



# AUTOSTRADA REGIONALE CISPADANA DAL CASELLO DI REGGIOLO-ROLO SULLA A22 AL CASELLO DI FERRARA SUD SULLA A13

CODICE C.U.P. E81B08000060009

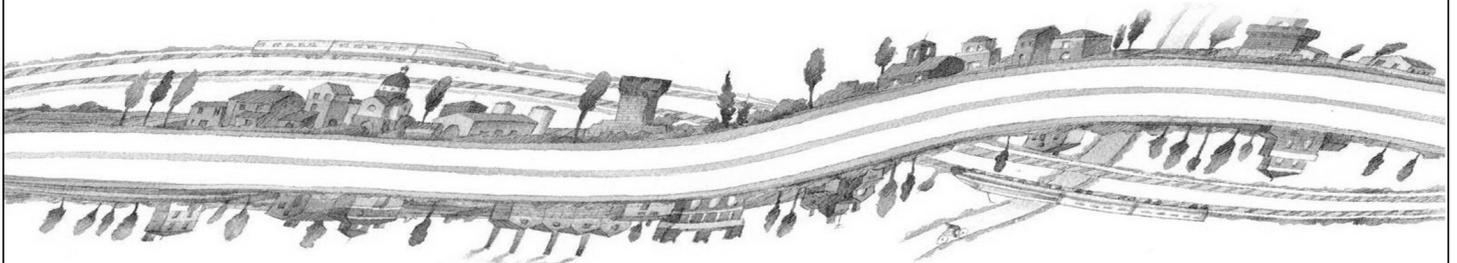
## PROGETTO DEFINITIVO

**VIABILITA' DI ADDUZIONE AL SISTEMA AUTOSTRADALE  
D04-08 (EX 1FE) RACCORDO BONDENO-CENTO-AUTOSTRADA CISPADANA  
PARTE GENERALE**

INQUADRAMENTO GENERALE DELL'INTERVENTO

CALCOLO SOVRASTRUTTURA STRADALE

RELAZIONE DI CALCOLO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI



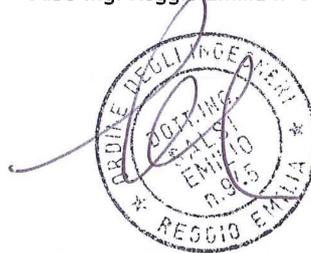
IL PROGETTISTA

Prof. Ing. Lorenzo Domenichini  
Albo Ing. Roma n° 9585

**c.s.i.a.**  
roma  
*Lorenzo Domenichini*

RESPONSABILE INTEGRAZIONE  
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Emilio Salsi  
Albo Ing. Reggio Emilia n° 945



IL CONCESSIONARIO

Autostrada Regionale  
Cispadana S.p.A.  
IL PRESIDENTE  
Graziano Pattuzzi

*Graziano Pattuzzi*

G										
F										
E										
D										
C										
B										
A	17.04.2012	EMISSIONE				Miranda	Domenichini	Salsi		
REV.	DATA	DESCRIZIONE				REDAZIONE	CONTROLLO	APPROVAZIONE		
IDENTIFICAZIONE ELABORATO										DATA: <b>MAGGIO 2012</b>
NUM. PROGR.	FASE	LOTTO	GRUPPO	CODICE OPERA WBS	TRATTO OPERA	AMBITO	TIPO ELABORATO	PROGRESSIVO	REV.	SCALA: _
5216	PD	0	D00	DCS00	0	SD	RC	01	A	

**PROGETTO DEFINITIVO DI AUTOSTRADA REGIONALE CISPADANA**  
**VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08**  
**RELAZIONE DI CALCOLO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI**

## INDICE

<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>2</b>
<b>2. CRITERI ASSUNTI NELLE VERIFICHE DELLE PRESTAZIONI DELLE PAVIMENTAZIONI .....</b>	<b>3</b>
2.1. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	3
2.2. MODELLO DI CALCOLO ADOTTATO PER LA VERIFICA NEL TEMPO DELLE PAVIMENTAZIONI: IL METODO DI ANALISI M-E PDG .....	3
2.3. DATI DI PROGETTO.....	6
2.3.1. TRAFFICO DI PROGETTO.....	6
2.3.2. PORTANZA DEL TERRENO DI SOTTOFONDO.....	8
2.3.3. CONDIZIONI CLIMATICHE.....	8
2.3.4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI DELLA PAVIMENTAZIONE PREVISTA.....	9
2.3.5. PERIODO DI ANALISI DELLA PAVIMENTAZIONE.....	10
2.3.6. AFFIDABILITÀ DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE.....	10
2.4. INDICATORI PRESTAZIONALI ASSUNTI NELLE VERIFICHE .....	10
2.4.1. INDICATORI PRESTAZIONALI .....	10
2.4.2. LIMITI DI AMMISSIBILITÀ ASSUNTI NELLE VERIFICHE.....	11
<b>3. VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE DELLA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08.....</b>	<b>13</b>
3.1. LA PAVIMENTAZIONE PREVISTA NEL PP PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08 .....	13
3.2. LA PAVIMENTAZIONE PROPOSTA NEL PD PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08.....	15
<b>4. CONCLUSIONI.....</b>	<b>19</b>

## 1. INTRODUZIONE

---

La presente relazione di calcolo è relativa al dimensionamento ed alla verifica funzionale della pavimentazione della viabilità di adduzione al sistema autostradale "Raccordo Bondeno-Cento-Autostrada Cispadana" denominata D04-08 (ex 1FE).

La viabilità di adduzione D04-08 ha una estensione molto elevata e lungo il suo tracciato attraversa realtà diverse assumendo classe funzionale e sezione differente; infatti l'intero tracciato è suddiviso in 5 tratte denominate A1, A2, B, C e D che presentano sezione di tipologia diversa: A1, A2, B e C sono classificabili come strade di Tipo C2 mentre la tratta D come strada di tipo F1.

Il progetto preliminare (PP) prevede per tutta le viabilità di adduzione D04-08 una pavimentazione di tipo semirigido con sottobase in misto cementato ad alta duttilità (MCAD-S) confezionato con bitume schiumato. Il manto di usura della viabilità di adduzione è previsto nel PP in conglomerato bituminoso a bassa emissione di rumore realizzato con argilla espansa e polverino di gomma.

