

SISTEMA DI TRASPORTO PUBBLICO DI TIPO FILOVIARIO

GARA D'APPALTO PER LA PROGETTAZIONE ESECUTIVA,
L'ESECUZIONE DEI LAVORI E LA FORNITURA DEI VEICOLI

OFFERTA TECNICA
B2 - PROGETTO DEFINITIVO



PROGETTO:

OPERE STRADALI
PROGETTO DEL CANALE STRADALE
Pavimentazioni
Relazione di calcolo

CONCORRENTE
ATI:

SOVECO
COSTRUZIONI SPA

**CONSORZIO COOPERATIVE COSTRUZIONI
CCC**
Società cooperativa
(MANDATARIA/CAPOGRUPPO)

APTS
Advanced Public
Transport Systems bv

ALPIQ
Alpiq InTec Verona S.p.A.

MAZZI
Impresa Generale Costruzioni
S.p.A.

**Balfour Beatty
Rail**

SCALA	-
RIF. N°	PD80106RS01A.doc
ALLEGATO N°	PD 80106 RS01A

PROGETTAZIONE
COSTITUENDO R.T.P.:



(MANDATARIA/CAPOGRUPPO)

DIRETTORE TECNICO

Dott. Ing. Massimo Raccosta



DIRETTORE TECNICO

Dott. Arch. Valentina Butterini

REV.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORAZIONE	REDATTO	VISTO	APPROVATO
A	Dic. 2010	Emissione	Technital	Sorio	Fresia	Renso

Il presente documento non potrà essere copiato, riprodotto o altrimenti pubblicato, in tutto o in parte, senza il consenso scritto. Ogni utilizzo non autorizzato sarà perseguito a norma di legge.
This document may not be copied, reproduced or published, either in part or entirely, without the written permission. Unauthorized use will be prosecuted by law.

Indice

1. STRADE ESISTENTI	4
2. TRAFFICO	6
3. TIPOLOGIE DELLA SOVRASTRUTTURA	8
3.1. INTRODUZIONE	8
3.2. PAVIMENTAZIONI PRESCELTE	8
3.2.1. <i>Pacchetto A-Sr : flessibile spessori ridotti</i>	8
Tabella 3: <i>tipologia di pacchetto A-Sr: pavimentazione flessibile con spessori ridotti.</i>	9
3.2.2. <i>Pacchetto A1-Sr: flessibile spessori ridotti con stabilizzato 10cm</i>	9
Tabella 4: <i>tipologia di pacchetto A1-Sr: pavimentazione flessibile con spessori ridotti e fondazione di 10 cm.</i>	10
3.2.3. <i>Pacchetto A: pacchetto flessibile con base rinforzata e stabilizzato 20cm</i>	11
Tabella 5: <i>tipologia di pacchetto A flessibile per fermata e fine corsa.</i>	11
3.2.4. <i>Pacchetto A1: fondazione in stabilizzato granulometrico di 10 cm</i>	12
Tabella 6: <i>tipologia di pacchetto A1 per fermata con fondazione in stabilizzato di 10 cm.</i>	12
3.2.5. <i>Pacchetto C : base in Misto Cementato</i>	13
Tabella 7: <i>tipologia di pacchetto C: base in Misto Cementato e fondazione di 20 cm in stabilizzato granulometrico.</i>	13
3.2.6. <i>Pacchetto C1: con soletta in cls pre-esistente</i>	14
Tabella 8: <i>tipologia di pacchetto C1: con soletta in cls pre-esistente.</i>	14
3.3. SOLUZIONI ALTERNATIVE	15
3.3.1. <i>Pacchetto B - S : pavimentazione con base in Misto Cementato</i>	15
Tabella 9: <i>tipologia di pacchetto B-S: pavimentazione semirigida con base in Misto Cementato di 20 cm.</i>	15
3.3.2. <i>Pacchetto B1-S : pavimentazione con base in Misto Cementato e 10 cm di stabilizzato</i>	16
Tabella 10: <i>tipologia di pacchetto B1-s: semirigida con fondazione di 10 cm.</i>	16
3.3.3. <i>Pacchetto A - Sc : pavimentazione flessibile con stabilizzato Schiumato e Cemento</i>	17
Tabella 11: <i>tipologia di pacchetto A-Sc: fondazione in stabilizzato Schiumato e Cemento.</i>	17
3.3.4. <i>Pacchetto A1 - Sc : pavimentazione flessibile con stabilizzato Schiumato e Cemento</i>	18
Tabella 12: <i>tipologia di pacchetto A1-Sc: fondazione di 10 cm in Schiumato e Cemento.</i>	18
3.3.5. <i>Pacchetto C2: Pacchetto in Pavè con base ad alto modulo e fondazione in Misto Cementato</i>	19
Tabella 13: <i>tipologia di pacchetto C2: pavimentazione rigida con base in C.B. alto modulo.</i>	19
4. DESCRIZIONE DELLE SCELTE PROGETTUALI	20
4.1. INTRODUZIONE	20
4.2. MISTO GRANULOMETRICO STABILIZZATO	24
4.2.1. <i>Descrizione</i>	24
4.2.2. <i>Materiali inerti</i>	25
4.2.3. <i>Modalità esecutive</i>	26

