



Linea AV/AC Torino-Novara Viadotto Santhià: valutazione degli effetti della viscosità del calcestruzzo dell'impalcato

The Santhià Viaduct on the Turin-Novara high-speed high-capacity railway line: evaluation of creep effects in the concrete deck

Dott. Ingg. Giuseppe TRAINI^(), Luigi EVANGELISTA^(**), Francesco SACCHI^(***)*

SOMMARIO - Il viadotto Santhià, sulla linea ferroviaria AV/AC Torino-Venezia tratta Torino-Novara, in esercizio dal Febbraio 2006, è costituito da campate da 25 e 20.50 m semplicemente appoggiate sulle pile per una lunghezza complessiva di 3783 m; l'impalcato è realizzato mediante un monocassone con getto unico. Le misure della regolarità del binario effettuate hanno evidenziato un particolare andamento del livello longitudinale sul viadotto, con cuspidi sulle pile e punti di colmo sulle mezzerie delle campate. Il fenomeno è stato attribuito al fatto che i tempi di maturazione del calcestruzzo prima della regolazione dell'armamento sono stati talmente ridotti che parte della deformazione viscosa dell'impalcato, relativa a precompressione e peso proprio, è avvenuta ad armamento posato. Nella memoria viene illustrato il fenomeno e viene condotta una valutazione analitica della suddetta

SUMMARY - The Santhià viaduct on the Turin-Novara section of the high-speed, high-capacity Turin-Venice railway line, which has been in function since February 2006, is composed of 25 and 20.50 m spans, simply supported on the piers, for a total length of 3,783 m; the deck is made of single-cast box girder. The measurements of the track level carried out evidenced a particular trend in longitudinal level along the viaduct, with depressions over the piers and peaks at the centres of the spans. This phenomenon was attributed to the fact that the curing times of the concrete before regulation of the track were so reduced that part of the viscous deformation of the deck, that relative to pre-compression and self weight, occurred after the track was laid. This phenomenon is illustrated herein, and an analytical evaluation of the abovementioned hypothesis was carried out by definition of creep curves from the

^(*) Italferr - Direttore Scientifico.

^(**) Italferr - Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Ingegneria delle Infrastrutture.

^(***) Italferr - Direzione Tecnica, U.O. Strutture, Capo Settore Progetto Ponti e Strutture in c.a.

^(*) Italferr - Scientific Director.

^(**) Italferr - Technical Direction, U.O. Infrastructures Engineering Responsible.

^(***) Italferr - Technical Direction, U.O. Structures, Bridge Project Chief and c.a. Structures.

ipotesi mediante la definizione delle curve di viscosità secondo le più evolute normative tecniche internazionali. Infine sono condotte valutazioni su eventuali ripercussioni future all'esercizio dell'opera.

1. Introduzione

Il viadotto Santhià è inserito lungo la linea ferroviaria AV/AC Torino-Venezia, sulla tratta Torino-Novara (General Contractor CAV-TO-MI), che è entrata in esercizio dal Febbraio 2006. L'opera è costituita da 148 campate da 25.00 m e 4 campate da 20.50 m per una lunghezza complessiva di 3783 m; l'impalcato, a doppio binario, è realizzato mediante un monocassone in c.a.p. con getto unico (fig. 1), con schema statico di trave semplicemente appoggiata sulle pile (fig. 2).

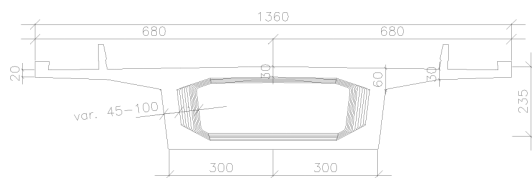


Fig. 1 - Sezione trasversale viadotto Santhià. *Transverse section of the Santhià Viaduct.*

Le opere civili (fondazioni, pile, spalle, impalcato) sono state completate durante l'estate 2004, dopo di che è stata realizzata la posa e la regolazione dell'armamento (massicciata, traverse e rotaie). Una volta posato l'armamento, sono state effettuate operazioni di regolazione al fine di raggiungere la livelletta di progetto e di ridurre al minimo le imperfezioni geometriche del binario, in modo tale da permettere il transito dei treni ad alta velocità (300 km/h).

Sull'intera tratta, dopo un determinato intervallo di tempo, sono state effettuate misure per verificare la regolarità del binario mediante il treno di misura Archimede. I dati raccolti hanno messo in evidenza un particolare andamento del livello longitudinale sul viadotto, caratterizzato da cuspidi in corrispondenza delle pile, rivolte verso il basso, e punti di colmo in corrispondenza delle mezzerie delle campate.

Il fenomeno è stato attribuito al fatto che i tempi di maturazione del calcestruzzo prima della regolazione dell'armamento sono stati molto ridotti e tali da non permettere un significativo sviluppo dei fenomeni viscosi nel tempo, associati alla precompressione e al peso proprio; pertanto, parte della deformazione viscosa dell'impalcato, relativa a queste azioni, è avvenuta ad armamento posato e in particolare nel periodo di tempo tra la regolazione dell'armamento e il passaggio del treno di misura Archimede.

Oggetto del presente articolo è lo studio del fenomeno emerso dalle misurazioni con la valutazione delle ipotesi

most evolved international technical regulations. Finally, an evaluation of any future repercussions on the use of the structure was carried out.

1. Introduction

The Santhià Viaduct is situated on the Turin-Novara section of the high-speed, high-capacity Turin-Venice railway line (General Contractor CAV-TO-MI), which was opened for use in February 2006. The construction consists of 148 spans of length 25.00 m and 4 spans of length 20.50 m, for a total length of 3,783 m; each section of the double-track deck was constructed out of single-cast box girder in pre-stressed reinforced concrete (fig. 1), with a static scheme of simply supported beam onto the piers (fig. 2).

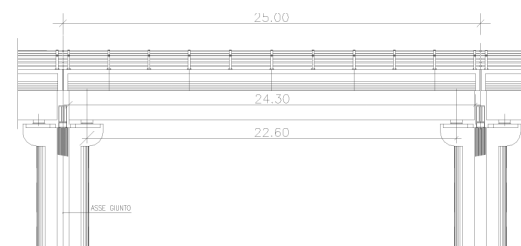


Fig. 2 - Prospetto longitudinale viadotto Santhià. *Longitudinal view of the Santhià Viaduct.*

The main structure (foundations, piers, abutments, beams) was completed during the summer of 2004, then the tracks (ballast, sleepers and rails) were laid and finally regulation was carried out to reach the design level and to minimise the geometric imperfections of the rails in order to permit transit of high-speed trains (300 km/h).

After a certain period of time, verification of the regularity of the rails along the entire section of the line was performed using the 'Archimedes' measurement train. The data acquired highlighted an irregular progression of the longitudinal level of the viaduct, characterised by downward-sloping curves at the piers and raised areas at the centres of the spans.

This phenomenon was attributed to the fact that the curing times of the concrete before the regulation of the tracks were so reduced that a significant development of viscous phenomena over time, linked to pre-compression and the deck's self weight, was not consented; furthermore, relative to these actions, part of the viscous deformation of the deck occurred once the tracks had been laid, specifically between the regulation of the tracks and the transit of the measurement train 'Archimedes'.

The aim of the present article is to study the phenomenon highlighted by these measurements, to evaluate the

fatte a spiegazione del fenomeno, e la determinazione delle eventuali ripercussioni future all'esercizio dell'opera.

2. Descrizione del fenomeno

La cronologia di realizzazione dell'opera si può così riassumere. In data 15/04/2003 è stato eseguito il getto del primo monocassone del viadotto, mentre il getto dell'ultimo manufatto è avvenuto il 03/07/2004. Per ogni monocassone l'applicazione della precompressione è avvenuta a 24 ore dalla fine del getto. Nel mese di dicembre 2004 sono stati posati i binari pari e dispari del tratto di linea sul viadotto; essi sono stati completati e definitivamente compattati e livellati nel mese di gennaio 2005.

Come già accennato nell'introduzione, il passaggio del treno di misura Archimede sul viadotto, avvenuto il 04/04/2006, ha evidenziato un andamento particolare del livello longitudinale dei binari sull'impalcato, con una deformazione ciclica di circa 2÷5 millimetri su una corda di circa 25 metri, che viene a coincidere con la lunghezza della campata. Tale tendenza, tra l'altro, è stata confermata da una livellazione topografica assoluta del binario effettuata successivamente (fig. 3).

In particolare sono state individuate cuspidi, rivolte verso il basso, in corrispondenza delle pile dell'impalcato e punti di colmo in corrispondenza delle mezzerie delle campate da 25.00 m, con valori di freccia tra colmo e cuspidi variabili da 2 mm fino a 5 mm (media 3÷4 mm).

3. Analisi teorica

Si è proceduto ad una valutazione analitica dell'ipotesi fatta a spiegazione del fenomeno emerso dalle misurazioni effettuate sul viadotto, a partire dai dati relativi al confezionamento e alla maturazione del calcestruzzo dei monocassoni, mediante la definizione delle curve di viscosità secondo due diverse ipotesi.

3.1. Stati di tensione e deformazione

Dai documenti di progetto sono stati ricavati gli stati tensionali relativi al lembo inferiore e superiore della sezione per diverse sezioni significative dell'impalcato, e in diverse fasi della realizzazione:

- al taglio dei trefoli;

hypotheses postulated to explain it, and to determine any future repercussions it may have on the function of the viaduct.

2. Description of the phenomenon

The chronology of construction of the viaduct can be summarised as follows: on the 2003/04/15, the first beam of the viaduct was cast, while the last one was cast on 2004/07/03. For each beam, pre-compression was applied 24 hours before the end of casting. In December 2004, the odd and even-numbered tracks of the section of the line on the viaduct were laid; these were completed and definitively compacted and levelled in January 2005.