## **2. CRITERI ASSUNTI NELLE VERIFICHE DELLE PRESTAZIONI DELLE PAVIMENTAZIONI**

---

### **2.1. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

---

Ai fini delle analisi e delle valutazioni sviluppate nel presente Capitolo si è fatto riferimento ai seguenti documenti:

- NCHRP "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", Ed. 2004 (Metodo M-E PDG);
- CNR B.U. 178/95 "Catalogo delle pavimentazioni stradali".

### **2.2. MODELLO DI CALCOLO ADOTTATO PER LA VERIFICA NEL TEMPO DELLE PAVIMENTAZIONI: IL METODO DI ANALISI M-E PDG**

---

Le pavimentazione prevista per la viabilità di adduzione "Raccordo Bondeno-Cento-Autostrada Cispadana" denominata per semplicità "D04-08" è stata verificata valutando le prestazioni che la sovrastruttura potrà offrire nel tempo quando soggetta alle condizioni di traffico previste in progetto e nelle condizioni climatiche della zona di sedime dell'opera utilizzando la nuova procedura di analisi basata sull'impiego di metodi di tipo "empirico-razionale" prodotta dall'NCHRP per l'AASHTO Statunitense (metodo M-E PDG). La versione del codice di calcolo adottata è la 1.1 del 31 agosto 2009.

Il metodo M-E PDG consente di passare dalla tradizionale valutazione del comportamento nel tempo della pavimentazione per mezzo di correlazioni empiriche ed indici sintetici di stato ad una valutazione del progredire nel tempo delle diverse tipologie di ammaloramento (fessurazione, deformazione permanente dei diversi strati costituenti la pavimentazione, irregolarità longitudinale) determinando poi il danno complessivo per fatica che ci si può attendere nella struttura nel corso di tutto il periodo di analisi.

Tra i principali elementi di innovazione del metodo di calcolo adottato si registrano:

- La possibilità di caratterizzare i diversi strati costituenti la pavimentazione in funzione delle reali caratteristiche compositive delle miscele;
- La possibilità di tener conto delle specifiche condizioni ambientali in cui la pavimentazione andrà ad operare (con particolare riguardo all'andamento delle temperature, delle condizioni di pioggia e di irraggiamento nel tempo);

- La possibilità di analizzare separatamente l'andamento nel tempo dei diversi tipi di degrado e di comprendere quindi ove si concentrano eventuali deficienze strutturali e di pianificare in modo ottimizzato gli interventi di manutenzione che possono essere quindi focalizzati alla risoluzione dello specifico problema rilevato (cosa non possibile quando si ragiona solo in termini di danno per fatica o di indicatori sintetici di stato);
- La possibilità di schematizzare una qualunque mix di traffico, sia essa costituita da un asse standard equivalente (di qualunque peso) o da una complessa mix di veicoli pesanti, e di tener conto degli effetti di crescita del traffico del tempo. Il modello, nel calcolare il numero di ripetizioni che transita effettivamente in un dato punto della pavimentazione, tiene inoltre conto del naturale effetto di dispersione delle traiettorie all'interno della corsia di marcia lenta;
- La possibilità di progettare tenendo conto di diversi livelli di affidabilità.

In questa fase di progetto si è fatto riferimento, per la definizione dei dati di input, al livello III previsto dal nuovo metodo di calcolo (dati di input prevalentemente tratti da letteratura o di default). I dati di input necessari per il Livello III sono riportati in Tabella 1.

**TABELLA 1 - SINTESI DEI DATI DI INPUT NECESSARI PER L'IMPIEGO DEL METODO M-E PDG AL LIVELLO III**

<b>PARAMETRO</b>	<b>SIGNIFICATO</b>
<b>Dati caratterizzanti i materiali con presenza di bitume nel legante</b>	
$p_{3/4}$	Trattenuto cumulativo al setaccio ASTM 3/4 (corrispondente ad un diametro nominale di 19.1 mm)
$p_{3/8}$	Trattenuto cumulativo al setaccio ASTM 3/8 (corrispondente ad un diametro nominale di 9.52 mm)
$p_4$	Trattenuto cumulativo al setaccio ASTM 4 (corrispondente ad un diametro nominale di 4.76 mm)
$p_{200}$	passante al setaccio ASTM 200 (corrispondente ad un diametro nominale di 0.074 mm)
Va	Volume dei vuoti residui (%)
Vb	Volume effettivo di bitume (%)
A, VTS	parametri caratterizzanti il comportamento del legante
H	spessore dello strato (cm)
<b>Dati caratterizzanti i misti cementati tradizionali</b>	
H	spessore dello strato (cm)
Ein	modulo elastico dello strato integro (MPa)
Ef	modulo elastico dello strato fessurato (MPa)
F	Resistenza a trazione per flessione (MPa)

<b>Dati caratterizzanti le fondazioni in misto granulare non legato</b>	
MAT	Tipo di materiale (secondo classificazione AASHTO/CNR-UNI 10006 o in base al tipo di materiale – di frantumazione, naturale alluvionale, da riciclaggio di conglomerato bituminoso etc)
H	spessore dello strato (cm)
E	modulo elastico dello strato (MPa)
<b>Dati caratterizzanti il sottofondo (per ciascuno strato caratterizzante il sottofondo)</b>	
MAT	Tipo di materiale (secondo classificazione AASHTO/CNR-UNI 10006 o secondo la classificazione Unified Soil Classification)
H	spessore dello strato, se non si tratta dell'ultimo (cm)
<b>Dati caratterizzanti il traffico</b>	
TGM	Traffico Giornaliero Medio di mezzi pesanti per carreggiata
CMIX	composizione della mix (% per ogni tipo di mezzo) di default o di letteratura
-	Descrizione dei mezzi che compongono la mix (percentuale di assi di un dato tipo e con un dato carico per asse) di default o di letteratura
CC	percentuale di mezzi transitanti sulla corsia più caricata
<b>Dati caratterizzanti le condizioni climatiche (per ogni ora e giorno dell'anno)</b>	
Ta	Temperatura dell'aria
V	Velocità del vento
P	Pioggia
S	% sole
U	umidità %
PF	profondità della falda dalla quota pavimentazione (in m)

Nel caso di impiego di leganti non convenzionali (come ad esempio i bitumi modificati) o di soluzioni che modificano il comportamento viscoso del materiale (siano essi additivi addensanti, schiumogeni, fibre, leganti costituiti da cemento additivato con bitumi etc.) i parametri A, VTS dovranno essere determinati a

partire dalle prove di caratterizzazione meccanica delle miscele con particolare riguardo al valore assunto dal modulo elastico della miscela alle diverse temperature.