4.2.4.	<i>Controllo delle lavorazioni</i>	26
4.3.	MISTO CEMENTATO	27
4.3.1.	<i>Descrizione</i>	27
4.3.2.	<i>Materiali inerti</i>	27
4.3.3.	<i>Legante idraulico</i>	28
4.4.	CONGLOMERATO BITUMINOSO AD ALTO MODULO PER STRATI DI BASE E COLLEGAMENTO	28
4.4.1.	<i>Descrizione</i>	28
4.4.2.	<i>Materiali inerti</i>	29
4.4.3.	<i>Legante – bitume modificato Warm ad alto modulo</i>	30
4.4.4.	<i>Miscele</i>	31
4.4.5.	<i>Controllo dei requisiti di accettazione</i>	33
4.4.6.	<i>Formazione e confezione delle miscele</i>	34
4.4.7.	<i>Posa in opera delle miscele</i>	35
4.5.	MISTO GRANULOMETRICO STABILIZZATO TRATTATO CON SCHIUMATO E CEMENTO	36
4.5.1.	<i>Descrizione</i>	36
4.5.2.	<i>Materiali inerti</i>	36
4.5.3.	<i>Bitume schiumato</i>	37
4.5.4.	<i>Cemento</i>	37
4.5.5.	<i>Acqua</i>	37
4.5.6.	<i>Miscele</i>	38
4.5.7.	<i>Modalità esecutive</i>	39
4.5.8.	<i>Controllo delle lavorazioni</i>	39
4.6.	CONGLOMERATO BITUMINOSO PER STRATI DI USURA ANTISDRUCCIOLO SMA	41
4.6.1.	<i>Descrizione</i>	41
4.6.2.	<i>Materiali inerti</i>	41
4.6.3.	<i>Legante – bitume modificato warm tipo hard</i>	42
4.6.4.	<i>Fibre</i>	43
4.6.5.	<i>Miscele</i>	43
4.6.6.	<i>Controllo dei requisiti di accettazione</i>	44
4.6.7.	<i>Formazione e confezione delle miscele</i>	45
4.6.8.	<i>Preparazione del piano di posa</i>	45
4.6.9.	<i>Posa in opera delle miscele</i>	46
4.6.10.	<i>Requisiti di accettazione della superficie viabile</i>	47
5.	CALCOLO DELLE SOVRASTRUTTURE STRADALI	47
5.1.	INTRODUZIONE	47
5.2.	CARICHI, TRAFFICO E DEFLESSIONI AMMISSIBILI	49
5.3.	DESCRIZIONE PROPRIETÀ DEI MATERIALI	50
5.3.1.	<i>Conglomerati bituminosi</i>	50
5.3.2.	<i>Sottofondo per materiali in posto esistenti</i>	51

5.3.3.	<i>Misto Cementato e Stabilizzato E.B schiumata e cemento</i>	52
5.4.	VERIFICHE DELLE SOVRASTRUTTURE	53
5.4.1.	<i>Introduzione</i>	53
5.4.2.	<i>Tipologia A, A1</i>	53
5.4.3.	<i>Tipologia A-Sr, A1-Sr</i>	54
5.4.4.	<i>Tipologia A-sc, A1-sc</i>	55
5.4.5.	<i>Tipologia B-s, B1-s</i>	56
5.5.	ANALISI RISULTATI BACKCALCULATION FWD	57
5.5.1.	<i>Scelta delle sezioni tipo per il calcolo</i>	58
5.5.2.	<i>Analisi dei risultati: moduli elastici e spessori</i>	59

1. STRADE ESISTENTI

Analizzando lo stato di fatto delle sovrastrutture attuali il 94% della totale rete interessata dalla filovia presenta una sovrastruttura flessibile o semirigida, mentre il restante 6% è in masselli.

Lo stato delle pavimentazioni esistenti, desunto sulla base di un sopralluogo qualitativo, è spesso mediocre.