As briefly mentioned in the introduction, transit of the 'Archimedes' measurement train over the viaduct, which occurred on 2006/04/04, highlighted a particular progression of the longitudinal level of the rails on the deck, with a cyclic

deformation of approximately 2÷5 millimetres over roughly 25 metres, the length of the span. Furthermore, this tendency was confirmed by an absolute topographic levelling of the rails subsequently carried out (fig. 3).

In particular, downward-sloping curves were revealed in the deck over the piers and peaks at the centres of the 25.00 m spans, with displacement values between depression and peak varying between 2 mm and 5 mm (mean 3÷4 mm).

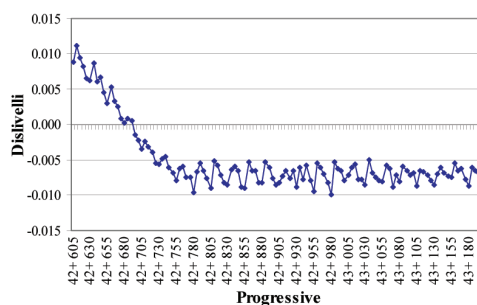


Fig. 3 – Livellazione assoluta del binario pari del viadotto Santhià effettuata nell'aprile 2006; in ordinata i dislivelli riscontrati, in m. Absolute rails' levelling of Santhià viaduct carried out in April 2006; the y axis shows the differences in level found in m.

3. Theoretical analysis

An analytical evaluation of the hypothesis postulated to explain the phenomenon which emerged during measurement on the viaduct was then performed, starting from the data regarding casting and curing of the concrete beams, through definition of the creep curves according to two different hypotheses.

3.1. Tensional states and deformation

The stresses in the upper and lower parts of significant sections of the deck at the following phases in their realisation were taken from the project documentation:

- upon pre-stressing strand cutting;
- upon stress drop in the strands, in the presence or ab-

- a cadute di tensione avvenute nei trefoli, considerando o meno il completo sviluppo delle perdite per viscosità. Infatti, accanto alle perdite di tensione istantanee nei trefoli, esistono perdite di tensione differite nel tempo che si completano solo a tempo infinito; non avendo la possibilità di valutare quanta parte di tali perdite si siano sviluppate fino all'istante di tempo preso in considerazione nella presente analisi (passaggio del treno di misura), si sono considerati i due casi di perdite per fluage avvenute completamente o non avvenute affatto: il caso reale si attesta tra i due casi estremi descritti;
- all'applicazione dei carichi permanenti portati.

Di seguito si riportano gli stati di tensione (di compressione) e di deformazione elastica del monocassone, al lembo superiore e inferiore lungo tutto lo sviluppo della trave, cumulativi degli effetti dei carichi esterni e degli stati coattivi interni relativi alle tre fasi sopra descritte (figg. 4 e 5).

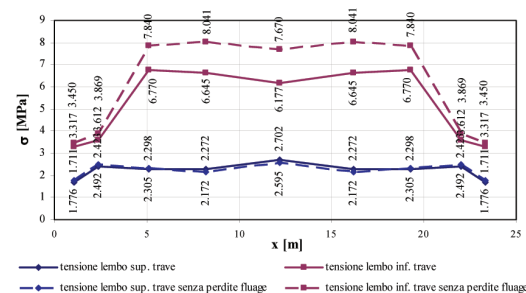


Fig. 4 – Stati tensionali del monocassone al lembo superiore (σ_s) e inferiore (σ_i) a valle dell'applicazione dei carichi permanenti portati. *Compression stress in the upper part (σ_s) and lower part (σ_i) of a single beam after application of the permanent loads.*

3.2. Curve di viscosità

Come noto, la viscosità è un fenomeno reologico che interessa il calcestruzzo armato consistente, essenzialmente, nella amplificazione nel tempo di uno stato di deformazione elastica iniziale, amplificazione che si sviluppa senza variazioni dello stato tensionale all'interno del corpo elastico.

La rappresentazione schematica di tale fenomeno per il caso in esame è riportata in fig. 6: nella fase 0 viene rappresentata la deformata globale elastica del monocassone al taglio dei trefoli, dovuta all'azione combinata del peso proprio e della precompressione (in tratteggio la situazione indeformata prima del taglio dei trefoli); nella fase 1 viene mostrato l'abbassamento elastico del monocassone all'atto della posa e della regolazione dell'armamento (in tratteggio la deformata elastica di fase 0); nella fase 2 viene mostrato l'effetto della viscosità sul monocassone e sull'armamento soprastante al passaggio del treno Archimede (in tratteggio la deformata elastica

sence of complete development of tension loss due to creep. In fact, in addition to the instantaneous stress drop in the strands, there are other tension losses over time, which are completed only at infinite time. Not having the possibility to evaluate how much of these losses had developed before the moment in time considered in the present analysis (transit of measurement train), two cases: total creep and no creep, were considered: the real case falls between the two extremes described;

- upon application of the permanent loads carried.

The stress (from compression) and elastic deformation for a single beam are considered below, at the upper and lower parts along the entire beam, combining the effects of the external loads and internal coactive states relative to the three stages described above (figg. 4 and 5).

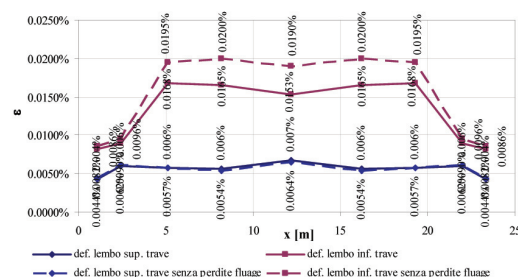


Fig. 5 – Stati deformazione del monocassone al lembo superiore (ϵ_s) e inferiore (ϵ_i) a valle dell'applicazione dei carichi permanenti portati. *Deformation states in the beam at the upper (ϵ_s) and lower (ϵ_i) parts after application of the permanent loads.*

3.2. Creep curves

Creep is a rheological phenomenon which affects the concrete and consists, essentially, of the amplification over time of an initial state of elastic deformation; this occurs without variation in the stress of the elastic body.

The schematic representation of the phenomenon in the case examined is showed in fig. 6: in phase 0, the global elastic deformation of the beam upon strand cutting, due to the combined action of self weight and pre-stress, is depicted (the dotted lines show the undeformed situation before strand cutting); in phase 1, the elastic lowering of the hollow beam upon laying and regulation of the track is depicted (the dotted lines show the elastic deformation in phase 0); in phase 2, the effect of creep on the hollow beam and the track upon transit of the Archimedes train is shown (the dotted lines represent the elastic deformation of phase 1), which consists of an increase in the elastic displacement with respect to phase 1.

The progressive development of this phenomenon can

di fase 1), che consiste in un incremento dello spostamento elastico di fase 1.

Lo sviluppo progressivo di tale fenomeno è rappresentato da formule matematiche, dette curve di viscosità, che descrivono la variazione del coefficiente di viscosità in funzione del tempo.

La determinazione delle curve di viscosità è stata eseguita sia secondo le espressioni fornite dall'Eurocodice 2 [1] che secondo quelle fornite dal Model Code 90 [2].

La funzione viscosità è data dalla relazione

$$J(t, t_0) = 1/E_c(t_0) + \phi(t, t_0)/E_{c28} \quad (1)$$

dove:

t_0 è l'età del calcestruzzo alla messa in carico iniziale;

t è l'età considerata;

$J(t, t_0)$ è la funzione viscosità al tempo t ;

$E_c(t_0)$ è il modulo di elasticità tangente al tempo t_0 ;

E_{c28} è il modulo di elasticità tangente a 28 giorni;

$\phi(t, t_0)$ è il coefficiente di viscosità riferito alla deformazione elastica a 28 giorni riferita a E_{c28} , che può essere calcolato con la formula:

$$\phi(t, t_0) = \phi_o \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (2)$$

dove, secondo l'EC2:

$\phi_o = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$ è il coefficiente nominale di viscosità, essendo:

$\phi_{RH} = [1 + \alpha_1 \cdot (1 - RH/100)/(0.1 \cdot h_0^{1/3})] \cdot \alpha_2$ il fattore che tiene conto dell'effetto dell'umidità relativa sul coefficiente nominale di viscosità con:

$h_0 = 2A_c/u$ è la dimensione fittizia dell'elemento, in millimetri, essendo A_c la sezione e u il perimetro dell'elemento a contatto con l'atmosfera;

RH è l'umidità ambientale relativa, in percento;

$\alpha_1 = (35/f_{cm})^{0.7}$ e $\alpha_2 = (35/f_{cm})^{0.2}$ sono coefficienti per considerare l'influenza della resistenza, dove f_{cm} è la resistenza media a compressione del cls a 28 giorni, in MPa;

$\beta(f_{cm}) = 16.8/(f_{cm})^{0.5}$ il fattore che tiene conto dell'effetto della resistenza del calcestruzzo sul coefficiente nominale di viscosità;

$\beta(t_0) = 1/(0.1 + t_0^{0.2})$ il fattore che tiene conto dell'effetto dell'età del calcestruzzo al momento del carico sul coefficiente nominale di viscosità;

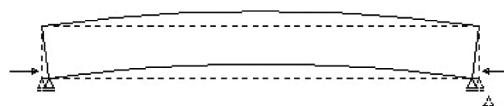
$\beta_c(t - t_0) = [(t - t_0)/(\beta_H + t - t_0)]^{0.3}$ è il coefficiente per lo sviluppo della viscosità nel tempo, dove:

$t - t_0$ è la durata del carico, in giorni;

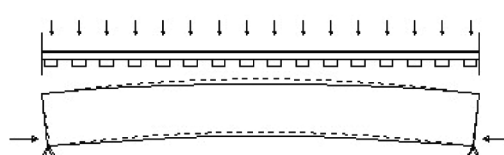
$\beta_H = 1.5[1 + (0.012RH)^{18}]h_0 + 250 < 1500$ è un coefficiente funzione dell'umidità relativa RH e della dimensione fittizia h_0 .