Nella fase di studio finale delle miscele in fase costruttiva dovranno essere comunque eseguite le prove di laboratorio di Livello I (prove reologiche per la determinazione del modulo dinamico  $E^*$  a diverse temperature e con diverse condizioni di carico) al fine di consentire la caratterizzazione di dettaglio delle specifiche miscele adottate.

## 2.3. DATI DI PROGETTO

### 2.3.1. TRAFFICO DI PROGETTO

Il traffico di progetto adottato per la verifica delle pavimentazioni della viabilità di adduzione D04-08 è stato desunto dagli studi di traffico eseguiti in fase di progettazione definitiva.

Per la definizione dei valori del traffico di progetto di ciascuna tipologia di strada analizzata è stato fatto riferimento ai veicoli pesanti, denominati, in conformità con quanto detto dal Catalogo delle pavimentazioni stradali, veicoli commerciali (VC).

Per la viabilità di adduzione non si dispone dei dati di traffico disaggregati per anno come per l'asse autostradale, ma solo delle variazioni di traffico complessivamente attese tra diversi orizzonti temporali, come sintetizzato in Tabella 2.

**TABELLA 2 - PERCENTUALI DI DECREMENTO DEL TRAFFICO RISPETTO AL 2030**

<b>TIPOLOGIA DI MEZZO</b>	<b>2017 - 2030</b>	<b>2021-2030</b>	<b>&gt; 2030</b>
Veicoli commerciali (VC)	17%	8%	0.5 % annuo

Sulla base delle variazioni di traffico riportate in Tabella 2 sono stati stimati i due tassi di crescita per il periodo 2017-2021 pari a 2.61% e per il periodo 2021-2030 pari allo 0.93%.

Per effettuare la verifica della sovrastruttura si ha la necessità di considerare un unico tasso di crescita del flusso veicolare considerato costante nell'intero periodo di analisi della pavimentazione.

Il valore dell'incremento annuale costante nel tempo per tutto il periodo di analisi della sovrastruttura considerato pari a 20 anni (2017-2036) è stato ricavato uguagliando il traffico cumulato finale ottenuto con i tassi di crescita variabili a partire dal valore di TGM stimato al 2017.

Il valore del tasso di crescita medio stimato è risultato pari all'1.48%, uguale per tutte le strade appartenenti alla viabilità di adduzione.

In Tabella 3 sono riportati i valori utilizzati per la definizione dei TGM di veicoli commerciali al 2017 utilizzati per il dimensionamento della viabilità di adduzione D04-08 ed il traffico complessivo cumulato nei 20 anni di analisi (2017-2036).

**TABELLA 3 – DEFINIZIONE DEL TRAFFICO DI PROGETTO PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08**

<b>VIABILITÀ</b>	<b>TIPO DI STRADA</b>	<b>MIX DI TRAFFICO</b>	<b>TGM VC 2030 (VC/gg)</b>	<b>TGM VC 2017 (VC/gg)</b>	<b>VC CUMULATI 2017-2036</b>
D04-08 – Tratta A1, A2	C2	Tipo C – ordinaria	500	415	3.5 milioni
D04-08 – Tratta B	C2	Tipo C – ordinaria	1300	1079	9.1 milioni
D04-08 – Tratta C	C2	Tipo C – ordinaria	1100	913	7.7 milioni
D04-08 – Tratta D	F1	Tipo C – turistica	1100	913	7.7 milioni

Come si può osservare la viabilità di adduzione D04-08 Bondeno-Cento è suddivisa in 5 differenti tratte con caratteristiche geometriche, funzionali e di traffico diverse.

Per tenere conto delle differenti condizioni di carico a cui sono sottoposte le tratte della viabilità di adduzione considerata (dovute alla differente classe funzionale che la strada riveste nel suo percorso), sono state differenziate le mix di traffico di progetto per le 5 tratte.

A seconda della classe stradale considerata (C2 o F1) sono state adottate differenti mix di traffico con lo scopo di differenziare le tipologie e le percentuali di ciascuna classe di veicoli commerciali sul totale del traffico pesante in relazione alla tipologia di strada.

Il Catalogo delle Pavimentazioni Stradali del CNR (BU 178/95), adottato come riferimento per la definizione degli spettri di traffico, differenzia le extraurbane secondarie non in funzione della piattaforma (C1 o C2) ma del tipo di traffico che le interessa. Nel presente progetto è stata adottata la seguente equivalenza:

**TABELLA 4 – MIX DI TRAFFICO DA CATALOGO ADOTTATE PER LE DIVERSE VIABILITÀ DI ADDUZIONE**

<b>TIPO DI STRADA DA PROGETTO</b>	<b>MIX DI TRAFFICO DA CATALOGO PAVIMENTAZIONI</b>
C1	EXTRAURBANA SECONDARIA A FORTE TRAFFICO
C2	EXTRAURBANA SECONDARIA ORDINARIA
F1-F2	EXTRAURBANA SECONDARIA TURISTICA

Per le strade extraurbane locali (F1 ed F2), non previste dal Catalogo, si è adottato, per assimilazione, lo spettro delle strade extraurbane secondarie turistiche che rappresenta il meno gravoso tra quelli previsti dal Catalogo.

Nello specifico progetto della D04-08 sono presenti solo tratte di classe C2 ed F1.

### **2.3.2. PORTANZA DEL TERRENO DI SOTTOFONDO**

Il terreno di sottofondo costituente il sedime su cui si sviluppano le infrastrutture facenti parte della rete di viabilità circostante all'Autostrada Regionale Cispadana è costituito da materiali appartenenti, secondo la classifica delle terre del CNR 10006, ai gruppi A2-4, A4, A6, A7-5 e A7-6.

