The method uses two different modelling approaches: one for the track equipment (rails, fastenings, sleepers) based on the finite elements theory; the other for the track formation (ballast, sub-ballast and frost protective layer) based on the theory of the elastic multi-layer. The stresses and strains analysis thus carried out was followed by the determination of the allowable load repetitions on the system and the estimate of the durability of the whole structure. This last factor was evaluated following two criteria: that of the Asphalt Institute and that of HEUKELOM-KLOMP, the latter widely used in the railway field. The case of a high speed railway line with UIC 60 type rails was studied, considering the passage of ETR Y 500 trains.

The analysis produced results which compared well with test data supplied by RFI and underlined that the fatigue verification criterion of HEUKELOM-KLOMP tends to under estimate the elastic characteristics to assign to the layers, with respect to the criterion of the residual vertical strains of the Asphalt Institute and adopted in KENLAYER.

In the light of the results, therefore, the method can be considered a valid instrument for dimensioning the elements constituting the railway track structure: considering both the superficial layers and the deeper layers, a more detailed characterization is obtained of all the materials composing the track, with obvious technical and economic advantages.

Aknowldgements

The authors thank Dr. Alessandro BUONANNO and Dr. Stefano GORELLI for their support in the research.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] CANTISANI G., LOPRENCIPE G., ZOCCALI G., 2013, "Previsione delle vibrazioni ferroviarie: modelli teorici e agli E.P.", e agli E.F. III Convegno Nazionale Sicurezza ed Esercizio Ferroviario SEF13 – Tecnologie e Regolamentazione per la Competizione. Aracne Editrice, p. 143-154, Roma, 07 Giugno 2013. (ISBN 978-88-548-6046-9).
- [2] MARSICO G., CURCURUTO S., MAZZOCCHI E., ATZORI D., BETTI R., MONACO E., AMOROSO F., LIMONE V., LOPRENCIPE G., DE FELICE F., 2012, "Propagation of Vibrations Induced on Track: Implementation of Previsional Models for Low and High Speed Trains and Comparison with Experimental Measurements", p. 3033-3040, 19th International Congress on Sound and Vibration. July 8-12, 2012, Vilnius, Lithuania.
- [3] LICHTBERGER, BERNHARD, 2005, "Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics", Eurailpress.
- [4] DI MASCIÒ P., LOPRENCIPE G., MORETTI L., 2013, "Valutazione del degrado della sede ferroviaria in funzione del traffico", III Convegno Nazionale Sicurezza ed Esercizio Ferroviario SEF13 – Tecnologie e Regolamentazione per la Competizione. Aracne Editrice, p. 143-154, Roma, 07 Giugno 2013. (ISBN 978-88-548-6046-9).
- [5] DI MASCIÒ P., LOPRENCIPE G., MORETTI L., 2014, "Competition in rail transport: methodology to evaluate economic impact of new trains on track", 3rd International Conference on Transportation Infrastructure ICTI2014 – Sustainability, Eco-efficiency and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management, Pisa, 22-25 Aprile 2014, (In press).
- [6] RADAMPOLA, SENANIE SUJEEWA, 2006, "Evaluation and Modelling Performance of Capping Layer in Rail Track Sub-structure", Centre for Railway Engineering, Central Queensland University.

- [7] FASTENRATH F., 1977, "Die Eisenbahnschiene", Chapter 2: J. EISEMANN: "Die Schiene als Trägen und Fahrbahn", Verlag W. Ernst, Berlin.
- [8] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2008, "DM 14 Gennaio 2008, Norme tecniche per le Costruzioni", Suppl. or. N. 30 Alla GU N. 29 Del 4/2/2008.
- [9] BONO G., FOCACCI C., LANNI S., Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, 1997, "La Sovrastruttura Ferroviaria", CIFI.
- [10] BURMISTER, DONALD M., 1945, "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems", I., Journal of Applied Physics 16 (2): 89-94.
- [11] ESVELD, COENRAAD, 2001, "Modern Railway Track", MRT Production.
- [12] HUANG, YANG HSIEN, 1993, "Pavement Analysis and Design".
- [13] SHELL, 1978, "Shell Pavement Design Manual - Asphalt and Overlays for Road Traffic", Shell International Petroleum.
- [14] MELE R., BUONANNO A., MOSCA L., MISANO V., DI GIANGIACOMO G., 1993, "La Sperimentazione A.V. Sul Corpo Stradale", Ingegneria Ferroviaria (Giugno): 380-385.
- [15] MARCHIONNA A., CESARINI M., FORNACI M.G., MALGARINI M., 1985, "Modello Di Degradazione Strutturale Della Pavingmentazione", Rivista Autostrade 1 (3).
- [16] Asphalt Institute, 1982, "Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1)", Research Report 82-2 9th ed.
- [17] HEUKELOM W., KLOMP A.J., 1964, "Road Design and Dynamic Loading", In Assoc Asphalt Paving Technol Proc.

Sommaire

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT VISQUEUX ET ÉLASTIQUE DES DIFFÉRENTES COUCHES D'UNE INSTALLATION FERROVIAIRE

Cet article propose une méthodologie de calcul pour l'évaluation de l'état de tension et déformation dans les soustraites de l'installation ferroviaire. Tel état de tension et de déformation est calculé à travers la modélisation des éléments individuels qui composent la structure, tout en considérant les poids et le nombre de répétitions de trafic, les caractéristiques des matériaux, les conditions environnementales et enfin sous l'hypothèse pour les soustraites de l'installation ferroviaire d'un comportement visqueux et élastique.

La méthode proposée a été validée grâce aux données relevées dans le contexte d'une campagne expérimentale effectuée par R.F.I. La même méthode a été réutilisée en suite pour évaluer théoriquement la durabilité d'une installation ferroviaire, pour certaines caractéristiques mécaniques des soustraites qui la composent et des valeurs de la température atmosphérique en activité.

Zusammenfassung

MODELLIERUNG DES VISKOELASTISCHEN VERHALTENS DER OBERBAUSCHICHTEN

Berechnungsverfahren zur Bewertung des Beanspruchungs- und Dehnungszustandes einer Eisenbahnoberbau. Dieser wird mittels Modellierung der Einzelementen - woraus die Oberbau besteht - berechnet. Es werden in Kauf genommen die Verkehrslasten, deren Spektra, die Stoffmerkmalen und die Umweltbeeinflussungen. Die Verformungsbarkeit wird im Besonderen als viskoelastisch angenommen.

Das Verfahren wurde auf Grund von experimentellen Messungen validiert, die von RFI ausgeführt worden waren. Danach das Verfahren erlaubte die Dauerfähigkeit zu berechnen für eine Oberbau, deren mechanischen Eigenschaften und Umwelt Bedingungen vorbestimmt worden waren.