Secondo il Model Code 90, con analoga simbologia:

Fase 0 - Produzione Phase 0 - Production



Fase 1 - Regolazione binario Phase 1 - Track regulation



Fase 2 - Passaggio treno Archimede Phase 2 - Archimedes train transit

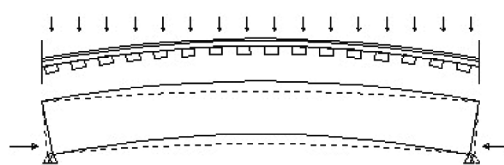


Fig. 6 – Rappresentazione schematica degli spostamenti dell'impalcato corrispondenti alle fasi di produzione, regolazione del binario e passaggio del treno Archimede. Schematic representation of deck displacements corresponding to production, regulation of track, and transit of Archimedes train.

be represented by mathematical formulae, called creep curves, which describe variation of the creep coefficient over time.

A determination of the creep curves was carried out according to both the expressions provided for by Eurocode (EC) 2 [1] and according to those provided for by Model Code (MC) 90 [2].

The creep function is given by the relationship:

$$J(t, t_0) = 1/E_c(t_0) + \phi(t, t_0)/E_{c28} \quad (1)$$

where:

t_0 is the age of the concrete upon initial loading;

t is the age considered;

$J(t, t_0)$ is the creep function at time t ;

$E_c(t_0)$ is the tangent modulus of elasticity at time t_0 ;

E_{c28} is the tangent modulus of elasticity at 28 days;

$\phi(t, t_0)$ is creep's coefficient of corresponding to the elastic deformation at 28 days, corresponding to E_{c28} , and can be calculated using the formula:

$$\phi_{RH} = 1 + (1-RH/100)/[0.46 \cdot (h/100)^{1/3}]$$

con:

$h = 2A_c/u$ è la dimensione fittizia dell'elemento, in millimetri, essendo A_c la sezione e u il perimetro dell'elemento a contatto con l'atmosfera;

RH è l'umidità ambientale relativa, in percento;

$$\beta(f_{cm}) = 5.3/(f_{cm}/10)^{0.5};$$

$$\beta(t_0) = 1/(0.1+t_0^{0.2});$$

$$\beta_c(t-t_0) = [(t-t_0)/(\beta_H+t-t_0)]^{0.3};$$

dove:

$t-t_0$ è la durata del carico, in giorni;

$$\beta_H = 150[1+(1.2RH/100)^{18}]h/100+250 < 1500.$$

Per quanto riguarda l'umidità relativa, le analisi sono state condotte sia nel caso di RH = 75% che nel caso di RH = 55%; l'analisi è stata poi focalizzata sulla prima condizione in quanto maggiormente rappresentativa del sito di ubicazione dell'opera, caratterizzato da una pianura alluvionale con elevati valori di umidità.

Relativamente all'intervallo di tempo trascorso dalla produzione dei monocassoni al passaggio del treno di misura Archimede sono stati distinti due casi, per tener conto della distanza temporale tra la produzione del primo e dell'ultimo monocassone costituente il viadotto (tabella 1).

TABELLA 1
CRONOLOGIA DI REALIZZAZIONE DEL VIADOTTO SANTHIA
- CHRONOLOGY OF SANTHIA VIADUCT CONSTRUCTION

		Primo monocassone prodotto (trave più matura) <i>First beam produced (most mature beam)</i>	Ultimo monocassone prodotto (trave meno matura) <i>Last beam produced (least mature beam)</i>
	Fase - Phase	Data - Date	Data - Date
0	Produzione <i>Production</i>	15/04/2003 2003/04/15	03/07/2004 2004/07/03
1	Regolazione binario <i>Track regulation</i>	Gennaio 2005 January 2005	Gennaio 2005 January 2005
2	Passaggio Archimede <i>Archimedes' transit</i>	04/04/2006 2006/04/04	04/04/2006 2006/04/04
	t_1 [g] = 1 - 0	627	182
	t_2 [g] = 2 - 0	1085	640

Di seguito si riportano le curve di viscosità definite secondo le due normative sopra citate (figg. 7 e 8).

Si sono quindi ricavate le variazioni $\Delta\phi_{12}$ dei coefficienti viscosi tra quello relativo a t_1 (intervallo, in giorni, tra la produzione e la regolazione binario), ϕ_1 , e quello relativo a t_2 (intervallo, in giorni, tra la produzione e il passaggio del treno Archimede), ϕ_2 (tabella 2).

$$\phi(t, t_0) = \phi_o \cdot \beta_c(t-t_0) \quad (2)$$

where, according to EC 2:

$\phi_o = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$ is the nominal coefficient of creep,

$\phi_{RH} = [1 + \alpha_1 \cdot (1-RH/100)/(0.1 \cdot h_0^{1/3})] \cdot \alpha_2$ being the factor which takes into account the effect of the relative humidity on the nominal coefficient of creep, with:

$h_0 = 2A_c/u$ is the fictitious size of the element, in millimetres, A_c being the section and u the perimeter of the element in contact with the atmosphere;
RH is the relative environmental humidity, in percent;

$\alpha_1 = (35/f_{cm})^{0.7}$ e $\alpha_2 = (35/f_{cm})^{0.2}$ are coefficients which consider the influence of resistance, where f_{cm} is the mean resistance to compression of the concrete at 28 days in MPa;

$\beta(f_{cm}) = 16.8/(f_{cm})^{0.5}$ is the factor which takes into account the effect of the concrete resistance on the nominal coefficient of creep;

$\beta(t_0) = 1/(0.1+t_0^{0.2})$ is the factor which relates to the influence of the age of the concrete at the time of loading on the nominal coefficient of creep;

$\beta_c(t-t_0) = [(t-t_0)/(\beta_H+t-t_0)]^{0.3}$ is the coefficient for the development of creep over time, where:

$t-t_0$ is the duration of load, in days;

$\beta_H = 1.5[1+(0.012RH)^{18}]h_0+250 < 1500$ is a coefficient function of the relative humidity RH and of the fictitious dimension h_0 .

According to the Model Code 90, with analogous symbolism:

$$\phi_{RH} = 1 + (1-RH/100)/[0.46 \cdot (h/100)^{1/3}],$$

with:

$h = 2A_c/u$ being the fictitious size of the element in millimetres, A_c being the section and u the perimeter of the element in contact with the atmosphere;

RH is the relative environmental humidity, in %;

$$\beta(f_{cm}) = 5.3/(f_{cm}/10)^{0.5};$$

$$\beta(t_0) = 1/(0.1+t_0^{0.2});$$

$$\beta_c(t-t_0) = [(t-t_0)/(\beta_H+t-t_0)]^{0.3};$$

where:

$t-t_0$ is the duration of the load in days;

$$\beta_H = 150[1+(1.2RH/100)^{18}]h/100+250 < 1500.$$

As far as relative humidity is concerned, the analyses were carried out at RH = 75% and at RH = 55%; the analysis was then focussed on the first condition that better represented the construction site, which is characterised by an alluvial plane with high humidity values.

Regarding the interval of time between the beams construction and the transit of the measurement train

TABELLA 2

COEFFICIENTI DI VISCOSITÀ PER IL PRIMO E L'ULTIMO MONOCASSONE PRODOTTI, PER ENTRAMBE LE NORMATIVE CONSIDERATE – CREEP COEFFICIENTS FOR THE FIRST AND LAST BEAMS PRODUCED, FOR BOTH REGULATIONS CONSIDERED

Normativa Rule		Primo monocassone prodotto (trave più matura) First beam produced (most mature beam)	Ultimo monocassone prodotto (trave meno matura) Last beam produced (least mature beam)
EC2	$\Delta\phi_{12} = \phi_2 - \phi_1$	0.189	0.476
Model Code 90	$\Delta\phi_{12} = \phi_2 - \phi_1$	0.224	0.559

La deformazione viscosa è stata valutata a partire dalla deformazione elastica, della quale è stato considerato solo il contributo flessionale:

$$\Delta\epsilon_c(t, t_0) = \epsilon_e \Delta\phi \quad (3)$$

A partire dalle variazioni di deformazioni viscosi è stata determinata la curvatura mediante l'espressione:

$$\rho = \frac{\Delta\epsilon_{s,v} - \Delta\epsilon_{i,v}}{h} \quad (4)$$

Integrando la curvatura sulla lunghezza della trave si sono ricavate le rotazioni e, quindi, gli spostamenti. Di seguito si riportano i diagrammi degli spostamenti ottenuti per le due tipologie di travi analizzate (figg. 9 e 10).

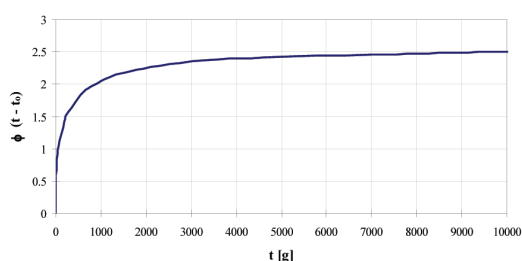


Fig. 7 – Coefficiente di viscosità valutato mediante EC2. Coefficient of creep evaluated according to EC2.

“Archimedes”, two cases were considered in order to take into account the time between the production of the first and the last girder constituting the viaduct (table 1).

The creep curves defined according to the above-mentioned two regulations are reported below (fig. 7 and 8).

Thus, the variations $\Delta\phi_{12}$ of the creep's coefficients between the relative one at t_1 (interval, in days, between beam production and track regulation), ϕ_1 , and that of t_2 (interval, in days, between beam production and Archimedes train transit), ϕ_2 (table 2):

The creep's deformation was evaluated, starting from the elastic definition, of which only the flexional contribution was considered:

$$\Delta\epsilon_c(t, t_0) = \epsilon_e \Delta\phi \quad (3)$$

starting from the variation in viscous deformation, the curvature was found by the expression:

$$\rho = \frac{\Delta\epsilon_{s,v} - \Delta\epsilon_{i,v}}{h} \quad (4)$$

Integrating the curve along the length of the beam, the rotations, and therefore the displacements, were calculated. The displacement's diagram obtained for the two types of beams analysed are showed below (fig. 9 and 10).