Allo scopo di riutilizzare i materiali presenti in sito per la costruzione dei corpi stradali, già in sede di PP è stato scelto di effettuare una stabilizzazione a calce ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) o a cemento.

Per la definizione del Modulo Resiliente si è fatto, mediante applicazione della teoria di Burmister, il calcolo del modulo composito del semispazio indefinito costituito da:

- Corpo del rilevato caratterizzato da  $M_r=100$  MPa, valore associabile ad uno strato omogeneo con  $M_d$  (da prova di carico su piastra) pari a 50 MPa, come previsto in Capitolato;
- Strato superficiale costituito terreno naturale trattato mediante stabilizzazione binaria calce + cemento in due strati ognuno di spessore pari a 30 cm (con un modulo elastico dello strato stabilizzato almeno pari a 400 MPa, valore cautelativo per il tipo di stabilizzazione prevista).

In queste condizioni il modulo resiliente del sottofondo caratterizzato come semispazio indefinito risulta pari a 285 MPa.

Alla luce di queste considerazioni si è ritenuto, in via cautelativa, di mantenere il valore di  $M_r = 200$  MPa assunto in PP.

### **2.3.3. CONDIZIONI CLIMATICHE**

Per la verifica della pavimentazione della viabilità di adduzione D04-08 è stata considerata una condizione climatica specifica della zona in esame. La stazione climatica assunta a riferimento è quella di Ferrara<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> I valori orari sono stati ottenuti dal sito [www.wunderground.com](http://www.wunderground.com), stazione climatica di Ferrara.

Nelle verifiche svolte con il software M-E PDG le condizioni meteo sono caratterizzate mediante i valori orari delle seguenti entità:

- Temperatura;
- Velocità del vento;
- Umidità relativa dell'aria;
- Altezza di pioggia;
- Percentuale di insolazione.

I valori richiamati sono riferiti ad un arco temporale minimo di due anni.

#### **2.3.4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI DELLA PAVIMENTAZIONE PREVISTA**

Nella Tabella 5 sono rappresentate le principali caratteristiche fisico meccaniche necessarie alla schematizzazione, nel software di calcolo utilizzato, dei materiali costituenti la stratigrafia delle pavimentazione prevista nel PD per la viabilità di adduzione D04-08.

**TABELLA 5 - PARAMETRI UTILIZZATI PER L'ANALISI CON IL METODO M-E PDG DELLE PAVIMENTAZIONI PREVISTE NEL PP PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08**

<b>PARAM.</b>	<b>USURA in CB a bassa emissione</b>	<b>BINDER in CB</b>	<b>BASE in CB</b>	<b>SOTTOBASE in MCAD</b>
$\rho_{3/4}$ [%]	0	9	31	29
$\rho_{3/8}$ [%]	18	36	53	53
$\rho_4$ [%]	43	56	63	67
$\rho_{200}$ [%]	6	6	9	7.5
Va [%]	4.5	5	5.5	5.1
Vb [%]	5.5	4.8	4	2
A	10.5254	10.6508	10.6508	8.5240
VTS	-3.5047	-3.5537	-3.5537	-2.7980

Lo strato di usura della viabilità di adduzione è previsto in CB a bassa emissione di rumore.

Gli strati di binder e di base della viabilità di adduzione sono previsti con conglomerati bituminosi di tipo tradizionale.

È prevista inoltre la realizzazione di una sottobase in MCAD-S confezionato con bitume schiumato.

### **2.3.5. PERIODO DI ANALISI DELLA PAVIMENTAZIONE**

Le pavimentazioni sono state verificate con riferimento ad un periodo di analisi di 20 anni.

### **2.3.6. AFFIDABILITÀ DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE**

Il metodo empirico-razionale utilizzato per il dimensionamento della pavimentazione consente di tener conto dell'affidabilità delle soluzioni, definita come la probabilità di sopravvivenza della sovrastruttura al termine del periodo di analisi. In conformità con quanto effettuato per la definizione della mix di traffico della viabilità di adduzione D04-08, si sono introdotti in progetto tre diversi livelli di affidabilità a seconda della classe delle tratte stradali considerate nelle diverse viabilità di adduzione. In particolare si è fatto riferimento a quanto previsto dal Catalogo delle Pavimentazioni Stradali per le tre tipologie di strade illustrate in Tabella 6.

**TABELLA 6 – AFFIDABILITÀ DI PROGETTO DELLA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08**

<b>TIPO DI STRADA</b>	<b>TIPO DI STRADA ASSOCIATA</b>	<b>AFFIDABILITÀ DA CATALOGO</b>
C1	Extraurbana secondaria a forte traffico	90%
C2	Extraurbana secondaria ordinaria	85%
F1	Extraurbana secondaria turistica	80%

Il valore di affidabilità adottato per le Strade extraurbane secondarie di Tipo C1 (secondarie a forte traffico) è pari al 90%, quello adottato per strade di Tipo C2 è pari all' 85% ed infine quello adottato per Strade di Tipo F1 ed F2 è pari all' 80%. Ciò rappresenta una condizione in cui il rischio di dover effettuare interventi di manutenzione prima di quanto desumibile dalle verifiche effettuate è limitato, rispettivamente, al solo 10%,15% o 20%.

Nello specifico progetto della D04-08 sono presenti solo tratte di classe C2 ed F1.

## **2.4. INDICATORI PRESTAZIONALI ASSUNTI NELLE VERIFICHE**

### **2.4.1. INDICATORI PRESTAZIONALI**

Le prestazioni delle pavimentazioni sono state valutate per mezzo dei seguenti indicatori:

- L'estensione della fessurazione in superficie dovuta a lesioni che si propagano dal basso verso l'alto (fessure di tipo "bottom-up") al termine dei 20 anni di analisi dell'infrastruttura;

- La fessurazione superficiale dovuta a lesioni che si propagano dall'alto verso il basso (fessure di tipo "top-down") al termine dei 20 anni di analisi della pavimentazione;
- Danno cumulato a fatica al termine del periodo di analisi di 20 anni;
- La profondità delle ormaie al termine dei 20 anni di analisi, valutata con riferimento a due condizioni di affidabilità, 50% e (85% o 80%) assunte come riferimento per il progetto della pavimentazione della viabilità di adduzione D04-08 nelle due diverse tipologie;
- La regolarità longitudinale, rappresentata mediante l'indice IRI, misurato su una base di almeno 100 metri di sviluppo longitudinale, al termine dei 20 anni di analisi con riferimento a due condizioni di affidabilità, 50% e (85% o 80%) assunte come riferimento per il progetto della pavimentazione della viabilità di adduzione D04-08 nelle due diverse tipologie.

