


## ASSE VIARIO MARCHE – UMBRIA E QUADRILATERO DI PENETRAZIONE INTERNA MAXI LOTTO 2

LAVORI DI COMPLETAMENTO DELLA DIRETTRICE PERUGIA ANCONA:  
SS. 318 DI “VALFABBRICA”. TRATTO PIANELLO – VALFABBRICA  
SS. 76 “VAL D’ESINO”. TRATTI FOSSATO VICO – CANCELLI E ALBACINA – SERRA SAN QUIRICO  
“PEDEMONTANA DELLE MARCHE”, TRATTO FABRIANO – MUCCIA – SFERCIA




### PROGETTO ESECUTIVO

<p><b>CONTRAENTE GENERALE:</b></p> 	<p><i>Il responsabile del Contraente Generale:</i></p> <p style="text-align: center;">Ing. Federico Montanari</p>	<p><i>Il responsabile Integrazioni delle Prestazioni Specialistiche:</i></p> <p style="text-align: center;">Ing. Salvatore Lieto</p>
--	---	--

**PROGETTAZIONE:** Associazione Temporanea di Imprese

*Mandataria:*

			
--	--	---	--

<p><b>RESPONSABILE DELLA PROGETTAZIONE PER L'ATI</b></p> <p>Ing. Antonio Grimaldi</p> <p><b>GEOLOGO</b> Dott. Geol. Fabrizio Pontoni</p> <p><b>COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE</b> Ing. Michele Curiale</p>			
---	---	--	---

<p><b>IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO</b></p> <p>Ing. Iginio Farotti</p>		
---	--	--

<p><b>2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE</b> 3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord - Castelraimondo sud 4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud - innesto S.S. 77 a Muccia</p> <p><b>PROGETTO STRADALE</b> Studio misto stabilizzato a cemento in situ – Volume 1 (Relazione)</p>	<p><b>SCALA:</b></p> <p style="text-align: center;">-</p> <p><b>DATA:</b></p> <p style="text-align: center;">Settembre 2020</p>
--	---

Codice Unico di Progetto (CUP) F12C03000050021 (Assegnato CIPE 23-12-2015)

Codice Elaborato:	Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc.	N. prog.	Rev.
	L 0 7 0 3	2 1 3	E	0 6	C S 0 0 0 0	R E L	0 4	A

REV.	DATA	DESCRIZIONE	Redatto	Controllato	Approvato
A	Settembre 2020	Emissione a seguito istruttoria ANAS	TEMA E. Santagata	S. Lieto	A. Grimaldi

## Indice

1. Premessa .....	1
2. Articolazione dello studio .....	2
3. Risultati e analisi .....	5
3.1 Analisi della documentazione tecnica disponibile (Attività V1) .....	5
3.2 Verifica preliminare del comportamento strutturale di pavimentazioni stradali con stratigrafia ottimizzata (Attività V2) .....	7
3.3 Caratterizzazione dei materiali destinati alla formazione del nuovo strato di fondazione stabilizzato a cemento in situ (Attività V3) .....	8
3.4 Progettazione, esecuzione e monitoraggio del campo prove #1 (Attività S4) .....	11
3.5 Mix design delle miscele stabilizzate a cemento in situ (Attività S5) .....	13
3.6 Caratterizzazione avanzata delle miscele stabilizzate a cemento in situ con composizione ottimizzata (Attività S6) .....	15
3.7 Modellazione del comportamento non lineare delle miscele stabilizzate a cemento in situ con composizione ottimizzata (Attività V7) .....	15
3.8 Progettazione, esecuzione e monitoraggio del campo prove #2 (Attività S8) .....	16
3.9 Verifica finale del comportamento strutturale di pavimentazioni stradali con stratigrafia ottimizzata (Attività V9) .....	20
3.10 Integrazione alle Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto (Attività V10) .....	25
4. Conclusioni .....	25

## Indice delle tabelle

Tabella 1. Stratigrafie delle sovrastrutture previste nel Progetto Esecutivo per l'asse principale dell'infrastruttura .....	6
Tabella 2. Risultati delle prove eseguite sui materiali granulari 0/70 e 0/25 (Cava Inerti Esino) .....	10
Tabella 3. Risultati delle prove eseguite sul materiale granulare 0/50 (Cava Gubbio) .....	10
Tabella 4. Risultati delle prove eseguite sulle campionature di fresato bituminoso 0/25 (Depositi Trocchetti e Collalto) .....	10
Tabella 5. Strisce di stesa realizzate nel campo prove #1 .....	11
Tabella 6. Dosaggi di fresato delle miscele 1.2 e 1.3 del campo prove #1 ...	13
Tabella 7. Umidità ottima di addensamento e massima densità secca delle miscele 1.1 considerate nello studio di mix design .....	14
Tabella 8. Umidità ottima di addensamento e massima densità secca delle miscele 1.2 considerate nello studio di mix design .....	14
Tabella 9. Umidità ottima di addensamento e massima densità secca delle miscele 1.3 considerate nello studio di mix design .....	14
Tabella 10. Caratteristiche compositive, meccaniche e volumetriche delle miscele stabilizzate a cemento con composizione ottimizzata .....	14
Tabella 11. Risultati della modellazione non lineare delle miscele ottimizzate .....	16
Tabella 12. Resistenza a compressione delle miscele ottimizzate .....	17
Tabella 13. Schemi di compattazione adottati nel campo prove #2 .....	18
Tabella 14. Prove in situ previste sul campo prove #2 .....	18
Tabella 15. Moduli di deformazione ( $M_d$ , in MPa) per alta compattazione (AC) e bassa compattazione (BC) rilevati nel campo prove #2 .....	19
Tabella 16. Moduli dinamici ( $E_d$ , in MPa) per alta compattazione (AC) e bassa compattazione (BC) rilevati nel campo prove #2 .....	19
Tabella 17. Densità secca in situ ( $\gamma_s$ , in $g/cm^3$ ) per alta compattazione (AC) e bassa compattazione (BC) rilevati nel campo prove #2 .....	19
Tabella 18. Percentuali di addensamento ( $Add$ , in %) per alta compattazione (AC) e bassa compattazione (BC) rilevati nel campo prove #2 .....	19
Tabella 19. Stratigrafie delle sovrastrutture sottoposte a valutazione strutturale .....	22

## Indice degli allegati (vol. 2)

Allegato A. Risultati delle prove effettuate per la caratterizzazione dei materiali da impiegarsi per la formazione del nuovo strato di fondazione stabilizzato a cemento in situ .....	1
Allegato A1. Risultati delle prove effettuate per la caratterizzazione dei materiali granulari provenienti dalla Cava Inerti Esino .....	2
Allegato A2. Risultati delle prove effettuate per la caratterizzazione dei materiali granulari provenienti dalla Cava Gubbio .....	40
Allegato A3. Risultati delle prove effettuate per la caratterizzazione del fresato bituminoso proveniente dal Deposito Trocchetti .....	67
Allegato A4. Risultati delle prove effettuate per la caratterizzazione del fresato bituminoso proveniente dal Deposito Collalto .....	78
Allegato B. Risultati delle prove sperimentali effettuate a supporto del campo prove #1 .....	86
Allegato B1. Risultati delle prove di portanza di carico su piastra di tipo statico effettuate sulla superficie di appoggio delle strisce di stesa nel campo prove #1 .....	87
Allegato B2. Risultati delle prove di effettuate sui materiali componenti prelevati dai cumuli durante la realizzazione del campo prove #1 .....	96
Allegato B3. Risultati delle prove per la determinazione del cedimento sotto l'azione del rullo compattatore nel campo prove #1 .....	105
Allegato B4. Risultati delle prove di effettuate con attrezzatura DCP sulle strisce di miscele granulari prima del passaggio della macchina stabilizzatrice nel campo prove #1 ..	108
Allegato B5. Risultati delle prove di effettuate sulle miscele granulari prelevate dalle strisce di stesa dopo il passaggio della macchina stabilizzatrice nel campo prove #1 .....	143
Allegato B6. Risultati delle prove di effettuate con attrezzatura DCP sulle strisce di miscele granulari dopo il passaggio della macchina stabilizzatrice nel campo prove #1 .....	163
Allegato B7. Risultati delle prove di effettuate sulle strisce di miscele granulari dopo il passaggio del rullo compattatore nel campo prove #1 .....	198
Allegato C. Prove effettuate per il mix design delle miscele granulari stabilizzate a cemento in situ .....	264
Allegato D. Risultati delle prove di caratterizzazione avanzata delle miscele di misto granulare stabilizzato a cemento in situ con composizione ottimizzata .....	288

## **Indice degli allegati (vol. 2) (segue)**

Allegato E. Risultati della modellazione del comportamento non lineare di miscele stabilizzate a cemento con composizione ottimizzata .....	302
Allegato F. Risultati delle prove sperimentali effettuate a supporto del campo prove #2 .....	310
Allegato F1. Risultati delle prove di portanza di carico su piastra di tipo dinamico effettuate sulla superficie di appoggio dello strato di fondazione nel campo prove #2 .....	311
Allegato F2. Risultati delle prove di compressione semplice effettuate su campioni di miscele di misto granulare stabilizzato a cemento in situ preparati a piè d'opera durante il campo prove #2 .....	318
Allegato F3. Risultati delle prove per la verifica delle caratteristiche di portanza e addensamento delle miscele di misto granulare stabilizzato a cemento in situ realizzate nel campo prove #2 .....	322
Allegato G. Articolo integrativo delle Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto .....	359

## 1. Premessa

Nella presente relazione vengono esposti i risultati ottenuti nel corso delle indagini e analisi effettuate a supporto della predisposizione di una perizia di variante progettuale relativa alla pavimentazione stradale della Pedemontana delle Marche – Lotto funzionale del sub lotto 2.1 – Tratta Fabriano - Matelica Nord.