Gli studi condotti hanno portato alla definizione di nuovi pacchetti di pavimentazione, che rispondono pienamente alle esigenze e prescrizioni progettuali, debitamente identificati come tipologia A o B. Tra i due è stata scelta la tipologia A in quanto verifica in maniera più ampia e soddisfacente le verifiche a fatica.

Le percentuali di ripartizione delle tipologia proposte sono basate su una analisi dei percorsi delle singole linee riportate nelle tabelle di seguito (Tabella 1, 2). Nelle stesse tabelle sono elencati i tipologici attuali (CB: conglomerato bituminoso, MS: masselli) nonché lo stato delle pavimentazioni esistenti (lettere variabili da A fino a D). :

Linea 1A					Linea 1B				
Lung. (m)	Tip. Attuale	St. Attuale	Tip. Proposta	Nome VIA (linea 1A)	Nome VIA (linea 1B)	Lung. (m)	Tip. Attuale	St. Attuale	Tip. Proposta
	/	/		/	Via Frà Giocondo	150	CB	B	A-Sr
	CB	AB	A-Sr	Piazzale XXV Aprile	Via Andrea Palladio	950	CB	BC	A-Sr
220	CB	B	A-Sr	Viale Girolamo Cardinale		220	CB	B	A-Sr
230	CB	AB	A-Sr	Via Città di Nimes		230	CB	AB	A-Sr
60	MS	BC	C	Piazza Renato Simoni		60	MS	BC	C
90 - 170	MS - CB	C - B	C/A-Sr	Via G.M. Giberti		90 - 170	MS - CB	C - B	C/A-Sr
180	CB	AB	A-Sr	Via della Valverde		180	CB	AB	A-Sr
180	CB	A	A-Sr	Piazza Pradoval		180	CB	A	A-Sr
70 - 120	CB - MS	AB - B	A-Sr/C1	Corso Porta Nuova		70 - 120	CB - MS	AB - B	A-Sr/C1
220 - 110	MS - CB	B - B	C1/A-Sr	Via degli Alpini		220 - 110	MS - CB	B - B	C1/A-Sr
150	CB	B	A-Sr	Stradone Scipione Maffei		150	CB	B	A-Sr
400	CB	B	A-Sr	Stradone San Fermo		400	CB	B	A-Sr
110	CB	B	A-Sr	Ponte Navi		110	CB	B	A-Sr
150	CB	A	A-Sr	Via San Paolo		150	CB	A	A-Sr
850	CB	B	A-Sr	Via XX settembre		850	CB	B	A-Sr
70	CB	B	A-Sr	Salita San Sepolcro		70	CB	B	A-Sr
350	CB	BC	A-Sr	Via Filippo Rosa		350	CB	BC	A-Sr
850	CB	B	A1-Sr	Via A. Pisano		850	CB	B	A1-Sr
350	CB	B	A1-Sr	Via G. Verardo Zeviani		350	CB	B	A1-Sr
190	CB	B	A1-Sr	Via A. Mondadori	Via del Capitel	250	CB	AB	A1-Sr
550	CB	B	A1-Sr	Via G. Corsini	Via Girolamo della C.	700	CB	B	A1-Sr
500	CB	AB	A1-Sr	Via A. Cernisone	Via Guido D'arezzo	400	CB	AB	A-Sr
650	CB	AB	A1-Sr	Via A. Fedeli	Rondò della Corte		CB	B	A-Sr
190	CB	AB	A1-Sr	Via Augusto Caperle	/				
220	CB	BC	A-Sr	Via Marmolada	/				
550	CB	AB	A-Sr	Via Dolomiti	/				
	D			Parceggio	/				

CB = Conglomerato Bituminoso, MS = Masselli o San Pietrini

A = Pavimentazione in buone - ottime condizioni
 B = pavimentazione in mediocri discrete condizioni
 C = Pavimentazione in cattive condizioni con oramie e segni di cedimento strutturale
 D = Pavimentazione mancante

Tabella 1: schematizzazione piani di intervento linee 1A e 1B.