#### **2.4.2. LIMITI DI AMMISSIBILITÀ ASSUNTI NELLE VERIFICHE**

In Tabella 7 sono riportati i valori limite assunti per ciascun indice prestazionale considerato nella verifica delle sovrastrutture del progetto definitivo al di sopra del quale si ritiene necessario un intervento di riqualifica delle pavimentazioni.

**TABELLA 7 - LIMITI DI AMMISSIBILITÀ PER GLI INDICATORI PRESTAZIONALI**

<b>INDICATORE PRESTAZIONALE</b>	<b>UNITÀ DI MISURA</b>	<b>LIMITE MASSIMO</b>	<b>NOTE</b>
Fessurazione "bottom up"	%	25	a
Fessurazione "top down"	m/km	200	b
Danno a fatica	-	0.5	c
Profondità di ormaie	mm	12.00	d
IRI	mm/m	2.1	e

Note:

- a. Il valore è riferito alla % di superficie di pavimentazione interessata da fessurazione. Il limite del 25% rappresenta il raggiungimento di un ammaloramento tale da provocare, in relazione al livello di affidabilità assunto nel progetto, la perdita di funzionalità per la sovrastruttura, rilevata in base al comfort di marcia.
- b. Il valore rappresenta lo sviluppo complessivo di fessure longitudinali presenti in 1 km di strada. Il valore limite di 200 m/km rappresenta il raggiungimento del livello di fessurazione superficiale che provoca, in relazione al livello di affidabilità considerato, un grave decadimento delle caratteristiche

- di portanza della pavimentazione nel suo complesso a causa di eccessive infiltrazioni di acqua all'interno della struttura e ad una maggiore frequenza di condizioni di carico al bordo.
- c. Il valore rappresenta il valore complessivo del danno cumulato per fenomeni di fessurazione di tipo "bottom up" calcolato secondo la legge di Miner. Il limite di Miner teorico di rottura per fatica di tipo "bottom up" è rappresentato dal valore 1.0. Nell'applicazione del criterio al dimensionamento delle pavimentazioni stradali l'esperienza evidenzia che al di sopra di valori del rapporto di Miner di  $0.1 \div 0.5$  la progressione nel tempo delle rotture per fatica della pavimentazione aumenta in modo esponenziale.
  - d. Il valore limite rappresenta la massima profondità delle ormaie accettabile per cui con riferimento ad una pendenza trasversale del 2.5%, è possibile evitare ristagni di acqua in carreggiata.
  - e. Il valore 2.8 rappresenta la soglia di irregolarità superficiale corrispondente al valore di  $PSI=2.5$  previsto dal Catalogo delle Pavimentazioni del CNR al termine del periodo di analisi per strade extraurbane ordinarie e turistiche.

L'illustrazione dei modelli di degrado su cui si basa l'analisi nel metodo M-E PDG è reperibile nella manualistica del metodo (<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/guide.htm>).

### 3. VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE DELLA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08

#### 3.1. LA PAVIMENTAZIONE PREVISTA NEL PP PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08

Per la viabilità di adduzione D04-08 nel PP era prevista la realizzazione di una pavimentazione semirigida con sottobase in misto cementato ad alta duttilità (MCAD-S) realizzata con la tecnica del bitume schiumato ed un microtappeto di usura in conglomerato bituminoso a bassa emissione di rumore (Tabella 8). Tale struttura è stata verificata mediante il metodo M-E PDG con i dati di progetto esplicitati nel Paragrafo 2.3, i valori caratterizzanti le prestazioni dei materiali riportati in Tabella 5 ed i traffici relativi alle classi stradali in esame, sintetizzati in Tabella 3, ed ha fornito i risultati riportati in Tabella 9.

**TABELLA 8 - PAVIMENTAZIONE PREVISTA NEL PP PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08**

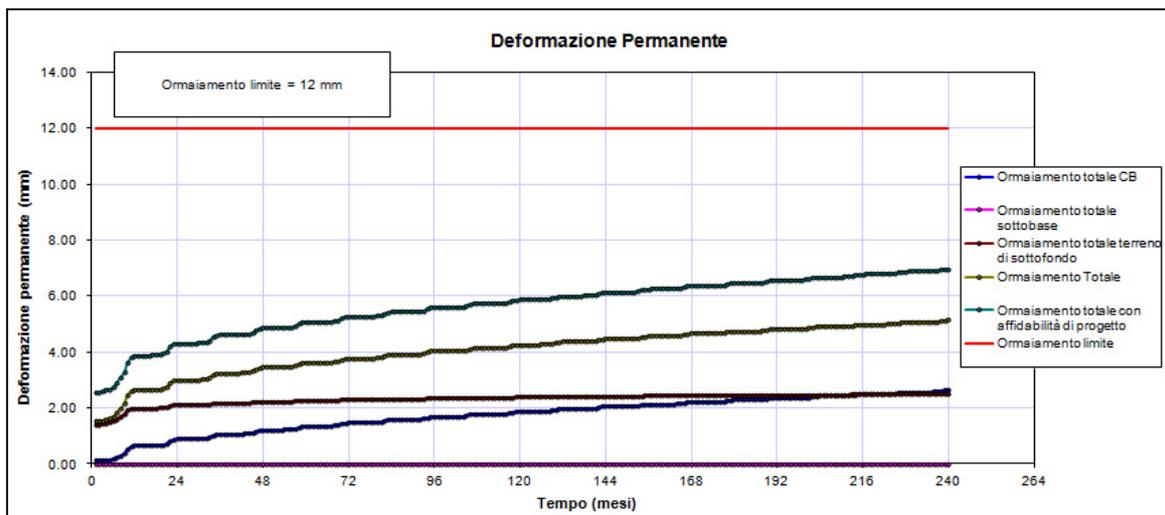
Microtappeto di usura a bassa emissione di rumore	cm	3
Strato di collegamento in Conglomerato Bituminoso	cm	6
Strato di base in Conglomerato Bituminoso	cm	10
Strato di sottobase in Misto Cementato ad Alta Duttilità (MCAD-S) con bitume schiumato	cm	15
TOTALE	cm	34