Le attività svolte, di carattere sperimentale e teorico, sono state finalizzate alla ottimizzazione della sovrastruttura stradale, con specifiche valutazioni inerenti alla possibile realizzazione di uno strato di fondazione mediante stabilizzazione a cemento in situ, con contestuale utilizzazione di fresato bituminoso.

Lo studio è stato commissionato al Laboratorio Sperimentale TEMA s.a.s. di Fano (PU) (di seguito, "TEMA") da parte dell'Impresa esecutrice dei lavori, Astaldi S.p.A. (di seguito, "Astaldi").

La responsabilità scientifica dello studio da parte di TEMA è stata assegnata al prof. Felice A. Santagata, professore emerito dell'Università Politecnica delle Marche, il quale si è avvalso della collaborazione del prof. Ezio Santagata, professore ordinario di "Strade, Ferrovie e Aeroporti" nel Politecnico di Torino. Quale referente tecnico di Astaldi è stato indicato il dott. Amedeo Babbini.

Le attività sperimentali, di laboratorio e di campo, sono state per la maggior parte effettuate con le risorse di TEMA. Limitatamente alle prove di caratterizzazione avanzata eseguite su alcuni specifici materiali, si è richiesta la disponibilità del Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino.

Facendo seguito alla predisposizione dell'offerta tecnico-economica relativa allo studio (avvenuta in data 01/02/20), l'incarico per la sua esecuzione è stato conferito a TEMA in data 17/03/20 (e sottoscritto per accettazione in data 19/03/20). A fronte delle iniziali previsioni, secondo le quali lo studio sarebbe stato completato nell'arco di 10 settimane lavorative consecutive, si sono dovute affrontare significative limitazioni di carattere operativo conseguenti alla pandemia da Covid-19 che ha riguardato l'intero Paese. Ciononostante, le attività di sperimentazione e analisi sono state completate entro il termine concordato con l'Impresa, ossia entro la fine del mese di luglio 2020.

A seguito dei risultati conseguiti, si ritiene che sussistano le condizioni affinché Astaldi proceda alla formale predisposizione di una perizia di variante progettuale che potrà condurre alla realizzazione di una pavimentazione stradale con adeguate caratteristiche prestazionali. In lato senso, TEMA conferma la propria disponibilità a continuare a supportare Astaldi affinché ciò possa avvenire nel rispetto dei criteri posti a base nelle Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto, così come integrate dai risultati del presente studio.

La presente Relazione Tecnica (vol. 1) costituisce il prodotto finale dello studio sviluppato, e risulta articolata come di seguito indicato:

- nel **capitolo 2** viene illustrata nel dettaglio l'articolazione dello studio;
- nel **capitolo 3** vengono presentati i risultati delle indagini e analisi svolte;
- nel **capitolo 4** vengono tratte le conclusioni dello studio, con una indicazione delle possibili attività future.

Negli **Allegati A-G**, forniti in volume a parte (vol. 2), vengono riportati i rapporti di prova relativi a tutte le indagini sperimentali eseguite in laboratorio e in situ, gli output di alcune specifiche elaborazioni, il testo di un articolo integrativo delle Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto, oltre che un estratto della corposa documentazione fotografica raccolta nel corso dello studio.

## **2. Articolazione dello studio**

Come richiamato nel **capitolo 1**, le attività di sperimentazione e analisi eseguite da parte di TEMA hanno riguardato l'ottimizzazione della sovrastruttura stradale della Pedemontana delle Marche – Lotto funzionale del sub lotto 2.1 – Tratta Fabriano - Matelica Nord.

Nello specifico, lo studio ha trattato la possibile sostituzione del bi-strato di fondazione e sottofondazione previsto nel Progetto Esecutivo (costituito da 20 cm di misto cementato prodotto in impianto, sovrapposto a 20 cm di misto granulare stabilizzato granulometricamente) con un unico strato di fondazione realizzato mediante stabilizzazione a cemento in situ. Per quest'ultimo, si è inoltre prevista una specifica valutazione legata alla possibile inclusione all'interno della sua struttura di fresato bituminoso.

Facendo seguito ai preliminari contatti con Astaldi, l'offerta tecnica ed economica relativa allo studio è stata predisposta prevedendo una successione di attività riconducibili a due principali categorie:

- attività sperimentali, di laboratorio e di campo, funzionali alla determinazione delle caratteristiche fisiche, meccaniche, compositive e prestazionali dei materiali da impiegarsi per la realizzazione dei lavori – nel programma operativo a tali attività si è assegnato un codice alfanumerico contraddistinto dalla lettera "S" ("sperimentazione");
- attività di analisi tecnica e modellazione, necessarie per la valutazione del comportamento strutturale delle varie sovrastrutture stradali, di riferimento ed ottimizzate, prese in esame al fine di individuare la più adeguata soluzione da adottare nel corso della realizzazione dei lavori – nel programma operativo a tali attività si è assegnato un codice alfanumerico contraddistinto dalla lettera "V" ("valutazione").

L'articolazione dello studio, via via affinato anche in funzione dei risultati progressivamente conseguiti, è stato quello di seguito indicato.

- **Attività V1:** Analisi della documentazione tecnica disponibile

L'attività V1 è consistita nell'analisi di alcuni documenti desunti dal Progetto Esecutivo dei lavori e dei risultati di prove eseguite in corso d'opera sui rilevati e sottofondi dell'infrastruttura in costruzione.

- **Attività V2:** Verifica preliminare del comportamento strutturale di pavimentazioni stradali con stratigrafia ottimizzata

L'attività V2 ha comportato l'esecuzione di calcoli finalizzati alla valutazione preliminare della fattibilità di varie soluzioni tecniche alternative a quella di progetto (comprendenti strati di fondazione realizzati con stabilizzazione a cemento in situ, eventualmente con impiego di fresato bituminoso). A tale scopo si è fatto riferimento al medesimo metodo empirico-statistico impiegato nell'ambito del Progetto Esecutivo (*AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*), sviluppando i calcoli in termini relativi, prendendo cioè a riferimento la stratigrafia della pavimentazione stradale di progetto.

- **Attività S3:** Caratterizzazione dei materiali destinati alla formazione del nuovo strato di fondazione stabilizzato a cemento in situ

L'attività S3 è stata imperniata sulla verifica delle caratteristiche del materiale granulare (misto di cava) e del fresato bituminoso da impiegarsi per la successiva formazione di varie tipologie di fondazione stabilizzata a cemento in situ. A talo scopo sono state eseguite le classiche prove di prequalifica di laboratorio, desunte dalle Norme Tecniche di tipo standard.

- **Attività S4:** Progettazione, esecuzione e monitoraggio del campo prove #1

L'attività S4 è stata focalizzata sul campo prove #1, previsto nell'ambito dello studio per poter acquisire materiali così come risultanti dalle lavorazioni in situ, comprendenti di comminazione e miscelazione, da impiegare nelle successive fasi di caratterizzazione di laboratorio.

- **Attività S5:** Mix design delle miscele stabilizzate a cemento in situ

Nel corso dell'attività S5, utilizzando i materiali prelevati durante la realizzazione del campo prove #1, si è effettuato lo studio di mix design di tre miscele granulari stabilizzate a cemento. Una di esse conteneva esclusivamente aggregati di cava, mentre le rimanenti due includevano diverse percentuali di fresato bituminoso (25% e 40% sulla massa totale della miscela granulare). Le indagini sperimentali hanno comportato la



determinazione del contenuto d'acqua e del dosaggio di cemento ottimali e delle corrispondenti caratteristiche di resistenza meccanica. Queste ultime sono state valutate dopo un tempo di stagionatura di 7 giorni mediante prove di compressione semplice e, in misura minore, con prove di trazione indiretta. Al termine dello studio, le miscele aventi le caratteristiche ottimali sono state designate come "miscele stabilizzate a cemento in situ con composizione ottimizzata".

- **Attività S6:** Caratterizzazione avanzata delle miscele stabilizzate a cemento in situ con composizione ottimizzata

L'attività S6 ha preso in esame le miscele stabilizzate a cemento con composizione ottimizzata che sono state sottoposte a prove per la determinazione del modulo resiliente in cella triassiale dopo 7 giorni di maturazione. Detta grandezza è stata determinata nelle condizioni di addensamento limite solitamente considerate accettabili nelle Norme Tecniche dei Capitolati Speciali d'Appalto.

- **Attività V7:** Modellazione del comportamento non lineare delle miscele stabilizzate a cemento in situ con composizione ottimizzata

L'attività V7 ha comportato l'analisi e modellazione dei risultati sperimentali ottenuti nel corso della precedente attività S6, con la determinazione di leggi analitiche in grado di descrivere il comportamento non lineare delle miscele stabilizzate a cemento con composizione ottimizzata. Gli esiti di tale modellazione sono stati espressi in forma tale da poter essere tenuti in conto nell'ambito della successiva attività di calcolo razionale del comportamento strutturale di sovrastrutture stradali con stratigrafie ottimizzate.

- **Attività S8:** Progettazione, esecuzione e monitoraggio del campo prove #2

Il campo prove #2 previsto nell'ambito dell'attività S8 è stato finalizzato alla determinazione delle caratteristiche di addensamento, resistenza e portanza di strati di fondazione costituiti da miscele stabilizzate in situ con composizione ottimizzata. A tale scopo sono state realizzate 3 strisce di stesa impiegando le attrezzature e procedure previste per le effettive lavorazioni di costruzione della sovrastruttura da mettere in esercizio.

- **Attività V9:** Verifica finale del comportamento strutturale di pavimentazioni stradali con stratigrafia ottimizzata

Nel corso dell'attività V9 si sono integrati gli esiti delle valutazioni preliminari sviluppate nell'ambito dell'attività V1 tenendo conto dei risultati conseguiti durante il monitoraggio del campo prove #2 (attività S8) e quelli derivanti dalla modellazione del comportamento non lineare delle miscele stabilizzate a composizione ottimizzata (attività V7).