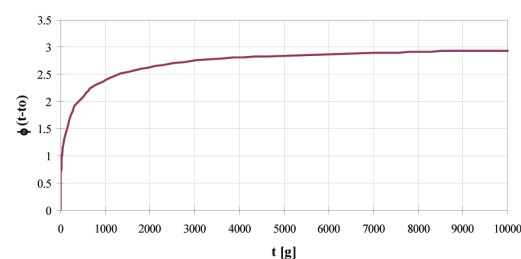


Fig. 8 – Coefficiente di viscosità valutato mediante MC90. Coefficient of creep evaluated according to MC90.

4. Risultati

I risultati sono stati raccolti nella seguente tabella riassuntiva (tabella 3).

Si può osservare che le controfrecce in mezzera, ricavate secondo un'analisi puramente teorica, portano a valori compresi tra 0.7 mm (trave più matura - EC2 - RH = 75%) a 2.6 mm (trave meno matura - MC90 - RH = 55%), nel caso di perdite di tensione per fluage nel cls non avvenute; la media di tali valori rappresenta circa il 50% della media di quelli misurati dal treno Archimede, variabili tra 1.6 mm e 5 mm.

4. Results

The results are summarised in the following table (table 3).

It can be observed that the vertical deflection in the beam midspan obtained from purely theoretical analysis has values between 0.7 mm (most mature beam - EC2 - RH = 75%) and 2.6 mm (least mature beam - MC90 - RH = 55%) in the case without loss of tension due to creep; the mean of these values is roughly 50% of the mean of those measured by the Archimedes train, which varied between 1.6 mm e 5 mm.

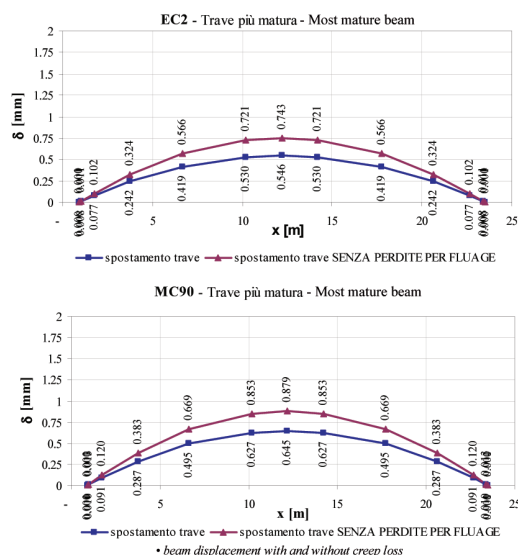


Fig. 9 – Andamento spostamento trave più matura dovuto alla viscosità sviluppata tra regolazione binario e passaggio Archimede secondo EC2 e secondo MC90. *Diagram of displacement in the most mature beam due to the creep developed between track regulation and Archimedes transit according to EC2 and MC90.*

Tali differenze si possono far risalire principalmente a tre cause:

- la prima è relativa alle curve di viscosità adottate, che non sono adatte a simulare la maturazione forzata del calcestruzzo (a vapore);
- la seconda è relativa al valore di modulo elastico adottato, che è un valore teorico quasi sempre diverso da quello misurabile sperimentalmente;
- la terza è dovuta al fatto che nella valutazione dello stato tensionale del monocassone è stato considerato il carico permanente portato, applicato contemporaneamente al peso proprio e alla precompressione, mentre nella realtà la posa della massicciata sull'impalcato è avvenuta in un istante temporale successivo.

Delle prime due cause elencate non è possibile fornire una stima quantitativa, mentre per la valutazione degli effetti della terza causa si è proceduto al calcolo del coefficiente di viscosità da applicare alle deformazioni prodotte dal solo ballast (vedi paragrafo 4.1).

Inoltre si è osservato che, riportando l'istante del passaggio del treno di misura sulle curve di viscosità, il fenomeno viscoso sembra non essersi esaurito. Si riporta come esempio la curva relativa al Model Code 90 (fig. 11).

Si è quindi provveduto a fare una stima dello spostamento che si potrebbe ancora verificare per effetto di quel fluage ancora non sviluppato, per valutare a quale percentuale del totale si trova quello calcolato (tabella 4).

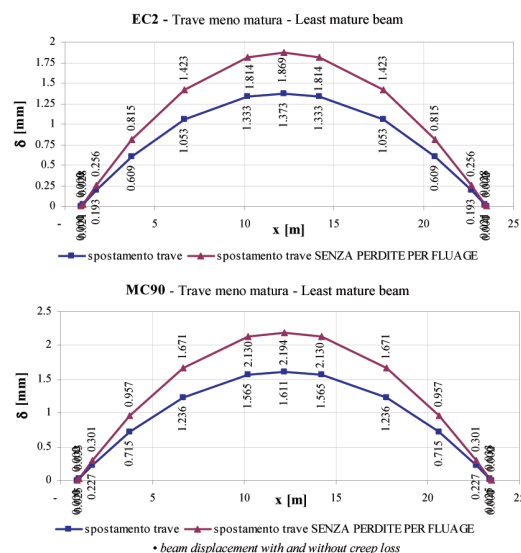


Fig. 10 – Andamento spostamento trave meno matura dovuto alla viscosità sviluppata tra posa binario e passaggio Archimede secondo EC2 e secondo MC90. *Diagram of displacement in least mature beam due to the creep developed between track regulation and Archimedes transit according to EC2 and MC90.*

These differences have three principal causes:

- the first is related to the creep curves adopted, which are not suitable for simulating forced maturation of concrete (by steam);
- the second is due to the value of the elastic modulus employed, a theoretical value which is quite different to that which can be measured experimentally;
- the third is due to the fact that in evaluation of the beam's stress, the permanent load was considered to be applied at the same time as self weight and to pre-compression, while in reality, laying ballast on the deck occurred afterwards.

It is impossible to quantify the effect of the first two causes, but in order to evaluate the effects of the third cause, calculation of the creep coefficient to apply to the deformation produced only by the ballast was carried out (see paragraph 4.1).

Furthermore, it was observed that, reporting the instant of the measurement train in the creep curves, the phenomenon seemed not to have exhausted itself, as can be seen, for example in the curve relating to the Model Code 90 (fig. 11).

It was therefore decided to estimate the potential further displacement due to creep, in order to determine which percentage of the total the calculated value represents (table 4).

Gli spostamenti calcolati in precedenza rappresentano, come si può vedere, una percentuale che va dal 31% al 45% dello spostamento atteso alla fine dello sviluppo dei fenomeni viscosi, ossia quello a tempo infinito riportato, per i vari casi analizzati, nella precedente tabella.

Considerando un valore medio pari al 38%, lo spostamento misurato, pari a $1.6 \div 5$ mm all'atto del passaggio del treno Archimede, arriverebbe, a tempo infinito, a valori pari a $4.2 \div 13.2$ mm, comunque inferiori al valore ammissibile pari a 20.8 mm (oltre il quale sarebbe obbligatorio l'abbattimento della velocità di transito dei treni per motivi di sicurezza).

I valori finali individuati per lo spostamento, comunque, sarebbero relativi a un coefficiente di viscosità a tempo infinito ben superiore ai valori massimi ipotizzabili per calcestruzzi delle caratteristiche di quello utilizzato per il monocassone in esame.

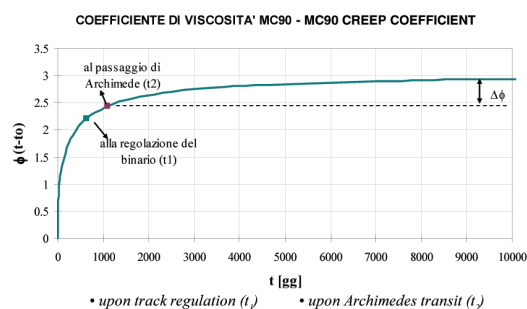


Fig. 11 – Viscosità ancora non sviluppata al passaggio del treno di misura, per la trave più matura. Undeveloped creep at Archimedes train transit in the most mature beam.

4.1. Valutazione della viscosità con applicazione differita del carico permanente della massicciata

Come già accennato, l'analisi sopra descritta è stata svolta considerando la posa dei carichi permanenti portati contemporaneamente all'applicazione del peso proprio e della precompressione.

Nella realtà le fasi di costruzione dell'opera sono state le seguenti:

- fase 1 - il cassone è prefabbricato in stabilimento;
- fase 2 - esecuzione finiture: impermeabilizzazione, massetto, canalette portacavi, massicciata e armamento.

Questo significa che è trascorso un determinato intervallo di tempo tra la fase 1 e l'applicazione del carico permanente portato di fase 2; relativamente alle deformazioni prodotte da quest'ultimo, quindi, è stata considerata una curva di viscosità diversa rispetto a quella relativa alle prime due fasi.

La posa della massicciata (fase 2) è avvenuta intorno al 01/10/2004 (t_b), quindi 535 giorni dopo la produzione, per

The previously calculated displacements represent, as can be seen in the table above, a percentage which ranges from 31% to 45% of the expected displacement after completion of development of the viscous phenomena, i.e. that at infinite time, for the various cases analysed.

Considering a mean value of 38%, the displacement measured, equal to $1.6 \div 5$ mm upon transit of the Archimedes train, would reach, at infinite time, the value of $4.2 \div 13.2$ mm, inferior to the permissible value of 20.8 mm (above which reduction in vehicle speed is obligatory for reasons of safety).

The final displacement values, however, would relate to a creep coefficient at infinite time far higher than the maximum values which can be hypothesised for concrete of the type used for the beams in question.