**TABELLA 9 - RISULTATI DELLE VERIFICHE EFFETTUATE CON IL METODO M-E PDG SULLA PAVIMENTAZIONE PREVISTA NEL PP PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08**

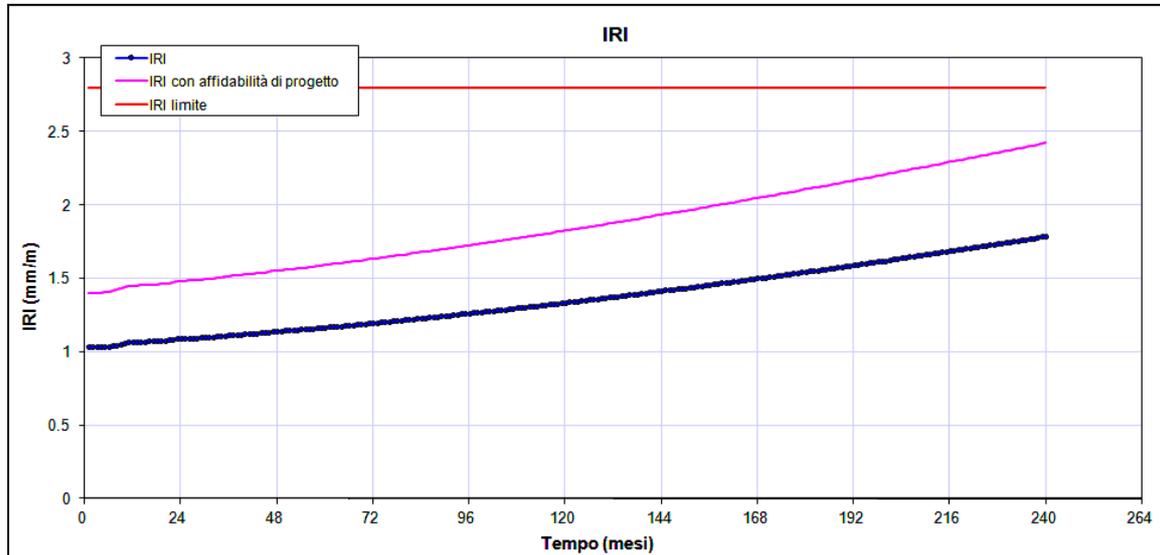
INDICATORE DI PRESTAZIONE	D04-08 tratta A1, A2		D04-08 tratta B		D04-08 tratta C		D04-08 tratta D	
	R = 50%	R = 85%	R = 50%	R = 85%	R = 50%	R = 85%	R = 50%	R = 80%
Fessurazione di tipo "bottom-up" (%)	-	1.76	-	1.47	-	1.46	-	1.46
Fessurazione di tipo "top-down" (m/km)	-	49.77	-	51.48	-	51.06	-	50.31
Danno per fatica (Bottom-up)	1.13 x10 <sup>-4</sup>		2.93 x10 <sup>-4</sup>		2.48 x10 <sup>-4</sup>		1.69 x10 <sup>-4</sup>	
Profondità ormaie (mm)	4.0	5.5	5.1	7.0	4.9	6.7	4.5	6.1
IRI (mm/m)	1.76	2.39	1.79	2.42	1.78	2.42	1.78	2.40

I risultati di Tabella 9 possono essere così sintetizzati:

- La pavimentazione presenta una fessurazione per fatica “dal basso” (“bottom-up”) compresa tra 1.46 e 1.76%, praticamente trascurabile;
- La fessurazione di tipo “top down” assume al termine del periodo di analisi, con l’affidabilità del 85%, valori di circa 50 m/km, nettamente inferiori rispetto al limite di progetto per tutta la durata del periodo di analisi considerato. Tale condizione permetterà dunque di non dover programmare nel tempo alcun intervento di manutenzione per sigillatura fessure o ripristino superficiale;
- Il danno per fatica “bottom-up” dopo 20 anni è trascurabile (tra  $1.13 \times 10^{-4}$  e  $2.94 \times 10^{-4}$ );
- Al termine del periodo di analisi la pavimentazione sarà affetta da una profondità media di ormaie di 4-5 mm (con il 50% di affidabilità) mentre sono da attendersi 5.5-7 mm di ormaio se si fa riferimento ad una affidabilità del 85% (in Figura 1 è rappresentato l’andamento delle ormaie nel tempo per la tratta B che risulta la più critica). La profondità delle ormaie mantiene quindi valori nettamente inferiori al limite massimo previsto, senza la necessità di prevedere alcuno specifico intervento di manutenzione per questo ammaloramento;
- Al termine del periodo di analisi l’irregolarità longitudinale (IRI) raggiunge, con una affidabilità del 50%, valori tra di 1.76 e 1.79 mm/m e, nel caso di affidabilità dell’ 85%, valori tra 2.39 e 2.42 mm/m. Avendo fissato la soglia di accettabilità a 2.8 mm/m, non sarà necessario prevedere alcun intervento di ripristino della regolarità longitudinale per tutto il periodo di analisi, considerato pari a 20 anni (in Figura 2 è rappresentato l’andamento dell’IRI nel tempo per la tratta B che risulta la più critica).



**FIGURA 1 – ANDAMENTO DELLA DEFORMAZIONE PERMANENTE NEL TEMPO PER LA SOVRASTRUTTURA PROPOSTA NEL PP PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08 – TRATTA B**



**FIGURA 2 - ANDAMENTO DELLA IRREGOLARITÀ LONGITUDINALE (INDICE IRI) NEL TEMPO PER LA SOVRASTRUTTURA PROPOSTA NEL PP PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08 – TRATTA B**

In conclusione i calcoli di verifica effettuati evidenziano che la struttura della pavimentazione prevista nel PP garantisce abbondantemente il pieno rispetto di tutti gli indicatori prestazionali calcolati.