Come nel caso dell'attività V1, le valutazioni sono state effettuate in termini relativi, prendendo a riferimento la pavimentazione stradale di progetto. L'approccio adottato è stato di tipo razionale, basato sulla modellazione analitica dell'effettivo comportamento sotto carico delle sovrastrutture e finalizzato alla valutazione del corrispondente danno.

- **Attività V10:** Integrazione alle Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto

A seguito degli esiti delle prove e valutazioni effettuate nell'ambito delle attività precedenti, nel corso dell'attività V10 è stata definito uno specifico articolo con il quale integrare le Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto del Progetto Esecutivo. Tale articolo è stato strutturato in modo tale da contenere i requisiti di accettazione di materiali componenti, miscele e lavorazioni.

Come da vincolo contrattuale, alla conclusione di ciascuna attività TEMA ha provveduto a trasmettere ad Astaldi un Rapporto Tecnico sintetico, con in allegato gli eventuali rapporti di prova e/o documenti tecnici di riferimento.

### **3. Risultati e analisi**

#### **3.1 Analisi della documentazione tecnica disponibile (Attività V1)**

Nelle fasi di avvio dello studio, Astaldi ha messo a disposizione di TEMA la seguente documentazione tecnica:

- estratto della Relazione Tecnica Generale del Progetto Esecutivo lotto funzionale del sub lotto 2.1 (tratta Fabriano – Matelica Nord), revisione I del luglio 2016 (pagine 51-59, relative alla verifica di dimensionamento della pavimentazione stradale);
- Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto facenti parte del Progetto Esecutivo;
- risultati di prove di carico su piastra eseguite in corso d'opera;
- corografia di inquadramento della Pedemontana delle Marche in scala 1:25.000.

Le attività di analisi della documentazione sono state integrate da incontri tecnici, in presenza e in remoto, con il personale di Astaldi. Ciò allo scopo di condividere le strategie di studio e di rendere lo stesso coerente con il suo obiettivo finale, consistente nella predisposizione da parte di Astaldi della già citata perizia di variante progettuale.

Dall'analisi dell'estratto della Relazione Tecnica Generale del Progetto Esecutivo, risulta che all'atto della redazione del Progetto Esecutivo si è previsto che per

l'asse principale dell'infrastruttura la sovrastruttura sia realizzata con le stratigrafie indicate in **Tabella 1**, variabili a seconda della tipologia di sezione presa in esame.

**Tabella 1.** Stratigrafie delle sovrastrutture previste nel Progetto Esecutivo per l'asse principale dell'infrastruttura

Sezione in rilevato o trincea	Sezione in galleria	Sezione in viadotto
Strato di usura in conglomerato bituminoso: spessore cm 4	Strato di usura in conglomerato bituminoso: spessore cm 4	Strato di usura in conglomerato bituminoso: spessore cm 4
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso: spessore cm 4	Strato di collegamento in conglomerato bituminoso: spessore cm 4	Strato di collegamento in conglomerato bituminoso: spessore cm 4
Strato di base in conglomerato bituminoso: spessore cm 8	Strato di base in conglomerato bituminoso: spessore cm 8	-
Strato di fondazione in materiale misto cementato: spessore cm 20	-	-
Strato di sottofondazione in materiale misto granulare: spessore cm 20	Strato di sottofondazione in materiale misto granulare: spessore variabile	-
-	-	Strato di impermeabilizzazione con leganti cementizi con polimeri: spessore cm 1
Sottofondo	Sottofondo	Impalcato

Nel su citato estratto sono esplicitamente riportati i risultati dei calcoli eseguiti per la verifica di dimensionamento delle sovrastrutture previste per i tratti in rilevato o trincea. Essi sono stati eseguiti impiegando il procedimento, di tipo empirico-statistico, indicato nella *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures del 1993*.

Nello specifico, sono state fatte le seguenti assunzioni per ciò che concerne i parametri di input dell'algoritmo di calcolo:

- Affidabilità pari al 90% (ritenuto adeguato per strade extraurbane principali), cui corrisponde un valore della variabile standardizzata ( $Z_r$ ) pari a -1,282;
- Deviazione standard ( $S_0$ ) pari a 0,45;
- Valore iniziale del Present Serviceability Index ( $PSI_{iniz}$ ) pari a 4,2;
- Valore finale del Present Serviceability Index ( $PSI_{fin}$ ) pari a 2,5 (ritenuto adeguato per strade extraurbane principali);
- Modulo resiliente ( $M_r$ ) del sottofondo pari a 15.000 psi (equivalente a 103,4 MPa) desunto dal valore di minimo di accettazione del modulo di deformazione  $M_d$  previsto nelle Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto e da alcune relazioni che legano il modulo di deformazione all'indice CBR e l'indice CBR al modulo resiliente);
- Coefficienti di strato ( $a_i$ ) pari a: 0,43 (strato di usura), 0,40 (strato di collegamento), 0,28 (strato di base), 0,18 (strato di fondazione), 0,11 (strato di sottofondazione);
- Coefficienti di drenaggio ( $m_i$ ) pari a: 1 (strati legati a bitume), 0,98 (strato di fondazione), 0,95 (strato di sottofondazione).

Con riferimento al traffico di progetto, nella su citata Relazione Tecnica Generale sono stati elaborati dati desunti dall'analisi trasportistica inclusa nel Progetto Preliminare, e si è ipotizzato un valore del coefficiente di equivalenza dei veicoli commerciali pari a 1,3. A seguito di ciò, si è pervenuti ad un valore nel numero di assi standard di progetto (indicati come  $N_{8,2}$ ) pari a 28.144.823 (per l'asse principale).

La verifica eseguita in applicazione del procedimento della *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures* ha dato esito positivo, con un rapporto tra traffico ammissibile e traffico di progetto pari a 1,29.

Dall'analisi delle Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto si sono potute desumere le prescrizioni relative alle caratteristiche compositive, volumetriche e meccaniche dei vari strati componenti la pavimentazione di progetto. Si è in ogni caso rilevato che si tratta di un documento di tipo assolutamente standard, avente contenuti del tutto in linea con le Norme Tecniche adottate per la maggior parte delle infrastrutture stradali italiane.

Particolare attenzione è stata posta nell'analisi dell'articolo 15 (Pavimentazioni) e più precisamente alla parte (1.1.2) dedicata agli strati di fondazione in misto cementato confezionato in centrale. Ciò alla luce del fatto che sin dall'inizio dello studio si è considerato quale obiettivo delle analisi la sostituzione del bi-strato di fondazione e sottofondazione con un unico strato di fondazione in misto granulare stabilizzato a cemento in situ.

### **3.2 Verifica preliminare del comportamento strutturale di pavimentazioni stradali con stratigrafia ottimizzata (Attività V2)**

Per una preliminare e speditiva valutazione della fattibilità di varie soluzioni tecniche alternative a quella di progetto, nel corso dell'attività V2 si è fatto riferimento a quanto riportato nella Relazione Tecnica Generale del Progetto Esecutivo. In particolare, si sono presi in esame i risultati derivanti dall'applicazione del metodo di dimensionamento empirico-statistico della *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures* che dipendono essenzialmente, oltre che dalle caratteristiche del sottofondo, dal preventivo calcolo del cosiddetto "indice di spessore" (SN, structural number). Quest'ultimo viene valutato in funzione dello spessore dei singoli strati ( $h_i$ ), nonché dei corrispondenti valori dei coefficienti strutturali ( $a_i$ ) e dei coefficienti di drenaggio ( $m_i$ ).

Senza entrare nel merito delle specifiche scelte adottate dai progettisti per l'assunzione dei valori dei su citati parametri di input ( $h_i$ ,  $a_i$  e  $m_i$ ), si è preso atto del fatto che la pavimentazione di progetto è caratterizzata da un SN pari a 11,18 cm.

Nel caso di sostituzione del bi-strato di fondazione e sottofondazione con un unico strato di fondazione in misto granulare stabilizzato a cemento in situ, risulta che al fine di mantenere costante il valore di SN – e quindi del corrispondente numero di assi standard sopportabili dalla pavimentazione – si dovrebbe adottare uno spessore di fondazione pari a 31,85 cm. Si intende che tale valutazione si fonda sull'ulteriore ipotesi che per la nuova fondazione stabilizzata in situ si possa mantenere il medesimo valore del coefficiente strutturale associato al misto cementato prodotto in impianto. In ogni caso, il valore sopra riportato è quello che deriva dall'equivalenza analitica delle due tipologie di sovrastruttura (con bi-strato o con strato singolo) e andrebbe dunque approssimato a un valore intero, verificabile in maniera diretta durante i controlli in corso d'opera.

Nel caso in cui il valore sopra indicato venga approssimato a 30 cm, l'equivalenza della risultante sovrastruttura con quella di progetto (ossia la costanza del valore di SN) è preservata con un valore del coefficiente strutturale del misto granulare stabilizzato a cemento in situ pari a 0.191. Tale valore è del tutto in linea con quelli riportati nella letteratura tecnica di settore per materiali del tipo in esame e risulta altresì corrispondente, secondo i nomogrammi forniti dalla *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, ad una resistenza a compressione semplice dopo 7 giorni di maturazione dell'ordine dei 4 MPa (che risulta tipico per materiali stabilizzati a cemento). Per questi ultimi, tali caratteristiche di resistenza possono essere raggiunte anche con l'impiego di fresato bituminoso in parziale sostituzione degli aggregati di cava, a patto che tale operazione venga supportata da un idoneo studio di formulazione della miscela (mix design).

Per effetto di quanto sopra riportato, a conclusione dell'attività V2 si è espresso un parere positivo circa l'adozione di una stratigrafia di pavimentazione ottimizzata rispetto a quella di progetto, con la possibile sostituzione del bi-strato di fondazione e sottofondazione con un unico strato di fondazione in misto granulare stabilizzato a cemento, contenente anche fresato bituminoso. A tale conclusione si è inteso dare seguito con gli studi previsti nell'ambito delle successive attività, finalizzate alla valutazione delle effettive caratteristiche meccaniche di materiali del tipo ipotizzato e alla verifica del comportamento strutturale della corrispondente pavimentazione.