TABELLA 4

SPOSTAMENTI ATTESI A $t=\infty$ (CASO DI PERDITE DI TENSIONE PER FLUAGE NEL CLS COMPRESO) – EXPECTED DISPLACEMENT AT $t=\infty$ (CASE INCLUDING LOSS OF TENSION DUE TO CREEP IN THE CONCRETE)

	s_{∞} [mm] (senza perdite per fluage) s_{∞} [mm] (without loss due to creep)		s_{∞} [mm] (con perdite per fluage) s_{∞} [mm] (including loss due to creep)					
	RH = 75%		RH = 55%		RH = 75%		RH = 55%	
	EC2	MC90	EC2	MC90	EC2	MC90	EC2	MC90
Trave più matura Most mature beam	2.382	2.838	2.613	3.202	1.749	2.084	1.919	2.351
Trave meno matura Least mature beam	4.222	4.998	4.740	5.765	3.100	3.670	3.480	4.233

4.1. Evaluation of creep with application altered by permanent ballast loading

As previously mentioned, the analysis described above was carried out considering the permanent loading at the same time as the application of self weight and pre-stress.

In reality, however, the phases in construction of the structure were as follows:

- stage 1 – the beams were prefabricated in situ;
- stage 2 - finishing: waterproofing; screed, cable channel, ballast and track laying.

This means that a certain period of time elapsed between stage 1 and the application of the permanent load in stage 2; relative to deformation of the latter, therefore, a different creep curve with respect to that relative to first stage was considered.

Ballast laying (stage 2) occurred around 2004/10/01 (t_b), therefore 535 days after production of the most mature beam, and 90 days after production of the least mature beam.

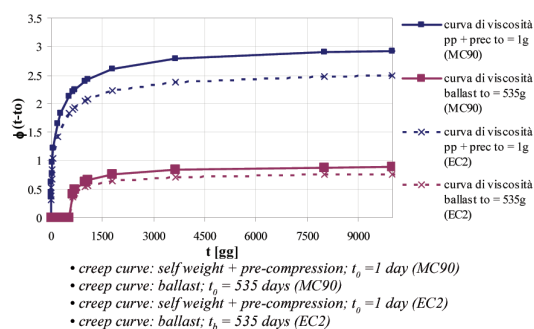


Fig. 12 – Curve di viscosità per la trave più matura valutate mediante EC2 e MC90 per t_0 = istante di applicazione di peso proprio e precompressione e per t_0 = istante di posa massicciata. Creep curves for most mature beam evaluated according to EC2 and MC90 for t_0 = instant of own weight loading and pre-compression, and t_0 = instant of ballast laying.

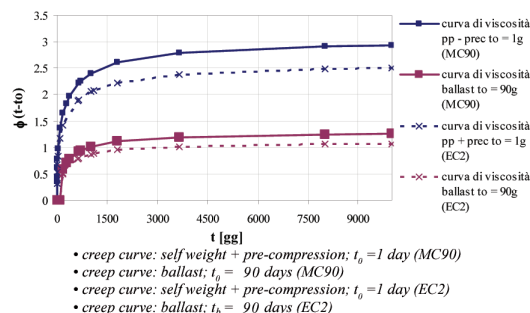


Fig. 13 – Curve di viscosità per la trave meno matura valutate mediante EC2 e MC90 per t_0 = istante di applicazione di peso proprio e precompressione e per t_0 = istante di posa massicciata. Creep curves for least mature beam evaluated according to EC2 and MC90 for t_0 = instant of self weight loading and pre-compression, and t_0 = instant of ballast laying.

il monocassone più maturo, e 90 giorni dopo la produzione, per quello meno maturo.

A seguire si sono definite le nuove curve di viscosità per il solo carico della massicciata ($t_0 = t_b$), in funzione delle due normative adottate e del tipo di monocassone; sono state riportate negli stessi diagrammi anche le curve di viscosità precedentemente definite per $t_0 = 1$ g (figg. 12 e 13).

Sono state riportate nella seguente tabella (tabella 5) le deformazioni viscosi ricavate per la trave più matura e per quella meno matura nell'ipotesi di umidità relativa del 75% e perdite per fluage del calcestruzzo comprese; quindi si è valutata la variazione prodotta rispetto al caso precedentemente trattato, che, per semplicità, viene chiamato **a** nel proseguimento dell'articolo.

Dalla tabella si può osservare un decremento delle

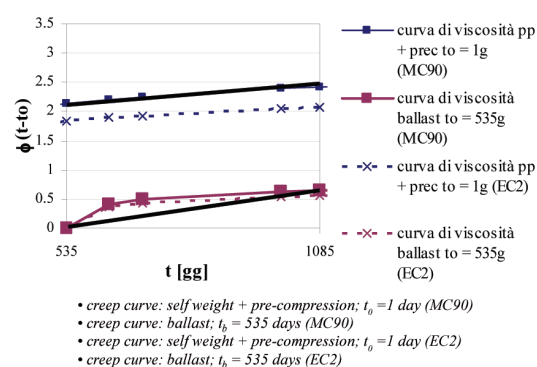


Fig. 14 – Pendenza delle curve di viscosità relative ai carichi permanenti portati e al carico della massicciata, nell'intervallo di tempo tra regolazione binario e passaggio treno di misura. Slopes of creep curves relative to permanent loads and ballast loads in the time interval between regulation of the track and transit of the measurement train.

Subsequently, the creep curves only for ballast were reported ($t_0 = t_b$), in function of the two regulations adopted and the age of beam; in the same diagrams, the creep curves previously defined for $t_0 = 1$ day are shown (fig. 12 and 13).

In the following table (table 5), the viscous deformations found for the most and least mature beams in a hypothesised relative environmental humidity of 75% and loss due to creep in the concrete included are shown; therefore the variation produced with respect to the previously discussed case was evaluated, which, in the interests of simplicity, is termed case **a** hereinafter.

From the table, a decrease in the deformations in the beam midspan of approximately 5% can be observed for the most mature beam, and an increase of roughly 42% for the least mature beam: this difference is due to the particular slope of the creep curves of the two beams at time t_1 (regulation of the track) and t_2 (measurement train transit), and the fact that the contribution of the deformation due to ballast laying assumes the opposite sign to that due to the rest of the load. In this regard, the following figure shows the slope of the two creep curves in the time interval considered.

TABELLA 5

DEFORMAZIONI VISCOSE VALUTATE SECONDO IL CASO B DESCRITTO NEL PRESENTE PARAGRAFO, RAPPORTE A QUELLE DETERMinate NEL CASO A, IN FUNZIONE DELLE DUE NORMATIVE CONSIDERATE – VISCIOUS DEFORMATIONS EVALUATED ACCORDING TO CASE B (DESCRIBED IN THIS PARAGRAPH), IN RELATION TO THOSE DETERMINED IN CASE A, IN FUNCTION OF THE TWO REGULATIONS CONSIDERED

Comprese perdite RH=75% Including loss RH=75%	Deformazioni viscosi caso b Viscous deformations in case b			
	Trave più matura Most mature beam		Trave meno matura Least mature beam	
	EC2	MC90	EC2	MC90
$\frac{\epsilon_v(b) - \epsilon_v(a)}{\epsilon_v(a)}$	-5.94%	-4.87%	+42.30%	+42.44%

TABELLA 6

QUADRO RIASSUNTIVO DEGLI SPOSTAMENTI CALCOLATI PER LE TIPOLOGIE DI TRAVI ANALIZZATE (CASO B) – SUMMARY OF DISPLACEMENTS CALCULATED FOR THE BEAMS ANALYSED (CASE B)

		Trave più matura Most mature beam		Trave meno matura Least mature beam	
		EC 2	MC90	EC 2	MC90
		$t_0 = 1 \text{ day}$	$t_0 = 1 \text{ day}$	$t_0 = 1 \text{ day}$	$t_0 = 1 \text{ day}$
RH = 75%	Caso a – RH = 75%	0.546	0.646	1.373	1.611
	Case a – RH = 75%				
	Caso b – RH = 75%	0.521	0.622	1.814	2.131
	Case b – RH = 75%				
Variazione percentuale Percentage variation		-4.51%	-3.70%	+32.12%	+32.25%

deformazioni in mezzera di circa il 5% per quel che concerne la trave più matura e un incremento di circa il 42% relativamente alla trave meno matura: tale differenza discende dalla particolare pendenza che presentano le curve di viscosità delle due travi nell'intervallo t_1 (data di regolazione binari) e t_2 (data del passaggio del treno di misura), e dal fatto che il contributo alle deformazioni dovuto alla posa della massicciata assume segno opposto a quello dovuto ai restanti carichi. Si riporta, a tale proposito, la fig. 14, in cui si è evidenziata la pendenza delle due curve di viscosità nell'intervallo di tempo considerato.

Si sono quindi ricavate le curvature della trave, nei vari casi esaminati, e da queste, integrando due volte, gli spostamenti che vengono riportati nella tabella 6 insieme a quelli già definiti per il caso **a** nella tabella 3.

Si è osservato che le controfreccie in mezzera, ricavate secondo un'analisi puramente teorica, portano nel caso **b** a valori compresi tra 0.521 mm (trave più matura - EC2 - RH = 75%) a 2.131 mm (trave meno matura - MC90 - RH = 75%), nel caso di perdite di tensione per fluage nel cls avvenute. Nel caso **b** si ha quindi un incremento dello spostamento calcolato al massimo pari al 32% di quello valutato nel caso **a** nelle stesse condizioni. Dal momento che, relativamente al caso **a**, nelle condizioni peggiori gli spostamenti massimi calcolati in media raggiungevano il 50% dei valori medi misurati dal treno Archimede, nel caso **b**, nelle stesse condizioni di umidità relativa e di tensioni, si arriverebbe a valori pari a circa il 65% di quelli misurati.

5. Verifiche

5.1. Condizioni di sicurezza dell'impalcato

Le ipotesi di viscosità fatte dal Progettista nel progetto dell'impalcato prevedevano atmosfera umida con un tempo t_0 di applicazione del carico pari a 1g e una classe di consistenza del calcestruzzo pari a S3. Il coefficiente di viscosità a tempo infinito definito è pari a:

$$\phi_{\text{visc},h} = 2.81 \quad (5)$$

valore molto simile a quelli teorici ricavati nel presente studio (coefficienti variabili tra 2.498 e 2.929 utilizzati nei calcoli con EC2 e MC90 (RH = 75%) fin qui descritti).