### 3.2. LA PAVIMENTAZIONE PROPOSTA NEL PD PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08

Rispetto alla pavimentazione prevista nel progetto preliminare la soluzione proposta nel PD prevede la sostituzione dell'usura in CB a bassa emissione di rumore realizzata con argilla espansa e polverino di gomma con un manto di tipo Splitt Mastix Asphalt (SMA) dello stesso spessore. La sostituzione del CB a bassa emissione di rumore del tipo di quello previsto in PP con un CB di tipo SMA consente di avere ancora una soluzione a ridotta emissione di rumore ma realizzata con una miscela ad elevata resistenza strutturale che garantisce minori esigenze manutentive nel tempo e più elevati valori di aderenza, come richiesto dagli Enti Locali in sede di conferenza dei Servizi. I manti a bassa emissione con argilla espansa e polverino di gomma sono infatti realizzati con aggregati a bassa durabilità e se soggetti a forti azioni tangenziali possono portare ad ammaloramenti superficiali nel tempo.

Inoltre in considerazione della prevista stabilizzazione del sottofondo su tutte le viabilità di adduzione con Mr di almeno 200 MPa e visti gli effettivi traffici che interessano la D04-08, come desunti dallo studio di traffico effettuato nel PD, si è ritenuto opportuno eliminare la sottobase in MCAD andando invece ad incrementare lo spessore degli strati di binder e di base.

Per la viabilità di adduzione D04-08 il PD prevede pertanto la sovrastruttura illustrata in Tabella 10.

**TABELLA 10 - SOVRASTRUTTURA PROPOSTA NEL PROGETTO DEFINITIVO PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08**

<b>STRATIGRAFIA</b>	<b>MATERIALE</b>	<b>SPESSORE</b>
<b>USURA</b>	CB di tipo Splitt Mastix Asphalt	3 cm
<b>BINDER</b>	CB	7 cm
<b>BASE</b>	CB	17 cm
<b>SOTTOFONDO</b>	Mr = 200 MPa con stabilizzazione a calce del piano di posa della pavimentazione	

La stratigrafia costituente la pavimentazione rappresentata in Tabella 10 è stata caratterizzata nel software M-E PDG per mezzo dei parametri indicati in Tabella 5, relativamente ai materiali tradizionali, e riportati in Tabella 11 relativamente all'usura in SMA.

**TABELLA 11 - PARAMETRI UTILIZZATI PER L'ANALISI CON IL METODO M-E PDG DELLE PAVIMENTAZIONI PROPOSTE NEL PD**

<b>PARAM.</b>	<b>USURA in SMA</b>
$\rho_{3/4}$ [%]	0
$\rho_{3/8}$ [%]	12
$\rho_4$ [%]	66
$\rho_{200}$ [%]	10.5
Va [%]	15.4
Vb [%]	3
A	10.6508
VTS	-3.5537

La pavimentazione illustrata in Tabella 10, verificata mediante il metodo M-E PDG con i dati di progetto esplicitati nel Paragrafo 2.3, i valori caratterizzanti le prestazioni dei materiali riportati in Tabella 5 ed i traffici

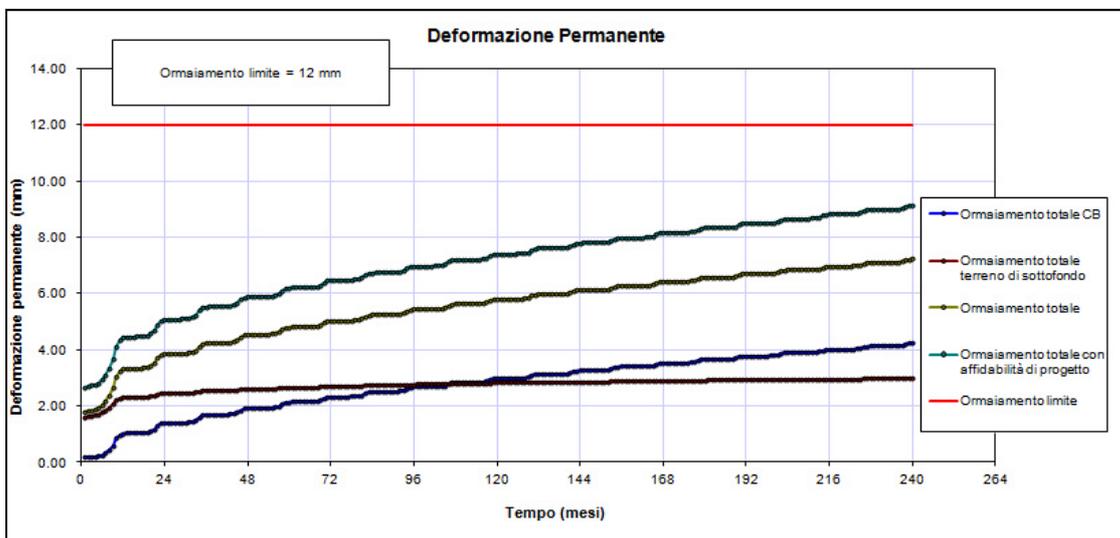
relativi alla massima sollecitazione relativa D04-08 (tratta B – 9.1 milioni) descritti in Tabella 3, ha fornito i risultati riportati in Tabella 12.