### **3.3 Caratterizzazione dei materiali destinati alla formazione del nuovo strato di fondazione stabilizzato a cemento in situ (Attività S3)**

Al fine di sviluppare uno studio tenendo conto delle caratteristiche dei materiali effettivamente disponibili per la realizzazione della pavimentazione stradale dell'infrastruttura in esame, sono state effettuate indagini sperimentali per la caratterizzazione di materiali granulari di cava e di campionature di fresato bituminoso. Nello specifico, i materiali granulari sono stati approvvigionati

presso due diverse cave (Cava Inerti Esino e Cava Gubbiotti), mentre il fresato bituminoso è stato prelevato in due diversi depositi (Deposito Trocchetti e Deposito Collalto).

Le attività di sperimentazione di laboratorio sono state precedute da sopralluoghi in situ per la verifica delle modalità di stoccaggio dei materiali (anche con riferimento alla loro omogeneità) e per raccogliere informazioni riguardanti eventuali precedenti lavorazioni cui essi sono stati sottoposti (frantumazione, vagliatura, riclassificazione).

I risultati delle prove eseguite sono riportati negli **Allegati A1-A4** e sono sintetizzati nelle seguenti **Tabelle 2-4**.

Occorre precisare che dopo aver inizialmente individuato come potenziale fornitore la Cava Inerti Esino, si è dovuto optare per altro fornitore a causa di alcuni impedimenti oggettivi. Per quel che riguarda il materiale proveniente dalla Cava Gubbiotti, nelle fasi di avvio della sperimentazione si sono considerati tre diversi materiali (denominati 0/30, 0/40 e 0/50), caratterizzati da diverso diametro massimo e differente distribuzione granulometrica. A fronte delle iniziali valutazioni effettuate sui tre materiali si è focalizzata l'attenzione sul materiale 0/50, che è stato quindi sottoposto ad una caratterizzazione completa. Questa è stata ulteriormente integrata con prove eseguite sulla roccia di origine.

Con riferimento alle campionature di fresato bituminoso, il materiale che è stato individuato come idoneo per il successivo utilizzo nelle lavorazioni di stabilizzazione in situ è quello prelevato dal Deposito Collalto. Per entrambi i materiali si è suggerita una preliminare vagliatura, da effettuarsi in cantiere con il semplice impiego di rete elettrosaldata, con eliminazione degli elementi aventi diametro superiore ai 25 mm. Per tale motivo entrambe le campionature sono indicate nei rapporti di prova come "fresato 0/25". Alcune prove sono state però eseguite anche sul materiale così come campionato in situ, e per questo motivo sono state riferite a materiale indicato come "fresato 0/70".

**Tabella 2.** Risultati delle prove eseguite sui materiali granulari 0/70 e 0/25 (Cava Inerti Esino)

Grandezza	0/70	0/25
Distribuzione granulometrica	v. Allegato A	v. Allegato A
Indice di plasticità	n.d.	n.d.
Classificazione	A1-b	A1-b
Massa volumica apparente dei granuli (Mg/m <sup>3</sup> )	2,497	2,498
Massa volumica dei granuli pre-essiccati (Mg/m <sup>3</sup> )	2,409	2,407
Massa volumica dei granuli in condizioni s.s.a. (Mg/m <sup>3</sup> )	2,444	2,443
Assorbimento d'acqua dopo 24 ore (%)	1,5	1,5
Percentuale di superfici frantumate o spezzate (%)	22	23
Percentuale di superfici totalmente frantumate o spezzate (%)	78	77
Coefficiente Los Angeles (%)	24,2	24,1
Coefficiente di usura Micro-Deval (%)	32	32
Equivalente in sabbia (%)	64	64
Contenuto di CaCO <sub>3</sub> (%)	92,5	
Analisi mineralogico-petrografica	Sabbie e pietrisco derivanti dalla frantumazione di rocce sedimentarie carbonatiche con rari frammenti di selce (SiO <sub>2</sub> ), con percentuale stimata al 2-3%	

**Tabella 3.** Risultati delle prove eseguite sul materiale granulare 0/50 (Cava Gubbio)

Grandezza	0/50
Distribuzione granulometrica	v. Allegato A
Indice di plasticità	n.d.
Classificazione	A1-a
Massa volumica apparente dei granuli (Mg/m <sup>3</sup> )	2,720
Massa volumica dei granuli pre-essiccati (Mg/m <sup>3</sup> )	2,510
Massa volumica dei granuli in condizioni s.s.a. (Mg/m <sup>3</sup> )	2,585
Assorbimento d'acqua dopo 24 ore (%)	3,05
Percentuale di superfici frantumate o spezzate (%)	24
Percentuale di superfici totalmente frantumate o spezzate (%)	76
Coefficiente Los Angeles (%)	28,7
Coefficiente di usura Micro-Deval (%)	32
Equivalente in sabbia (%)	37
Contenuto di CaCO <sub>3</sub> (%)	83,2
Analisi mineralogico-petrografica	Sabbie e pietrisco derivanti dalla frantumazione di rocce sedimentarie carbonatiche con rari frammenti di selce (SiO <sub>2</sub> ), con percentuale stimata al 2-3%

**Tabella 4.** Risultati delle prove eseguite sulle campionature di fresato bituminoso 0/25 (Depositi Trocchetti e Collalto)

Grandezza	Trocchetti	Collalto
Distribuzione granulometrica	v. Allegato A	v. Allegato A
Distribuzione granulometrica post estrazione	v. Allegato A	v. Allegato A
Massa volumica apparente dei granuli (Mg/m <sup>3</sup> )	2,550	2,520
Massa volumica dei granuli pre-essiccati (Mg/m <sup>3</sup> )	2,487	2,490
Massa volumica dei granuli in condizioni s.s.a. (Mg/m <sup>3</sup> )	2,512	2,500
Assorbimento d'acqua dopo 24 ore (%)	1,0	0,5
Massa volumica apparente dei granuli (Mg/m <sup>3</sup> ) post -estrazione	2,662	n.d.
Massa volumica dei granuli pre-essiccati (Mg/m <sup>3</sup> ) post-estrazione	2,587	n.d.
Massa volumica dei granuli in condizioni s.s.a. (Mg/m <sup>3</sup> ) post-estrazione	2,615	n.d.
Assorbimento d'acqua dopo 24 ore (%) post estrazione	1,1	n.d.
Contenuto di legante sulla miscela (%)	2,40	3,81
Contenuto di legante sugli aggregati (%)	2,46	3,96

Per effetto dei risultati conseguiti nel corso della sperimentazione sopra sintetizzata, l'attività S3 ha consentito di verificare l'idoneità all'impiego dei materiali disponibili presso la Cava Gubbio (misto granulare) e presso il Deposito Collalto (fresato bituminoso).

Dei risultati sperimentali si è altresì tenuto conto nella redazione del nuovo articolo con il quale integrare le Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto, messo a punto nell'ambito dell'attività V10.

### **3.4 Progettazione, esecuzione e monitoraggio del campo prove #1 (Attività S4)**

Di concerto con Astaldi, si è provveduto alla progettazione di dettaglio di un primo campo prove (di seguito indicato come campo prove #1), principalmente finalizzato alla produzione e verifica di miscele granulari risultanti dal processo di frantumazione e polverizzazione operato in situ da macchina stabilizzatrice (pulvimixer).

Il campo prove, avente una lunghezza di circa 60 m, è stato ubicato in corrispondenza di un tratto dell'infrastruttura ove risultava già completata la realizzazione del rilevato. Tale area è preventivamente caratterizzata per quel che riguarda la portanza del sottofondo a mezzo di prove di carico su piastra di tipo statico. I relativi risultati sperimentali sono forniti nell'**Allegato B1**.

Prima dell'avvio delle operazioni di realizzazione del campo prove sono stati effettuati prelievi dai cumuli nei quali erano stoccati il materiale granulare (misto cava) e il fresato bituminoso. Tali materiali sono stati successivamente caratterizzati in laboratorio con la conseguente determinazione del contenuto d'acqua, della distribuzione granulometrica, delle masse volumiche e dell'assorbimento d'acqua. I relativi risultati sono forniti nell'**Allegato B2**.

Il campo prove è stato realizzato con tre strisce di stesa, tra di loro affiancate, indicate nella seguente **Tabella 5**, ove sono anche riportati i codici assegnati alle varie miscele (mantenuti anche per le successive miscele stabilizzate a cemento preparate in laboratorio e messe in opera nel campo prove #2).

**Tabella 5.** Strisce di stesa realizzate nel campo prove #1

Miscela	Composizione
1.1	100% misto cava
1.2	75% misto cava, 25% fresato
1.3	60% misto cava, 40% fresato

Una addizionale striscia di stesa, costituita unicamente da fresato bituminoso è stata realizzata nell'immediata vicinanza delle tre sopra descritte. Ciò al fine di poter disporre nelle successive attività di studio di laboratorio, di fresato bituminoso comminuito dalla macchina stabilizzatrice.



Le tre strisce del campo prove sono state preventivamente predisposte a mezzo della messa in opera, con pala caricatrice e grader, di uno spessore complessivo di materiale sciolto pari a 35 cm. Nel caso delle strisce relative ai materiali 1.2 e 1.3 detto spessore è stato raggiunto con la sovrapposizione di fresato e misto granulare, con spessori individuali ricavati a tenendo conto dei dosaggi obiettivo. Lo spessore iniziale di 35 cm è stato stimato da prove preliminari di laboratorio per tener conto dell'atteso cedimento durante le operazioni di compattazione. I relativi rapporti di prova sono riportati nell'**Allegato B3**. La verifica degli spessori iniziali e finali è avvenuta a mezzo di rilievi topografici eseguiti da personale tecnico incaricato da Astaldi.