The curvatures of the beams were determined for each examined case, and from these, integrating the displacements reported in table 6 with those already defined for case **a** in table 3.

It can be seen that the displacement in the beam midspan derived from a purely theoretical analysis in case **b** gives values of between 0.521 mm (most mature beam - EC2 - RH = 75%) and 2.131 mm (least mature beam - MC90 - RH = 75%) in the case of loss of tension due to creep which occurred in the concrete. In case **b**, therefore, there was a maximum increase in displacement equal to 32% of that in case **a** under the same conditions. As, with respect to case **a** the maximum displacement under the worst conditions reached, on average, 50% of the values measured by Archimedes, in case **b**, under the same relative humidity and tension conditions, reached values of circa 65% of those measured would be reached.

5. Verification

5.1. Safety conditions of the deck

The hypothetical creep foreseen during the design of the deck was calculated taking into account humid conditions, a time to application of the load of 1 day, concrete consistency class of S3. The coefficient of creep at infinite time is equal to:

$$\phi_{\text{visc},h} = 2.81 \quad (5)$$

a very similar value to the theoretical values calculated in the present study (coefficients between 2.498 and 2.929 with EC2 and MC90 [RH = 75%] here described). On the other hand, it is not possible to determine the real coefficient of creep, and, furthermore, it is not deemed possible to attribute the displacement measured to very different values to this coefficient with respect to those obtained analytically.

The differences found between the theoretical $\phi_{1,2}$ at infinite time and the real time $\phi_{1,2}$ are probably not ascribable to an absolute increment in the creep components, but to a different evolution of the creep curves in the time interval under examination.

However, even imposing, to favour safety, a coefficient of creep at infinite time equal to:

$$\phi_{\text{visc},h} = 4 \quad (6)$$

far greater than that which can be hypothesised for the type of concrete used to construct the beams in question, compression of the midspan section would be entirely maintained under active conditions ($\sigma_{c, \text{intr}} = 0.01 \text{ MPa}$), a condition imposed by railway regulations [3].

5.2. Safety conditions of the train in transit

The value of the real maximum displacement expected at infinite time, 13.2 mm (paragraph. 4), was compared

D'altro canto non è dato sapere il valore reale del coefficiente di viscosità, e comunque non si ritiene possibile imputare gli spostamenti misurati a valori molto diversi di tale coefficiente rispetto a quelli ricavati analiticamente.

Le differenze riscontrate tra il $\phi_{1,2}$ teorico a tempo infinito e il $\phi_{1,2}$ reale sono probabilmente ascrivibili non a un incremento assoluto delle componenti viscosi $\phi(h, t_0)$, ma a una diversa evoluzione delle curve di viscosità nell'intervallo di tempo in esame.

Comunque anche imponendo, in favore di sicurezza, un coefficiente viscoso a tempo infinito anche pari a:

$$\phi_{\text{visc},h} = 4 \quad (6)$$

molto maggiore di quello ipotizzabile per calcestruzzi delle caratteristiche di quello utilizzato per il monocassone in esame, si otterrebbe comunque il mantenimento della sezione di mezzeraia interamente compressa in condizioni di esercizio ($\sigma_{c,\text{intr}} = 0.01$ MPa), condizione imposta dalla normativa ferroviaria [3].

5.2. Condizioni di sicurezza di marcia dei convogli ferroviari

Il valore dello spostamento reale massimo atteso a tempo infinito, pari a 13.2 mm (par. 4), è stato confrontato con quelli previsti dall'Eurocodice [4]. Tale documento considera i seguenti 3 livelli di difettosità del binario:

- **Safety Limit (SL):** si riferisce al valore che, se superato, richiede riduzioni immediate della velocità di transito dei treni o la chiusura della linea fino alla riparazione del difetto;
- **Intervention Limit (IL):** si riferisce al valore che, se superato, richiede misure correttive affinché non venga raggiunto il livello di sicurezza prima della successiva ispezione;
- **Alert Limit (AL):** si riferisce al valore che, se superato, richiede che le condizioni geometriche del binario siano analizzate e considerate nelle regolari operazioni di manutenzione del binario.

TABELLA 7

LIVELLO LONGITUDINALE - SL - DIFETTI ISOLATI - DAL VALOR MEDIO OTTENUTO DAL RILIEVO DEL BINARIO AL VALORE DI PICCO (P.T.O 8.3 prEN 13848-5.9) - LONGITUDINAL LEVEL - SL - ISOLATED DEFECTS - FROM THE MEAN VALUE OBTAINED BY RAIL EVALUATION TO THE PEAK VALUE (prEN 13848-5.9 POINT 8.3)

Velocità Speed	Dominio della lunghezza d'onda [mm] Wavelength domain [mm]	
km/h	D1 (3 < λ <= 25 m)	D2 (25 < λ <= 70 m)
V <= 80	29	n/a
80 < V <= 120	26	n/a
120 < V <= 160	24	n/a
160 < V <= 220	20	33
220 < V <= 300	17	28

with those provided by the Eurocode [4]. This document considers the following three levels of rail defects:

- The Safety Limit (**SL**): the value which, if exceeded, needs immediate reduction in train transit speed until the defect is repaired;
- The Intervention Limit (**IL**): the value which, if exceeded, needs corrective measures to restore the safety level before the next inspection;
- The Alert Limit (**AL**): the value which, if exceeded, needs an analysis and a consideration of the geometric conditions of the rail during the normal procedures of rail maintenance.

Regarding the 3 abovementioned levels, the Eurocode provides the following tables of limits for longitudinal level (table 7, 8, and 9), considering two distinct domains in function of the wavelength of the defect.

In the case examined, with a line speed of 300 km/h and a wavelength of 25 m (the distance between the centres of the piers), the reference values are those highlighted in the three tables, i.e. 17 mm for the Safety Limit, 8-12 mm for the Intervention Limit and 6-10 mm for the Alert Limit: therefore the displacement value expected at infinite time, equal to 13.2 mm, was slightly higher than the minimal value in the field of values [$\pm 6 \rightarrow 12$; $\pm 10 \rightarrow 20$] foreseen for the Alert Level (AL), which, however, does not need any reduction in speed.

TABELLA 8

LIVELLO LONGITUDINALE - IL - DIFETTI ISOLATI - DAL VALOR MEDIO OTTENUTO DAL RILIEVO DEL BINARIO AL VALORE DI PICCO (P.T.O B.2.2 prEN 13848-5.9) - LONGITUDINAL LEVEL - IL - ISOLATED DEFECTS - FROM THE MEAN VALUE OBTAINED BY RAIL EVALUATION TO THE PEAK VALUE (prEN 13848-5.9 POINT B.2.2)

Velocità Speed	Dominio della lunghezza d'onda [mm] Wavelength domain [mm]	
km/h	D1 (3 < λ <= 25 m)	D2 (25 < λ <= 70 m)
V <= 80	16-20	n/a
80 < V <= 120	12-18	n/a
120 < V <= 160	10-17	n/a
160 < V <= 220	9-14	18-23
220 < V <= 300	8-12	16-20

TABELLA 9

LIVELLO LONGITUDINALE - AL - DIFETTI ISOLATI - DAL VALOR MEDIO OTTENUTO DAL RILIEVO DEL BINARIO AL VALORE DI PICCO (P.T.O B.3.2 prEN 13848-5.9) - LONGITUDINAL LEVEL - AL - ISOLATED DEFECTS - FROM THE MEAN VALUE OBTAINED BY RAIL EVALUATION TO THE PEAK VALUE (prEN 13848-5.9 POINT B.3.2)

Velocità Speed	Dominio della lunghezza d'onda [mm] Wavelength domain [mm]	
km/h	D1 (3 < λ <= 25 m)	D2 (25 < λ <= 70 m)
V <= 80	12-18	n/a
80 < V <= 120	10-16	n/a
120 < V <= 160	8-15	n/a
160 < V <= 220	7-12	14-20
220 < V <= 300	6-10	12-18

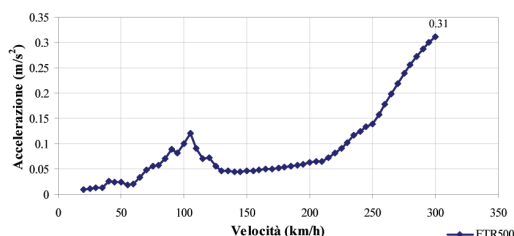


Fig. 15 – Andamento dell'accelerazione in mezzzeria al variare della velocità per il treno ETR500 a velocità 20/300 km/h. *Diagram of acceleration in the midspan with change in speed of the ETR500 train travelling at 20-300 km/h.*

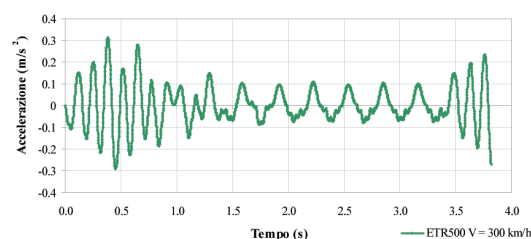


Fig. 16 – Andamento dell'accelerazione in mezzzeria al variare del tempo per il treno ETR500 a velocità 300 km/h. *Diagram of acceleration in the midspan over time for the ETR500 train travelling at a speed of 300 km/h.*

Relativamente ai 3 livelli sopracitati, l'Eurocodice fornisce le seguenti tabelle di valori limite per il livello longitudinale (tabelle 7, 8 e 9), considerando due distinti domini in funzione della lunghezza d'onda del difetto.