**TABELLA 12 - RISULTATI DELLE VERIFICHE EFFETTUATE CON IL METODO M-E PDG SULLA PAVIMENTAZIONE PROPOSTA NEL PD PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE IN D04-08**

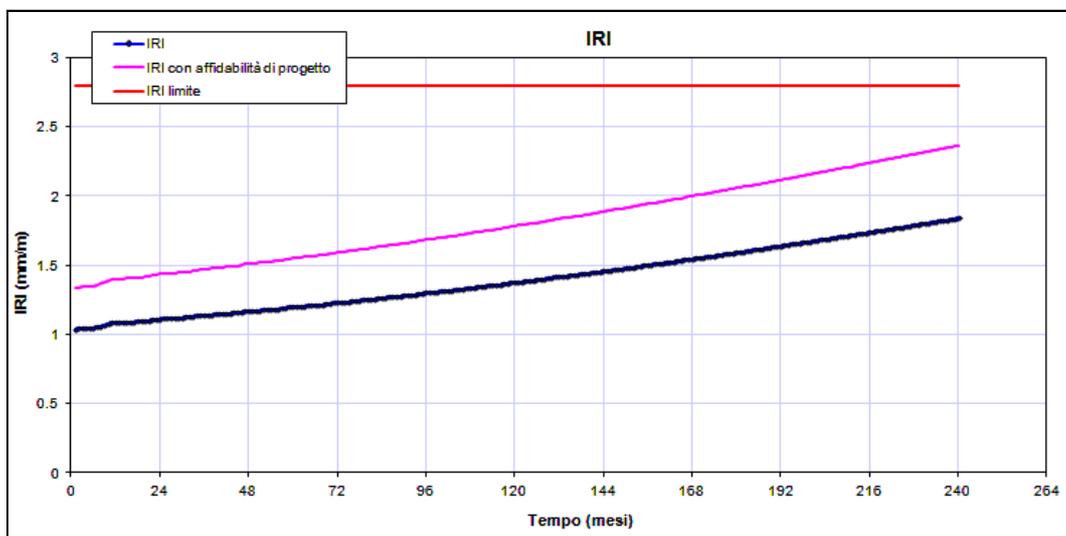
INDICATORE DI PRESTAZIONE	D04-08	
	R = 50%	R = 85%
Fessurazione di tipo "bottom-up" (%)	-	1.34
Fessurazione di tipo "top-down" (m/km)	-	42.65
Danno per fatica (Bottom-up)	2.42 x10 <sup>-3</sup>	
Profondità ormaie (mm)	7.2	9.1
IRI (mm/m)	1.84	2.37

I risultati di Tabella 12 relativi alla viabilità di adduzione D04-08 consentono di fare le seguenti considerazioni:

- La pavimentazione presenta una fessurazione per fatica "dal basso" ("bottom-up") dell'1.34%, praticamente trascurabile;
- La fessurazione top down presenta al termine del periodo di analisi valori pari a 42.65 m/km, nettamente inferiori rispetto al limite di progetto per tutta la durata del periodo di analisi considerato. Tale condizione permetterà dunque di non dover programmare nel tempo alcun intervento di manutenzione per sigillatura fessure o ripristino superficiale;
- Il danno per fatica "bottom-up" dopo 20 anni è trascurabile ( $2.42 \times 10^{-3}$ );
- Al termine del periodo di analisi la pavimentazione sarà affetta da una profondità media di ormaie di 7.2 mm (con il 50% di affidabilità) mentre sono da attendersi 9.1 mm di ormaiamento se si fa riferimento ad una affidabilità dell' 80% (Figura 3). La profondità delle ormaie mantiene quindi valori nettamente inferiori al limite massimo previsto, senza la necessità di prevedere alcuno specifico intervento di manutenzione per questo ammaloramento;
- Al termine del periodo di analisi l'irregolarità longitudinale (IRI) raggiunge, con una affidabilità del 50%, un valore di 1.84 mm/m e, nel caso di affidabilità dell' 80%, un valore di 2.37 mm/m (Figura 4). Avendo fissato la soglia di accettabilità a 2.8 mm/m, non sarà necessario prevedere alcun intervento di ripristino della regolarità longitudinale durante tutto il periodo di analisi, considerato pari a 20 anni.



**FIGURA 3 – ANDAMENTO DELLA DEFORMAZIONE PERMANENTE NEL TEMPO PER LA SOVRASTRUTTURA PROPOSTA PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08**



**FIGURA 4 - ANDAMENTO DELLA IRREGOLARITÀ LONGITUDINALE (INDICE IRI) NEL TEMPO PER LA SOVRASTRUTTURA PROPOSTA PER LA VIABILITÀ DI ADDUZIONE D04-08**

Come si può osservare la soluzione proposta in PD garantisce abbondantemente, come quella di PP, il pieno rispetto di tutti gli indicatori prestazionali calcolati.

## **4. CONCLUSIONI**

---

Le verifiche effettuate con il software M-E PDG sulle pavimentazioni proposte nel PP per la viabilità di adduzione D04-08, effettuate con i dati di progetto illustrati al paragrafo 2.3, soddisfano abbondantemente tutti i criteri strutturali e funzionali di controllo previsti in progetto.

In fase di progettazione definitiva, essendo disponibili dati di traffico specifici per l'infrastruttura oggetto di analisi, è stato possibile una ottimizzazione delle pavimentazioni stradali, grazie allo studio di soluzioni che evitassero uno spreco di risorse, mantenendo per tutto il periodo di analisi prestazioni analoghe a quelle delle soluzioni previste in PP, e riducessero al contempo i possibili oneri manutentivi connessi con l'impiego di un manto di usura a bassa emissione di rumore realizzato con argilla espansa e polverino di gomma.

La soluzione proposta, di tipo flessibile, è stata studiata per garantire prestazioni strutturali e funzionali analoghe a quelle della soluzione del PP per tutto l'arco del periodo di analisi assunto pari a 20 anni ed è stata verificata sulla base delle condizioni di traffico massime relative all'intera tratta (Viabilità di adduzione D04-08, tratta B).

Le migliorie apportate rispetto alla soluzione del PP possono essere sintetizzate in:

- Sostituzione del manto di usura a bassa emissione di rumore realizzato con argilla espansa e polverino di gomma con un manto di tipo Splitt Mastix Asphalt, anch'esso caratterizzato da un bassa emissione di rumore ma che richiede una manutenzione nettamente inferiore e garantisce al contempo una più elevata aderenza;
- Eliminazione della sottobase in misto cementato ad alta duttilità, la cui utilità risulta ridotta in presenza di un sottofondo stabilizzato con leganti idraulici, come quello previsto nel PD, con i traffici previsti per la D04-08, con contestuale aumento dello spessore degli strati di binder e di base.