Prima delle successive lavorazioni che hanno comportato il passaggio di macchina stabilizzatrice sulle strisce di stesa, sulle stesse sono state eseguite prove con attrezzatura DCP (Dynamic Cone Penetrometer). I relativi risultati sono riportati nell'**Allegato B4**.

I materiali messi in opera nel campo prove sono stati sottoposti all'azione di macchina stabilizzatrice imponendo un contenuto d'acqua dell'ordine del 4% (corrispondente a circa 20 l/m<sup>2</sup>), senza alcun apporto di cemento. Le strisce di stesa sono state successivamente sottoposte all'azione di compattazione di un rullo monotamburo BOMAG BW 219 DH-3 avente massa complessiva pari a 19,22 tonnellate. Per quel che concerne lo schema di compattazione, sono state eseguite 3 passate nella modalità vibrante (frequenza 30 Hz) seguite da 2 passate con frequenza ridotta e da una passata finale in modalità statica. In tutti i casi si è operato con una velocità di avanzamento dell'ordine dei 2,7-3,0 km/h.

Prima dell'esecuzione della compattazione sono stati effettuati prelievi delle miscele presenti nelle tre strisce per la successiva esecuzione di prove di laboratorio. In particolare, si è provveduto alla determinazione del contenuto d'acqua, della distribuzione granulometrica, delle masse volumiche e dell'assorbimento d'acqua. Per quel che riguarda le strisce 1.2 e 1.3, sono state inoltre eseguite prove per la determinazione della percentuale di legante bituminoso. I relativi risultati sono forniti nell'**Allegato B5**.

Ulteriori campionamenti delle miscele sono stati effettuati per l'esecuzione dello studio di mix design (attività S5) e per l'esecuzione delle prove di caratterizzazione avanzata (attività S6).

La verifica degli effettivi dosaggi di fresato nelle strisce 1.2 e 1.3 è stata eseguita prendendo in considerazione il contenuto di legante del fresato impiegato e delle miscele prelevate in situ. Gli esiti di tali controlli sono sinteticamente riportati in **Tabella 6**, dai quali si può dedurre che il dosaggio effettivo di fresato nel caso della miscela 1.2 si è avvicinato a quello obiettivo, mentre maggiori scostamenti si sono rilevati nel caso della miscela 1.3.

**Tabella 6.** Dosaggi di fresato delle miscele 1.2 e 1.3 del campo prove #1

Miscela	Dosaggio obiettivo (%)	Dosaggio effettivo (%)
1.2	25	26,9
1.3	40	32,2

Dopo il passaggio della macchina stabilizzatrice e prima della compattazione delle strisce sono state anche eseguite prove con attrezzatura DCP (Dynamic Cone Penetrometer). I relativi risultati sono riportati nell'**Allegato B6**.

Dopo il completamento delle operazioni di compattazione sono state ripetute le prove DCP, integrate da prove di carico su piastra di tipo statico e da prove per la determinazione della umidità e densità in situ. Sono stati inoltre eseguiti ulteriori prelievi per la determinazione della distribuzione granulometrica, delle masse volumiche e dell'assorbimento d'acqua. I relativi risultati sono riportati nell'**Allegato B7**.

### **3.5 Mix design delle miscele stabilizzate a cemento in situ (Attività S5)**

Lo studio di mix design delle miscele stabilizzate a cemento in situ è stato effettuato in laboratorio impiegando le miscele granulari sottoposte nel campo prove #1 all'azione di comminazione di macchina stabilizzatrice. È stato altresì impiegato cemento di tipo Portland 32,5 fornito da Astaldi.

Nella prima fase di mix design si sono preparate miscele con contenuto fisso di cemento (pari a 2, 3 e 4%) e con contenuto variabile d'acqua, con la conseguente preparazione di campioni Proctor (come da UNI EN 13286-50) per i quali si è determinata la densità secca. Si è così provveduto a rappresentare i risultati sperimentali nella forma della classica "curva Proctor", ossia nel piano  $w-\gamma_s$  (umidità – densità secca), per la determinazione dell'umidità ottima di addensamento ( $w_{ottima}$ ) e della corrispondente massima densità secca ( $\gamma_{s,max}$ ). Occorre precisare che i campioni Proctor sono stati preparati depurando le miscele del trattenuto ai 31,5 mm ed utilizzando fustelle aventi diametro 150 mm e altezza 120 mm. La compattazione è stata effettuata con la procedura "AASHTO modificata", che prevede la realizzazione di ciascun campione in 5 strati, sottoposti all'azione di 56 colpi di addensamento.

A scopo comparativo e al fine di avere elementi con i quali valutare i risultati conseguiti nel campo prove #1, sono stati anche preparati campioni Proctor con le miscele granulari senza alcuna aggiunta di cemento. In questo caso, si è potuto valutare l'umidità effettiva dei campioni a mezzo di specifiche prove eseguite dopo la compattazione.

Allo scopo di acquisire informazioni anche relativamente al comportamento meccanico delle miscele, i campioni Proctor delle miscele contenenti cemento sono stati posti a maturare in cella climatica per 7 giorni e successivamente sottoposti a prove di compressione semplice come da UNI-EN 13286-41.

I risultati conseguiti in questa prima fase dello studio di mix design sono forniti nell'**Allegato C** e sono sintetizzati nelle **Tabelle 7-9**. Si noti che per le due grandezze prese in esame ( $w_{ottima}$  e  $\gamma_{s,max}$ ) sono indicati sia i valori determinati sperimentalmente (relativi al materiale passante ai 31,5 mm) sia quelli corretti per tenere conto della presenza nella miscela – in situ – di elementi trattenuti allo staccio da 31,5 mm. Come noto, ai valori corretti si deve fare riferimento per l'effettiva realizzazione delle miscele in opera e per i controlli relativi al loro stato di addensamento.

**Tabella 7.** Umidità ottima di addensamento e massima densità secca delle miscele 1.1 considerate nello studio di mix design

	2% cemento		3% cemento		4% cemento	
	$w_{ottima}$	$\gamma_{s,max}$	$w_{ottima}$	$\gamma_{s,max}$	$w_{ottima}$	$\gamma_{s,max}$
Valori sperimentali	7,0	2,257	7,0	2,246	7,0	2,272
Valori corretti	5,87	2,278	5,87	2,269	5,87	2,290

**Tabella 8.** Umidità ottima di addensamento e massima densità secca delle miscele 1.2 considerate nello studio di mix design

	2% cemento		3% cemento		4% cemento	
	$w_{ottima}$	$\gamma_{s,max}$	$w_{ottima}$	$\gamma_{s,max}$	$w_{ottima}$	$\gamma_{s,max}$
Valori sperimentali	7,0	2,233	6,0	2,203	5,0	2,213
Valori corretti	6,42	2,246	5,52	2,219	4,61	2,228

**Tabella 9.** Umidità ottima di addensamento e massima densità secca delle miscele 1.3 considerate nello studio di mix design

	2% cemento		3% cemento		4% cemento	
	$w_{ottima}$	$\gamma_{s,max}$	$w_{ottima}$	$\gamma_{s,max}$	$w_{ottima}$	$\gamma_{s,max}$
Valori sperimentali	6,0	2,199	6,0	2,186	6,0	2,206
Valori corretti	5,22	2,225	5,22	2,214	5,22	2,231

Per effetto di quanto sopra riportato, si sono individuate le miscele stabilizzate a cemento in situ da prendere in considerazione per l'esecuzione del campo prove #2. Esse sono state denominate "miscele stabilizzate con composizione ottimizzata" e per ciascuna di esse sono stati preparati ulteriori 6 campioni Proctor che sono stati successivamente sottoposti, dopo una maturazione di 7 giorni, a prove per la determinazione della resistenza a compressione e a trazione indiretta (come da UNI EN 13286-41 e UNI EN 13286-42). I relativi risultati sperimentali, forniti nell'**Allegato C**, sono sintetizzati in **Tabella 10**.

**Tabella 10.** Caratteristiche compositive, meccaniche e volumetriche delle miscele stabilizzate a cemento con composizione ottimizzata

Miscela	w	%C	$\gamma_{s,max}$	Rc (MPa)	RTI (MPa)	$w_{corretta}$	$\gamma_{s,max}$ corretta
1.1	7,0	2,0	2,221	4,29	0,09	5,87	2,249
1.2	6,5	2,5	2,202	4,27	0,21	6,04	2,217
1.3	6,0	2,5	2,203	3,96	0,22	5,25	2,228

I risultati riportati in **Tabella 10** sono stati utilizzati per la preparazione dei campioni da sottoporre alle prove di caratterizzazione avanzata (attività S6),

nonché per la verifica delle caratteristiche di addensamento e di resistenza conseguite nell'ambito del campo prove #2 (attività S8). Dei tali risultati sperimentali si è altresì tenuto conto nella redazione del nuovo articolo con il quale integrare le Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto, messo a punto nell'ambito dell'attività V10.

### **3.6 Caratterizzazione avanzata delle miscele stabilizzate a cemento in situ con composizione ottimizzata (Attività S6)**

Le prove per la caratterizzazione avanzata delle miscele stabilizzate a cemento con composizione ottimizzata sono consistite nella determinazione, con apparecchiatura triassiale, del modulo resiliente ( $M_r$ ). Detta grandezza viene valutata in corrispondenza di vari stati di sollecitazione facendo opportunamente variare la pressione di confinamento in cella e il carico verticale applicato con legge sinusoidale (carico deviatorico).

I campioni da sottoporre alle prove sopra indicate sono stati preparati con pressa a taglio girevole in modo da raggiungere un valore obiettivo della densità secca pari al 98% della massima densità secca in precedenza determinato mediante lo studio Proctor. Prima dell'esecuzione delle prove, i campioni sono stati posti a maturare in cella climatica per 7 giorni.