Nel caso in esame, per una velocità della linea di 300 km/h e per una lunghezza d'onda di 25 m (pari all'interasse pile), i valori di riferimento sono quelli selezionati nelle tre tabelle: ovvero 17 mm per il Safety Limit, 8-12 mm per l'Intervention Limit e 6-10 mm per l'Alert Limit: pertanto il valore di spostamento atteso a tempo infinito, pari a 13.2 mm, si attesta poco al di sopra del valore minimo del campo di valori $[\pm 6 \rightarrow 12; \pm 10 \rightarrow 20]$ previsti per il livello di allerta (AL), il quale, comunque, non implica alcuna riduzione della velocità della linea.

Si riporta inoltre il confronto con i limiti previsti dalla Disposizione RFI n. 27 del 28/06/2007: "Standard di qualità geometrica del binario con velocità fino a 300 km/h" [5]. Questa, per velocità comprese nell'intervallo $200 < V \leq 300$ km/h, stabilisce i seguenti valori limite L per i difetti isolati di livello longitudinale nel campo di lunghezze d'onda $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$: $L \leq 4.0 \text{ mm}$ per il 1° livello di qualità; $4.0 < L \leq 8.0 \text{ mm}$ per il 2° livello di qualità; $8.0 < L \leq 10.4 \text{ mm}$ per il 3° livello di qualità. Nel caso in esame il difetto massimo a tempo infinito, stimabile mediamente in meno di 7 mm, si attesta all'interno del range relativo al 2° livello di qualità, che consente il normale esercizio ferroviario senza alcun tipo di restrizione ma che comporta l'analisi delle cause del degrado (compiuta nello studio oggetto del presente articolo), la valutazione della velocità di evoluzione del difetto (che dovrebbe essere nulla, dal momento che il fenomeno dovrebbe essersi esaurito) in modo da programmare l'eventuale esecuzione di lavori di manutenzione della geometria del binario.

6. Comfort dei passeggeri

Quando la velocità della linea è superiore ai 220 km/h, per evitare rischi di risonanza l'Istruzione I/SC/PS-OM/2298 "Sovraccarichi per il calcolo dei ponti ferroviari – Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo" [3] stabilisce al punto 1.4.2.4 il limite dell'accelerazione verticale massima dell'impalcato a una generica velocità V:

Comparison with the limits foreseen by Italian Railway Network (RFI) disposition n. 27 on 2007/06/28: "Standards of geometric track quality for speeds of up to 300 km/h" [5]. This, for speeds between $200 < V \leq 300$ km/h, establishes the following limitation values L for the isolated longitudinal levels in the field of wavelengths $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$: $L \leq 4.0 \text{ mm}$ for the 1st level of quality; $4.0 < L \leq 8.0 \text{ mm}$ for the 2nd level of quality; and $8.0 < L \leq 10.4 \text{ mm}$ for the 3rd level of quality. In the examined case, the maximum defect at infinite time, estimable, on average, less than 7 mm, was within the range relative to the 2nd level of quality, which allows normal rail activity without any kind of restriction, but needs an analysis of the causes of the defect (carried out in the present study), an evaluation of the speed of evolution of the defect (which should be nil, as the phenomenon should be stable) in order to plan any maintenance of the track geometry.

6. Passengers' Comfort

When the speed of the train exceeds 220 km/h, in order to avoid the risk of resonance, point 1.4.2.4 of the instruction I/SC/PS-OM/2298 "Rules for the calculation of railway bridges – instructions for design, execution and testing" [3] establishes the limit of maximum vertical acceleration on the deck to a generic speed V:

$$A_{v\max} \leq 3.5 \text{ m/s}^2 \text{ in the range of frequencies between 0 and 20 Hz.}$$

In order to carry out an initial rough evaluation of the effects of the variations in deck's level in terms of vertical acceleration on the train, without taking into account the dynamic characteristics of the train itself (total dynamic runnability), the maximum acceleration produced by the transit of real trains over the deck has been determined via resonance analysis, and to this the vertical acceleration due to the irregularity of rolling surface of the deck was added, then the value obtained has been compared with the permissible value.

The resonance analysis has been performed considering the transit of the ETR500 train at variable speeds,

$A_{V \max} \leq 3.5 \text{ m/s}^2$ nel campo di frequenze tra 0 e 20 Hz

Per fare una prima valutazione approssimata degli effetti delle variazioni di livello sull'impalcato in termini di accelerazione verticale sul convoglio ferroviario, senza portare in conto le caratteristiche dinamiche del convoglio stesso (percorribilità dinamica completa), si è determinata l'accelerazione massima prodotta dal passaggio dei treni reali sull'impalcato, mediante un'analisi di risonanza, e a questa si è sommata l'accelerazione verticale dovuta all'andamento irregolare del piano di rotolamento dell'impalcato; si è confrontato, infine, il valore ottenuto con quello ammissibile.

L'analisi di risonanza è stata condotta considerando il transito del treno ETR500 a velocità variabili dalla quasi statica (20 km/h) a quella di progetto della linea in esame, pari a 300 km/h, con incrementi di velocità pari a 5 km/h. A seguire si riporta, in fig. 15, l'andamento delle accelerazioni prodotte nella mezzzeria dell'impalcato in funzione della velocità: il valore massimo si raggiunge a 300 km/h ed è pari a 0.31 m/s^2 , ed in fig. 16 l'andamento dell'accelerazione in funzione del tempo per la velocità massima di 300 km/h.

Successivamente si è valutata l'accelerazione verticale di un corpo rigido che anziché muoversi su una traiettoria rettilinea orizzontale percorra una traiettoria irregolare a causa della variazione del livello longitudinale del binario come quella evidenziata dalle misure sperimentali. Per far ciò si è approssimato il difetto del binario con una funzione armonica sinusoidale caratterizzata dalla seguente equazione:

$$y(x) = A \cos(\alpha x) \quad (7)$$

Considerando la relazione che lega lo spostamento al tempo, si ottiene la seguente espressione:

$$y(t) = -\frac{s_{\max}}{2} \cos\left(\frac{2\pi V}{L} t\right) + \frac{s_{\max}}{2} \quad \text{con } s_{\max} = 4 \text{ mm} \quad (8)$$

Sono stati così determinati spostamento $y(t)$, velocità $y'(t)$ e quindi l'accelerazione $y''(t)$ rappresentati sulla campata da 25 m (fig. 17).

L'accelerazione massima ricavata è stata pari a 0.877 m/s^2 , che, sommata a quella dell'analisi dinamica, ha fornito un'accelerazione massima pari a:

$$a_{\max} = 0.877 + 0.31 = 1.187 \text{ m/s}^2 \quad (9)$$

ben al di sotto del valore ammissibile pari a 3.5 m/s^2 , stabilito dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità – Sottosistema Infrastruttura [6].

Ripetendo le medesime calcolazioni considerando uno spostamento verticale del binario nella mezzzeria della campata a tempo infinito pari a:

$$s_h = 13.2 \text{ mm} \quad (\text{cfr. par. 4}) \quad (10)$$

Si ricava un'accelerazione massima pari a 2.89 m/s^2 e conseguentemente l'accelerazione complessiva risulta pari a:

$$a_{\max, \infty} = 2.89 + 0.31 = 3.2 \text{ m/s}^2 \quad (11)$$

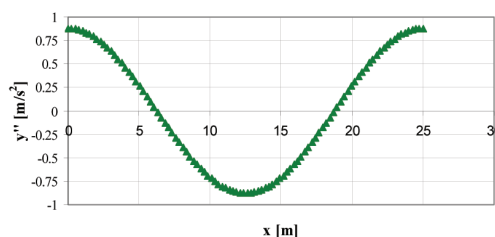


Fig. 17 – Andamento componente verticale dell'accelerazione di un corpo rigido che si muove sull'impalcato. *Diagram of vertical component of the acceleration of a rigid body moving on the deck.*

from almost stationary (20 km/h) to that projected for the line in question (300 km/h), with speed increments of 5 km/h. The acceleration produced in the midspan of the deck in function of the speed has been then reported in fig. 15: the maximum value, 0.31 m/s^2 , was reached at 300 km/h and in fig. 16 the diagram of acceleration over time for the maximum speed of 300 km/h is shown:

Subsequently, the vertical acceleration of a rigid body which, instead of moving in a horizontal straight line, moves along an irregular trajectory due to the variations in longitudinal level of the rail like that evidenced by the experimental measurements has been calculated. In order to do this, the rail defect was approximated as a sinusoidal harmonic function characterised by the following equation:

$$y(x) = A \cos(\alpha x) \quad (7)$$

Considering the relationships which link displacement with time, the following expression is obtained:

$$y(t) = -\frac{s_{\max}}{2} \cos\left(\frac{2\pi V}{L} t\right) + \frac{s_{\max}}{2} \quad \text{con } s_{\max} = 4 \text{ mm} \quad (8)$$

Thus the displacement, $y(t)$; speed, $y'(t)$, and the acceleration, $y''(t)$, have been determined and represented on the span of 25 m (fig. 17).

The maximum acceleration found is 0.877 m/s^2 , which, added to that resulting from the dynamic analysis, gives a maximum acceleration equal to:

$$a_{\max} = 0.877 + 0.31 = 1.187 \text{ m/s}^2 \quad (9)$$

far lower than the permissible value of 3.5 m/s^2 established by the Technical Specifications of Interoperability – Infrastructure Sub-systems [6].