I risultati delle prove di modulo resiliente sono riportati nell'**Allegato D**. La loro analisi di dettaglio, finalizzata alla quantificazione del comportamento non lineare, è stata effettuata nella successiva attività V7.

### **3.7 Modellazione del comportamento non lineare delle miscele stabilizzate a cemento in situ con composizione ottimizzata (Attività V7)**

Sulla base dei risultati sperimentali conseguiti nel corso dell'attività S6, è stata sviluppata la modellazione del comportamento non lineare delle miscele granulari stabilizzate a cemento in situ con composizione ottimizzata. Ciò allo scopo di disporre di modelli analitici da poter utilizzare nelle verifiche strutturali previste nell'ambito dell'attività V9.

I modelli analitici impiegati sono stati quelli di Hicks e Monismith e di Uzan, qui di seguito riportati:

$$M_r = k_1 \cdot p_a \cdot (\theta/p_a)^{k_2}$$

$$M_r = k_1 \cdot p_a \cdot (\theta/p_a)^{k_2} \cdot (\sigma_d/p_a)^{k_3}$$

ove:  $p_a$  è la pressione atmosferica;  
 $\theta$  è il primo invariante delle sollecitazioni;  
 $\sigma_d$  è la sollecitazione deviatorica;

k1, k2 e k3 sono parametri di modellazione, dipendenti dalle caratteristiche del materiale.

I risultati derivanti dalla modellazione dei dati sperimentali con le due leggi analitiche sopra indicate sono riportati nell'**Allegato E** e sono sintetizzati nella seguente **Tabella 11**. Essa contiene i valori medi dei parametri di modellazione, successivamente impiegati per la valutazione del comportamento sotto carico di sovrastrutture con stratigrafia ottimizzata (attività V9).

**Tabella 11.** Risultati della modellazione non lineare delle miscele ottimizzate

Miscela	Hicks-Monismith		Uzan		
	k1	k2	k1	k2	k3
1.1	1182	0.60	2446	-0.02	0.67
1.2	1148	0.66	2321	0.07	0.63
1.3	1378	0.60	2731	0.02	0.61

Dai dati di **Tabella 11** si evince che le tre miscele prese in esame sono caratterizzate da un comportamento significativamente non lineare, con simili valori del modulo resiliente. I valori calcolati dei parametri di modellazione sono in linea con quelli riportati in letteratura per simili materiali impiegati per la formazione di strati di fondazione e sottofondazione.

### 3.8 Progettazione, esecuzione e monitoraggio del campo prove #2 (Attività S8)

Il secondo campo prove previsto nell'ambito dello studio (di seguito indicato come campo prove #2) è stata progettato per poter riprodurre in vera grandezza le condizioni di posa in opera delle miscele granulari stabilizzate a cemento in situ avente composizione ottimizzata.

Il campo prove, avente una lunghezza di circa 60 m, è stato ubicato in continuità con in precedente campo prove #1, in un tratto dell'infrastruttura, compreso tra le pk 4+750 e 4+900, ove risultava già completato il rilevato. L'area del campo prove è stata preventivamente caratterizzata per quel che riguarda la portanza del sottofondo a mezzo di prove di carico su piastra di tipo dinamico (con Light Weight Drop Tester, per la determinazione del cosiddetto modulo dinamico  $E_d$ ). A titolo comparativo è stata inoltre eseguita una prova di carico su piastra di tipo dinamico sulla superficie del campo prove #1. I risultati sperimentali relativi a tutte queste prove sono forniti nell'**Allegato F1**.

Il campo prove #2 è stato realizzato con tre strisce di stesa, tra di loro affiancate, del tutto analoghe a quelle costituenti il campo prove #1. Ad esse sono stati assegnati i medesimi codici (1.1, 1.2 e 1.3) già indicati in **Tabella 5**. Il loro allestimento è avvenuto seguendo la medesima procedura già adottata in precedenza, con uno spessore dei materiali nello stato sciolto pari a 35 cm. La verifica degli spessori iniziali e finali è nuovamente avvenuta a mezzo di rilievi topografici eseguiti da personale tecnico incaricato da Astaldi.

Le operazioni di stabilizzazione delle miscele sono avvenute con l'impiego della medesima macchina stabilizzatrice impiegata nel campo prove #1, opportunamente modificando l'apporto di acqua per ottenere un'umidità prossima a quella di progetto per ciascuna miscela. Lo spandimento di cemento è avvenuto con apposito mezzo spandicalce. La taratura del mezzo è stata effettuata in situ, immediatamente prima del suo impiego.

Dopo il passaggio della macchina stabilizzatrice sono stati eseguiti alcuni prelievi di materiali sciolto delle tre miscele (1.1, 1.2 e 1.3) per la preparazione a piè d'opera di 3 campioni per ciascuna miscela compattati con la stessa metodologia Proctor impiegata nello studio di mix design di laboratorio. Tali campioni sono stati quindi conservati in ambiente umido e quindi trasferiti in laboratorio per la successiva esecuzione di prove di caratterizzazione meccanica. In particolare, dopo una stagionatura di 7 giorni in cella climatica mantenuta ad una umidità relativa del 99% e ad una temperatura di 25°C (come da prescrizioni di normativa), sono state eseguite prove di compressione semplice come da UNI EN 13286-41.

I risultati delle prove di compressione sopra citate sono riportati nell'**Allegato F2** e sintetizzati nella seguente **Tabella 12**, ove sono indicati i valori medi. A titolo di confronto sono inoltre indicati i corrispondenti valori di tale grandezza desunti dallo studio di mix design, già riportati nel **paragrafo 3.5**.

**Tabella 12.** Resistenza a compressione delle miscele ottimizzate

Miscela	R <sub>c</sub> (MPa)	
	Campo prove #2	Mix design
1.1	4,27	4,29
1.2	3,48	4,27
1.3	3,78	3,96

Dai dati di **Tabella 12** si evince che i valori resistenza a compressione ottenuti sui campioni preparati a piè d'opera sono risultati in linea con quelli dello studio di mix design.

Le operazioni di compattazione sono state effettuate con un rullo BOMAG BW 219 DH-3 avente massa complessiva pari a 19,22 tonnellate. Si tratta del medesimo rullo monotamburo impiegato per la realizzazione del campo prove #1, caratterizzato dalla possibilità di operare sia in regime statico, sia in regime dinamico (con frequenza di oscillazione pari a 30 Hz).

Per avere indicazioni circa la procedura ottimale di compattazione da adottare nella realizzazione dei lavori, nelle tre strisce di stesa si sono sperimentati due diversi schemi di compattazione, caratterizzati da passate differenziate in base al loro numero e alla modalità di applicazione del carico.

Tali schemi, indicati per semplicità come di “alta compattazione” e “bassa compattazione”, sono sinteticamente descritti in **Tabella 13**, ove è anche indicata l’ubicazione delle porzioni delle strisce nelle quali sono stati adottati (riferito alle sezioni del rilievo topografico). Occorre precisare che le passate cui fanno riferimento gli schemi di **Tabella 13** sono da intendersi come costituiti da un doppio ricoprimento realizzato a mezzo di un passaggio “in andata” e di uno “in ritorno”. Nel corso delle operazioni di compattazione, si è verificato che il rullo mantenesse una velocità piuttosto bassa, compresa nell’intervallo compreso tra 2.1 e 2.3 km/h.

**Tabella 13.** Schemi di compattazione adottati nel campo prove #2

Schema	Composizione	Ubicazione nel campo prove #2
“bassa compattazione”	2 passate in modalità vibrante (frequenza massima) 4 passate in modalità vibrante (frequenza minima) 2 passate in modalità statica	Lato nord (dalla sezione 115a alla sezione 115)
“alta compattazione”	2 passate in modalità vibrante (frequenza massima) 2 passate in modalità statica	Lato sud (dalla sezione 115 alla sezione 114.1)

Al termine delle operazioni di compattazione degli strati in misto stabilizzato a cemento, l’area del campo prove #2 è stata protetta con la posa in opera di teli di tessuto non tessuto. Questi ultimi sono stati bagnati con continuità per 72 ore in modo tale da garantire la piena maturazione degli strati anche in presenza di fenomeni di ventilazione e soleggiamento.

Come indicato in **Tabella 14**, sul campo prove #2 sono state eseguite prove in situ finalizzate alla determinazione, in funzione del tempo di maturazione, delle caratteristiche di addensamento e di portanza.

**Tabella 14.** Prove in situ previste sul campo prove #2

Tempo di stagionatura	Prove per valutazione della portanza	Prove per valutazione dell’addensamento
Circa 12 ore	Prova di carico statica Prova di carico con piastra battente	-
Circa 24 ore	Prova di carico statica Prova di carico con piastra battente	-
Circa 48 ore	Prova di carico con piastra battente	Densità di situ e percentuale di addensamento

I risultati delle prove eseguite per la determinazione delle caratteristiche di addensamento e di portanza sono integralmente riportati nell’**Allegato F3** e sono sintetizzate, con riferimento ai valori medi, nelle **Tablelle 15-18**.