A repetition of the same calculations considering a vertical displacement of the midspan at infinite time equal to:

$$s_h = 13.2 \text{ mm} \quad (\text{cfr. par. 4}) \quad (10)$$

yields a maximum acceleration of 2.89 m/s^2 , and consequently the total acceleration is:

$$a_{\max, \infty} = 2.89 + 0.31 = 3.2 \text{ m/s}^2 \quad (11)$$

Tale valutazione dell'accelerazione verticale, che assimila il convoglio ad un corpo rigido, è comunque molto cautelativa, in quanto non tiene conto della dinamica effettiva del convoglio. Conducendo un'analisi più attinente alla realtà, nella quale una carrozza dell'ETR500 viene simulata come un sistema sospeso a doppio stadio con sospensione e smorzamento verticale, si ricava un valore di accelerazione pari a 0.41 m/s^2 a 300 km/h , che sommato all'accelerazione ricavata dall'analisi dinamica conduce ad un valore massimo $a_{\text{max},\infty} = 0.72 \text{ m/s}^2$, molto inferiore al limite di 3.5 m/s^2 ; ripetendo la stessa analisi a 100 km/h (velocità critica per tale sistema, ma molto lontana da quella di percorrenza abituale sul viadotto) si ottiene un valore dell'accelerazione pari a 1.03 m/s^2 , che sommato all'accelerazione ricavata dall'analisi dinamica conduce ad un valore massimo $a_{\text{max},\infty} = 1.15 \text{ m/s}^2$.

7. Conclusioni

Dall'analisi eseguita sono emerse le seguenti conclusioni:

1. L'analisi condotta sulle cause del fenomeno riscontrato dal treno di misura Archimede al disopra del viadotto Santhià ha permesso di valutare la rilevanza del fenomeno viscoso, particolarmente importante per questa tipologia di impalcato completamente prefabbricato a piè d'opera. La valutazione dell'evoluzione temporale di tale spostamento fino a tempo infinito è stata effettuata basandosi sulle curve di viscosità fornite dalle più evolute normative tecniche internazionali. L'entità dello spostamento atteso a tempo infinito è stata cautelativamente amplificata in modo proporzionale al rapporto fra i valori di spostamento misurato e quello "spiegato" dalla teoria della viscosità. Il valore così ottenuto, largamente cautelativo per quanto spiegato nel testo, è stato utilizzato per effettuare le verifiche a tempo infinito, sia della sicurezza di marcia dei convogli (difettosità di livello del binario, con conseguente rischio di svio), sia in termini di comfort di marcia per il passeggero (accelerazione in cassa). Tutti i risultati di queste valutazioni sono risultati all'interno dei limiti ammissibili. Parallelamente è stato verificato che, dal punto di vista strutturale (verifiche strutturali dell'impalcato), ci fossero dei margini di sicurezza residui tali da garantire la precompressione totale nella sezione di mezzera ($\sigma_{c,\text{min}} \geq 0$) anche nell'ipotesi di un coefficiente di viscosità più grande del 40% di quello assunto in progetto (ipotesi evidentemente molto cautelativa).
2. La particolare tipologia del viadotto esaminato, un monocassone monolitico completamente prefabbricato a piè d'opera, non permette l'attenuazione degli effetti viscosi, garantita dalla presenza di una soletta di completamento, di cui beneficiano altre tipologie d'impalcato in c.a.p. adottate per viadotti ferroviari.
3. L'analisi teorica effettuata ha condotto a valori di calco-

This evaluation of the vertical acceleration, which assimilates the train as a solid body, is, however, extremely precautionary as it doesn't take into account the actual dynamics of the train.

Upon performance of a more realistic analysis, in which a carriage of the ETR500 is simulated as a two phase suspended system with vertical suspension and damping, an acceleration value of 0.41 m/s^2 is found at 300 km/h , which, added to the acceleration revealed by dynamic analysis, leads to a maximum value, $a_{\text{max},\infty}$, equal to 0.72 m/s^2 , much lower than the limit of 3.5 m/s^2 ; a repetition of the same analysis at 100 km/h (critical speed for this system but very far from the normal transit on the viaduct) yields an acceleration value of 1.03 m/s^2 , which, added to the acceleration determined by the dynamic analysis gives a maximum value $a_{\text{max},\infty} = 1.15 \text{ m/s}^2$.

7. Conclusions

The following conclusions emerged from the analysis carried out:

1. Analysis of the causes of the phenomenon encountered by the Archimedes train on the Santhià viaduct permitted evaluation of the relevance of the viscous phenomenon, which is particularly important for this type of cast-in-place deck. Evaluation of the temporal evolution of this displacement until infinite time was carried out based on creep curves provided by the most evolved international technical regulations. The entity of the expected displacement at infinite time was preventively amplified in proportion to the relationship between the displacement values measured, and the one 'explained' by creep theory. The value obtained (widely precautionary, as explained in the text), was used to carry out the verification at infinite time of both the safety of the train in transit (rail level defect, with consequent risk of diversion), and in terms of passenger comfort in transit (in carriage acceleration). All results of these evaluations were found to be within permissible limits. At the same time it was verified that, from a structural perspective (structural verification of the deck), there were residual safety margins sufficient to guarantee total pre-compression in midspan section ($\sigma_{c,\text{min}} \geq 0$) even in the hypothesis of a coefficient of creep 40% greater than that taken into account in the design (evidently an extremely precautionary hypothesis).
2. The particular typology of the viaduct examined, made of monolithic cast-in-place single box girder, does not permit an attenuation of the viscous effects, which is guaranteed by the presence of a reinforced concrete slab for completion in other types of pre-stressed reinforced concrete deck adopted for railway viaducts.
3. The theoretical analysis carried out led to a calculation of displacement values in the midspan of deck attrib-

lo dello spostamento in mezzzeria, imputabile all'effetto di deformazione viscosa, dell'ordine del 50% ÷ 65% di quelli misurati effettivamente. Lo scostamento tra valori teorici e valori misurati è probabilmente ascrivibile all'inevitabile approssimazione delle curve teoriche di fluage che tendono a rappresentare schematicamente la complessa realtà fisica; il livello di approssimazione è stato comunque ritenuto soddisfacente.

4. Il fenomeno emerso è stato sicuramente enfatizzato dalla rapidità del processo costruttivo e di posa del binario.
5. Da sottolineare, infine, che tali difettosità di livello potranno essere eliminate in qualsiasi momento, mediante una nuova livellazione del binario, livellazione di cui a oggi non si è evidenziata la necessità, essendo rispettati tutti i limiti connessi alla sicurezza e al comfort di marcia.

utable to the effect of viscous deformation of the order of 50% ÷ 65% of those actually measured. The difference between the theoretical and measured values was, in all probability, due to the inevitable approximation of the theoretical creep curves, which tend to represent, schematically, the complex physical reality; the level of approximation was, however deemed to be acceptable.

4. The phenomenon which emerged was undoubtedly amplified by the construction and track laying processes.
5. Finally, it should be noted that the level defect could be eliminated at any time by a new track levelling procedure, which has not so far been deemed necessary, as no limits relating to the safety and comfort in transit have been exceeded.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] Eurocodice EN 1992-1-1, Dicembre 2004: "Design of concrete structures: general rules and rules for buildings" e Eurocodice prEN 1992-2, Giugno 2005: "Design of concrete structures: ponti".
- [2] Model Code CEB – FIB "90.
- [3] Istruzione I/SC/PS-OM/2298, Gennaio 1997: "Sovraccarichi per il calcolo dei ponti ferroviari – Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo".
- [4] Eurocodice prEN 13848-5.9 - Railway applications - Track geometry quality - Part 5: Geometric quality assessment - Versione Agosto 2004.
- [5] Disposizione RFI n. 27 del 28/06/2007: "Standard di qualità geometrica del binario con velocità fino a 300 km/h".
- [6] "Specifiche tecniche d'interoperabilità per il sottosistema Infrastruttura del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità" STI 2008/217/CE pubblicate nella GUCE il 19.03.2008.

Sommaire

LIGNE AV/AC TURIN-NOVARA - VIADUC SANTHIÀ: ÉVALUATION DES EFFETS DE LA VISCOSITÉ DU BÉTON DE LA STRUCTURE PORTEUSE

Le viaduc Santhià, sur la ligne ferroviaire AV/AC Turin-Venise, situé plus précisément dans la partie entre Turin et Novara et en fonction depuis le Février 2006, est construit par des ouvertures de 25 et 20,5 m, tout simplement posé sur les piles pour une longueur totale de 3783m; la structure porteuse est réalisée grâce à un caisson et une seule coulée de béton. Les mesures de la régularité du rail effectuées ont mis en évidence une allure particulière du niveau longitudinale sur le viaduc, avec des cuspides sur les piles et des sommets au milieu des segments composants le pont. Le phénomène a été attribué au fait que le temps de maturation du béton avant le réglage de l'armement ont été tellement réduit qu'une partie de la déformation visqueuse de la structure porteuse, relativement à la pré-compression et au poids propre, est venue lors que l'armement était encore posée. Dans le mémoire on décrit ce phénomène et l'on rend une évaluation analytique de cette hypothèse grâce à la définition des courbes de viscosité selon les normes techniques internationales les plus évoluées. On conclut en menant des évaluations sur des éventuelles conséquences futures à l'usage de l'oeuvre.

Inhaltsübersicht

NBS TURIN-NOVARA VIADUKT SANTHIÀ – BEWERTUNG DER VISKOSITÄTSFOLGERUNGEN DES GERÜSTSBETONS.

Dieser Viadukt, seit Februar 2006 im Betrieb, besteht aus Träger von 25 oder 20,50 m Stützweite. Die Träger sind auf Brückenpfeiler gelagert und die gesamte Länge ist 3873 m. Der Baugerüst hat einen Kastenquerschnitt, dessen Struktur mit einem einzigen Betonguss realisiert worden wurde.

Geometrische Oberbaumessungen haben einen besonderen Verlauf des Gleishohenlage vorgestellt, die von Spitzen über Brückenpfeiler und Höhepunkten in mitten der Stützweiten gekennzeichnet wurde. Das Phänomen wurde den zu kurzen Zeitintervall zwischen den Gerüstguss und die Oberbaunivellierung zugeschrieben, d.h. mindestens ein Teil der von Tragvorspannungen erzeugten Formänderungen Während dieser Intervallen stattfand. Dieses Problem wird hier erörtert und eine analytische Berechnung, nach den modernsten internationalen Normen über den Betonviskositätskurven, geführt wird. Es werden auch Überlegungen über die zukünftlichen Betriebsfolgerungen erwägt.