**Tabella 15.** Moduli di deformazione ( $M_d$ , in MPa) per alta compattazione (AC) e bassa compattazione (BC) rilevati nel campo prove #2

Tempo di stagionatura	Miscela 1.1		Miscela 1.2		Miscela 1.3	
	BC	AC	BC	AC	BC	AC
Circa 12 ore	49,18	88,24	37,66	45,0	61,64	69,23
Circa 24 ore	63,38	91,84	104,65	147,54	187,50	200,00

**Tabella 16.** Moduli dinamici ( $E_d$ , in MPa) per alta compattazione (AC) e bassa compattazione (BC) rilevati nel campo prove #2

Tempo di stagionatura	Miscela 1.1		Miscela 1.2		Miscela 1.3	
	BC	AC	BC	AC	BC	AC
Circa 12 ore	40,0	30,7	57,6	49,8	54,9	51,5
Circa 24 ore	110,1	139,9	231,0	203,9	132,0	117,4
Circa 48 ore	142,8	189,4	239,2	230,0	154,1	156,7

**Tabella 17.** Densità secca in situ ( $\gamma_s$ , in g/cm<sup>3</sup>) per alta compattazione (AC) e bassa compattazione (BC) rilevati nel campo prove #2

Tempo di stagionatura	Miscela 1.1		Miscela 1.2		Miscela 1.3	
	BC	AC	BC	AC	BC	AC
Circa 48 ore	1,998	2,015	2,021	2,126	2,043	2,208

**Tabella 18.** Percentuali di addensamento (Add, in %) per alta compattazione (AC) e bassa compattazione (BC) rilevati nel campo prove #2

Tempo di stagionatura	Miscela 1.1		Miscela 1.2		Miscela 1.3	
	BC	AC	BC	AC	BC	AC
Circa 48 ore	88,8	89,6	91,2	95,9	91,7	99,1

Dai dati riportati nelle **Tablelle 15-18** risulta evidente che, come atteso, i due livelli schemi di compattazione adottati si sono tradotti in valori della densità secca e del grado di addensamento crescente passando dalla “bassa” alla “alta” compattazione. Tuttavia, la loro efficacia è risultata del tutto variabile a seconda della miscela presa in esame. In particolare, si sono ottenuti gradi di addensamento piuttosto modesti nel caso della miscela di riferimento 1.1, mentre nel caso della miscela 1.3 si sono raggiunti livelli di addensamento elevati, soprattutto nel caso dello schema di “alta” compattazione. Valori intermedi sono stati riscontrati nel caso della miscela 1.2.

L’insieme dei risultati sopra menzionati induce a ritenere che nel caso di impiego delle miscele 1.1 e 1.2, nel corso di realizzazione della pavimentazione si dovrà verosimilmente procedere ad un ulteriore affinamento dello schema di compattazione, probabilmente da modificare con un aumento del numero di passate del rullo monotamburo nella modalità vibrante.

I risultati relativi alle caratteristiche di portanza hanno evidenziato come ognuna delle 3 miscele abbia esibito una significativa evoluzione nel corso del tempo. In particolare, per ciò che riguarda il modulo di deformazione  $M_d$ , il classico valore di soglia dei 150 MPa è stato raggiunto e superato dopo 24 ore di maturazione solamente per la miscela 1.3. La miscela 1.2 ha raggiunto un valore prossimo a



tale limite nel caso di “alta” compattazione, mentre la miscela 1.1 non ha mai superato i 100 MPa, probabilmente a causa dei modesti livelli di addensamento.

Considerazioni differenti debbono essere fatte per quel che riguarda il modulo dinamico  $E_d$ . Tale grandezza, che pure ha evidenziato la progressiva maturazione degli strati, ha infatti raggiunto i valori più elevati per la miscela 1.2, mentre le restanti due miscele (1.1 e 1.3) hanno fornito simili risultati.

### **3.9 Verifica finale del comportamento strutturale di pavimentazioni stradali con stratigrafia ottimizzata (Attività V9)**

La verifica del comportamento strutturale delle pavimentazioni con stratigrafia ottimizzata, derivanti cioè dalla sostituzione del bi-strato fondazione-sottofondazione con un unico strato di fondazione in misto granulare stabilizzato a cemento in situ, è avvenuta mediante l'applicazione di un metodo di calcolo di tipo razionale. A tale scopo si sono tenuti in conto i risultati delle prove di caratterizzazione avanzata conseguiti nell'ambito delle attività S6 e V7, incentrate sulla valutazione e modellazione del comportamento non lineare sotto carico. Come nel caso delle valutazioni preliminari speditive sviluppate nel corso dell'attività V2, le analisi sono state effettuate in termini relativi, mettendo a confronto le prestazioni delle sovrastrutture ottimizzate con quelle della pavimentazione di progetto.

#### *3.9.1 Metodologia di calcolo*

La metodologia di calcolo razionale adottata è di tipo analitico ed è basata sulla schematizzazione della pavimentazione stradale come multi-strato elastico e sul conseguente calcolo del danno.

La pavimentazione viene schematizzata come costituita da un numero di strati variabile a seconda della tipologia esaminata. Il sistema risulta definito una volta che siano fissati, per ciascuno strato componente, lo spessore  $h_i$ , il modulo elastico  $E_i$  ed il rapporto di Poisson  $\nu_i$ . All'interno del multi-strato vengono inoltre definite le condizioni di adesione che si verificano alle interfacce che separano i vari strati: queste possono corrispondere, a seconda dei casi, a condizioni di totale adesione, di totale slittamento o a condizioni intermedie comprese tra questi estremi.

Questo tipo di schematizzazione, supportato dall'impiego di un idoneo codice di calcolo, consente di pervenire alla valutazione dello stato tenso-deformativo indotto in un qualsiasi punto del multi-strato per effetto di un carico, applicato sulla superficie, che sia simulativo di quello indotto da un veicolo in transito.

Poiché le pavimentazioni in esercizio vengono sottoposte alle sollecitazioni indotte da una molteplicità di assi differenti, risulta di particolare utilità che

questi ultimi vengano ricondotti ad un unico asse di riferimento standard. Esso viene di norma scelto come quello originariamente adottato nell'ambito dell'*AASHO Road Test* e nelle sue successive elaborazioni, caratterizzato da un carico pari a 80 kN applicato alla pavimentazione a mezzo di ruote gemellate (con pressione di gonfiaggio pari a 577,4 kPa).

Per la valutazione del danno indotto all'interno della pavimentazione si fa riferimento a criteri limite che definiscono il raggiungimento delle condizioni ultime in termini di vari dissesti caratteristici della pavimentazione. Tali criteri, che debbono necessariamente tenere conto delle specifiche caratteristiche dei materiali impiegati, sono espressi come funzioni che legano il numero di applicazioni ammissibili del carico con l'entità della deformazione indotta, valutata in punti caratteristici della sovrastruttura. Essi di norma assumono la forma di seguito indicata:

$$N_f = f_1 \cdot \varepsilon_t^{-f_2} \cdot E_{cgl}^{-f_3} \text{ nel caso della fessurazione per fatica}$$

$$N_d = f_4 \cdot \varepsilon_c^{-f_5} \text{ nel caso di ormaiamento}$$

ove:  $N_f$  è il numero di applicazioni ammissibili, fino al raggiungimento delle condizioni limite in termini di fessurazione a fatica, del carico che induce nella sovrastruttura una deformazione di trazione  $\varepsilon_t$  alla base dello strato in conglomerato bituminoso avente modulo elastico  $E_{cgl}$ ;  
 $f_1$ ,  $f_2$  ed  $f_3$  sono coefficienti caratteristici del criterio limite che possono tenere conto della natura dei materiali;  
 $N_d$  è il numero di applicazioni ammissibili, fino al raggiungimento delle condizioni limite in termini di ormaiamento, del carico che induce nella sovrastruttura una deformazione di compressione  $\varepsilon_c$  sulla superficie dello strato per il quale si vuole controllare l'accumulo di deformazioni permanenti;  
 $f_4$  ed  $f_5$  sono coefficienti caratteristici del criterio limite che possono tenere conto della natura dei materiali.

Il danneggiamento unitario indotto da un singolo passaggio dell'asse di riferimento viene semplicemente calcolato come reciproco di  $N_f$  o di  $N_d$ . Nel caso di confronto tra più sovrastrutture, si può poi introdurre il concetto di "danno relativo" (DR), dato dal rapporto tra i danneggiamenti unitari delle due pavimentazioni. È evidente che le condizioni di equivalenza strutturale tra due diverse stratigrafie corrispondono a valori del danno relativo prossimi all'unità. In termini pratici, tali condizioni possono essere dunque associate a valori di DR compresi tra 0,90 e 1,10.

L'approccio sopra illustrato risulta particolarmente efficace in quanto non dipende né dalle stime del traffico di progetto, né dalle assunzioni fatte per ciò

che concerne le condizioni ambientali (ed in particolare per quel che riguarda la temperatura degli strati legati a bitume).

### 3.9.2 Pavimentazioni sottoposte a valutazione

Le valutazioni riguardanti il comportamento strutturale, ed in particolare il danno relativo, sono state effettuate per le pavimentazioni caratterizzate dalle stratigrafie riportate in **Tabella 19**. Per le stratigrafie ottimizzate si sono considerati i tre casi corrispondenti alla messa in opera delle miscele 1.1 (100% misto cava), 1.2 (25% di fresato bituminoso e 75% di misto cava) e 1.3 (40% di fresato bituminoso e 60% di misto cava).

**Tabella 19.** Stratigrafie delle sovrastrutture sottoposte a valutazione strutturale

Stratigrafia di progetto	Stratigrafie ottimizzate
Strato di usura in conglomerato bituminoso: spessore cm 4	Strato di usura in conglomerato bituminoso: spessore cm 4
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso: spessore cm 4	Strato di collegamento in conglomerato bituminoso: spessore cm 4
Strato di base in conglomerato bituminoso: spessore cm 8	Strato di base in conglomerato bituminoso: spessore cm 8
Strato di fondazione in materiale misto cementato: spessore cm 20	Strato di fondazione in materiale granulare stabilizzato a cemento in situ: spessore cm 30
Strato di sottofondazione in materiale misto granulare: spessore cm 20	-
Sottofondo	Sottofondo

### 3.9.3 Caratteristiche meccaniche dei materiali

#### Terreno di sottofondo

Nella metodologia di calcolo adottata il terreno di sottofondo viene schematizzato come un semi-spazio elastico omogeneo ed isotropo la cui risposta sotto carico è definita in funzione dei valori assunti dal modulo elastico (E) e dal rapporto di Poisson ( $\nu$ ).

Ai fini della stima del modulo elastico si è utilizzata la seguente relazione normalmente considerata nella pratica progettuale, del tutto coerente con le assunzioni fatte per modulo resiliente ( $M_r$ ) nell'ambito dei calcoli di dimensionamento della pavimentazione riportati nella Relazione Tecnica Generale del Progetto Esecutivo:

$$E = 2,0 \cdot M_d$$

ove: E è il modulo elastico del sottofondo considerato come semispazio sottoposto a sollecitazioni di tipo dinamico;

$M_d$  è il modulo di deformazione del sottofondo desunto da prove di carico su piastra.

Poiché nelle Norme Tecniche è previsto che il modulo di deformazione valutato alla base dello strato di sottofondazione sia non inferiore a 50 MPa, nei calcoli strutturali si è potuto ipotizzare un modulo elastico pari a 100 MPa. Per la stima del rapporto di Poisson, per la quale non sono disponibili affidabili modelli analitici, alla luce di quanto riportato in letteratura si è assunto un valore pari a 0,45.

#### Misto granulare di sottofondazione

Per il misto granulare costituente la sottofondazione della pavimentazione nella stratigrafia proposta nell'ambito del Progetto Esecutivo, il modulo elastico da assumere nei calcoli strutturali è stato desunto dall'impiego della seguente espressione proposta da Heukelom e Klomp:

$$E_{mg} = 0,2 \cdot h^{0,45} \cdot E$$

ove:  $E_{mg}$  è il modulo elastico dello strato in misto granulare;  
 $h$  è lo spessore dello strato in misto granulare, espresso in mm;  
 $E$  è il modulo elastico del sottofondo sul quale poggia lo strato in misto granulare.

Tale espressione, inclusa nel *Shell Pavement Design Manual*, consente di tenere indirettamente conto del comportamento non lineare del misto granulare. Per un modulo del sottofondo pari a 100 MPa e per uno spessore della sottofondazione pari a 20 cm si perviene ad un valore stimato del modulo elastico pari a 217 MPa. Per il materiale granulare di tipo standard costituente la sottofondazione si è assunto un valore del rapporto di Poisson pari a 0,40.

#### Misce granulari stabilizzate a cemento in situ

Per il caso specifico dei misti granulari stabilizzati a cemento in situ, le valutazioni relative al valore del modulo elastico da assumere nei calcoli strutturali sono state effettuate sulla base dei risultati conseguiti nell'ambito delle attività sperimentali e di modellazione S6 e V7. In particolare, sono stati presi in considerazione i valori desunti dall'applicazione del modello di Hicks-Monismith in corrispondenza di due livelli di sollecitazione globale, ossia per due diversi valori del primo invariante degli sforzi. Il livello di sollecitazione più elevato (corrispondente ad un valore di  $\theta$  pari a 0,650 MPa) è stato considerato rappresentativo della porzione di fondazione più vicina alla superficie della pavimentazione, mentre il livello di sollecitazione minore ( $\theta$  pari a 0,300 MPa) è stato associato alla porzione inferiore dello strato di fondazione. Il rapporto di

Poisson del misto cementato è stato assunto, in mancanza di informazioni specifiche e/o sperimentazioni di supporto, pari a 0,25.

### Conglomerati bituminosi

Per quel che riguarda i conglomerati bituminosi, data la natura comparativa dei calcoli effettuati, non si sono applicati specifici modelli per la stima del loro modulo elastico in funzione di composizione, temperatura e frequenza di sollecitazione. Piuttosto, sono stati presi in considerazione diversi valori di riferimento (compresi tra 3000 e 8000 MPa) in corrispondenza dei quali sono state poi sviluppati i calcoli del danno relativo. Benché a rigore il rapporto di Poisson dei conglomerati bituminosi sia dipendente dalla temperatura e dalla frequenza di sollecitazione, poiché i valori assunti da quest'ultimo non influenzano in maniera eccessiva il comportamento tenso-deformativo del multistrato in cui sono inclusi, nei calcoli si è assunto il valore standard cui normalmente si fa riferimento sia nella pratica progettuale sia nella sperimentazione di laboratorio, pari a 0,35.

#### *3.9.4 Valutazione del comportamento strutturale e del danno relativo*

Per la valutazione del comportamento strutturale delle sovrastrutture prese in esame si è utilizzato il codice di calcolo BISAR. Facendo riferimento alla configurazione di carico corrispondente all'asse standard, lo stato tenso-deformativo indotto nella pavimentazione, così come il danno relativo, è stato valutato in corrispondenza di due verticali: una passante per il centro di una delle due aree di impronta; l'altra passante per il punto intermedio tra di esse. Per quel che riguarda le condizioni di interfaccia, si è ipotizzato il raggiungimento di condizioni di perfetta aderenza tra gli strati.

I criteri limite utilizzati per la valutazione del danno relativo sono stati tratti dalla letteratura tecnica del settore. In particolare, si è fatto riferimento a quelli dell'*Asphalt Institute*, del *Shell Pavement Design Manual*, e del manuale sudafricano *SAMDM*. Questi ultimi risultano di particolare rilevanza in quanto trattano in maniera esaustiva il comportamento di strati "debolmente legati a cemento" (indicati come *lightly cemented materials*), evidenziando come gli stessi esibiscano nel corso del tempo una significativa evoluzione che può portare, in ultimo, ad un comportamento analogo a quello dei misti granulari non legati.

Facendo riferimento ai criteri limite sopra citati, si è valutato il danno relativo corrispondente ai due classici dissesti considerati nel calcolo delle pavimentazioni (fessurazione a fatica degli strati legati a bitume e ormaiamento per accumulo di deformazioni permanenti nel sottofondo e nei misti granulari). Il danno relativo è stato altresì valutato per gli strati contenenti cemento (misto cementato e misti stabilizzati a cemento in situ) facendo riferimento alla loro

rottura per fatica e all'eventuale insorgere di fenomeni di frantumazione (*crush initiation*).

I calcoli effettuati seguendo l'approccio sopra illustrato hanno condotto a valori del danno relativo compresi nell'intervallo 0,90-1,10. Per quanto detto in precedenza, ciò evidenzia come le sovrastrutture prese in esame siano sostanzialmente equivalenti, garantendo le medesime prestazioni in esercizio.

Per effetto di quanto rilevato, si può dunque concludere che nella perizia di variante progettuale in via di predisposizione da parte di Astaldi, si potrà fare riferimento alle soluzioni ottimizzate prese in esame nel corso del presente studio.

### **3.10 Integrazione alle Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto (Attività V10)**

Tenendo conto dei risultati conseguiti nelle precedenti attività sperimentali e di modellazione, è stato predisposto un articolo con il quale integrare le Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto del Progetto Esecutivo. Tale articolo redatto in una forma del tutto analoga a quelli già presenti, tratta della formazione di una "Fondazione in misto granulare stabilizzato a cemento in situ".

L'articolo di cui sopra, denominato 1.1.3 in continuità con la numerazione delle Norme Tecniche in vigore, si discosta dall'articolo 1.1.2 relativo ai misti cementati confezionati in centrale. In particolare, pur mantenendo il medesimo intervallo di accettazione dei valori di resistenza a compressione dopo 7 giorni di maturazione (compreso tra 2,5 e 4,5 MPa), non condiziona l'accettazione stessa al rispetto di un fuso granulometrico né di un intervallo di accettazione della resistenza a trazione indiretta (richiesta, ma non condizionante, così come previsto nelle Norme Tecniche adottate in ambito internazionale). L'articolo arricchisce inoltre l'insieme delle prove ritenute necessarie per la qualifica dei materiali componenti, richiede l'esecuzione di prove di modulo resiliente in cella triassiale sulle miscele stabilizzate, e introduce alcune nuove prove in situ, basate sull'impiego della piastra dinamica (Light Weight Drop Tester) e del DCP (Dynamic Cone Penetrometer).

Il testo completo dell'articolo è fornito nell'**Allegato G**.

## **4. Conclusioni**

Sulla base degli esiti delle indagini e analisi illustrate nella presente Relazione Tecnica si può concludere che sussistono le condizioni affinché Astaldi proceda alla predisposizione di una perizia di variante progettuale relativa alla pavimentazione stradale della Pedemontana delle Marche – Lotto funzionale del

sub lotto 2.1 – Tratta Fabriano - Matelica Nord. In particolare, potrà essere proposta l'ottimizzazione della sovrastruttura stradale, prevedendo la sostituzione del bi-strato di sottofondazione e fondazione avente spessore complessivo di 40 cm con un unico strato di fondazione, di spessore pari a 30 cm, realizzato mediante stabilizzazione a cemento in situ. Per tale strato si è dimostrata la fattibilità di impiegare fresato bituminoso con dosaggio non superiore al 40%.


Si intende che l'affidabilità della soluzione ottimizzata risulta dipendente dalla attenta selezione dei materiali e dai controlli di qualità che dovranno essere necessariamente eseguiti in corso d'opera. A tale scopo, nell'ambito dello studio è stato anche messo a punto uno specifico articolo con il quale integrare le Norme Tecniche del Capitolato Speciale d'Appalto.

Non si ritiene vi siano motivi tecnici che possano precludere l'approvazione della perizia di cui sopra da parte delle Autorità competenti. È però consigliabile che all'atto dell'inizio delle lavorazioni, da eseguirsi secondo la nuova soluzione adottata, Astaldi provveda a ulteriori verifiche e analisi che vadano a confermare quanto emerso nel corso del presente studio. In particolare, potranno essere messi a punto in maniera più puntuale gli schemi di compattazione e potranno essere eventualmente introdotte alcune migliorie nella formulazione delle miscele.

Si auspica infine che nel futuro la pavimentazione di nuova realizzazione sia sottoposta ad un attento monitoraggio del comportamento strutturale e delle relative prestazioni.

Fano (PU), 31/07/2020

prof. Ezio Santagata



prof. Felice A. Santagata