Linea 2A					Linea 2B				
Lung. (m)	Tip. Attuale	St. Attuale	Tip. Proposta	Nome VIA (linea 2A)	Nome VIA (linea 2B)	Lung. (m)	Tip. Attuale	St. Attuale	Tip. Proposta
210	CB	AB	A1-Sr	Via Tunisi	/		/	/	
200	CB	B	A1-Sr	Via Comacchio	/		/	/	
100	CB	D	A1-Sr	Via Comacchio	/		/	/	
100	CB	B	A1-Sr	Via Comacchio	/		/	/	
650	CB	A	A1-Sr	Via San Giacomo	/		/	/	
300	CB	B	A1-Sr	Via Volturmo	Parcheggio Dep.			D	A
450	CB	C	A1-Sr	Via Scuderlando	Viale delle Nazioni	1500	CB	B - AB	A1-Sr
350	CB	B	A1-Sr	Viale Dell'Agricoltura	Viale del Lavoro	1700	CB	AB	A1-Sr
500	CB	B	A1-Sr	Viale del Lavoro (A-B)		500	CB	B	A1-Sr
500	CB	A	A1-Sr	Viale della Fiera (B-A)		500	CB	A	A1-Sr
950	CB	A	A1-Sr	Viale del Piave		950	CB	A	A1-Sr
290	CB	B	A1-Sr	Piazzale di Porta Nuova (A-B)		290	CB	B	A1-Sr
200	CB	AB	A1-Sr	P. Porta N. - Viale Piave (B-A)		200	CB	AB	A1-Sr
100	CB	B	A-Sr	Piazzale XXV Aprile		100	CB	B	A-Sr
250	CB	B	A-Sr	Viale Girolamo Cardinale (A-B)		250	CB	B	A-Sr
450	CB	B	A-Sr	Piazzale XXV Aprile (B-A)		450	CB	B	A-Sr
300	CB	AB	A-Sr	Città di Nimes		300	CB	AB	A-Sr
60	MS	BC	C	Piazza R. Simoni		60	MS	BC	C
140	MS - CB	BC - B	A1-Sr	Via G. della Casa		140	MS - CB	BC - B	A1-Sr
280	CB	B	A-Sr	V. carmelitani Scalzi		280	CB	B	A1-Sr
300	CB	B	A-Sr	Stradone Porta Palio		300	CB	B	A1-Sr
200	MS	AB	C	Corso castelvechio		200	MS	AB	C
350	MS	AB	C	Corso Cavour		350	MS	AB	C
110	MS	AB	C	Via Armando Diaz		110	MS	AB	C
130	MS	A	C	Ponte Vittoria		130	MS	A	C
40	CB	A	A	Piazza Cadorna		40	CB	A	A
500	CB	A	A-Sr	Via 4 Novembre		500	CB	A	A-Sr
170	CB	A	A-Sr	Piazza Vittorio Veneto		170	CB	A	A-Sr
300	CB	AB	A-Sr	Via 24 Maggio		300	CB	AB	A-Sr
110	CB	AB	A-Sr	Piazzale Aristide Stefani		110	CB	AB	A-Sr
100	CB	AB	A-Sr	Via E. Bassini		100	CB	AB	A-Sr
1100	CB	A	A1-Sr	Via Goffredo Mameli		1100	CB	A	A1-Sr
180	CB	A	A1-Sr	Via Trento		180	CB	A	A1-Sr
300	CB	AB	A1-Sr	Via Cà di Cozzi		300	CB	AB	A1-Sr
10270				Cà di Cozzi		11110			

CB = Conglomerato Bituminoso, MS = Masselli o San Pietrini

A = Pavimentazione in buone - ottime condizioni

B = pavimentazione in mediocri discrete condizioni

C = Pavimentazione in cattive condizioni con oramie e segni di cedimento strutturale

D = Pavimentazione mancante

Tabella 2: schematizzazione piani di intervento linee 2A e 2B.

2. TRAFFICO

Per quanto riguarda il numero di assi equivalenti cumulati durante la "vita utile" stabilita in 30 anni, AMT ha fornito indicazioni circa le frequenze orarie nell'arco dell'anno solare.

Le linee tramviarie delle tratte stradali sono quattro e precisamente:

- "1A" - Parking San Michele-Stazione Porta Nuova, lunghezza 8 Km, frequenza 1 corsa ogni 6 minuti;
- "1B" - Rondò dalla Corte-Stadio, lunghezza 8 Km, frequenza 1 corsa ogni 8 minuti;
- "2A" - H Borgo Roma-Cà di Cozzi, lunghezza 9,5 Km, frequenza 1 corsa ogni 10 minuti;
- "2B" - H Borgo Trento-Parking Verona Sud, lunghezza 8 Km, frequenza 1 corsa ogni 10 minuti.

Le linee 1A e 1B (vedi schema di Figura 9) si sovrappongono nel tratto Porta Vescovo-Stazione Porta Nuova, con una frequenza risultante pari a 1 corsa ogni 3,5 minuti (Figura 1).

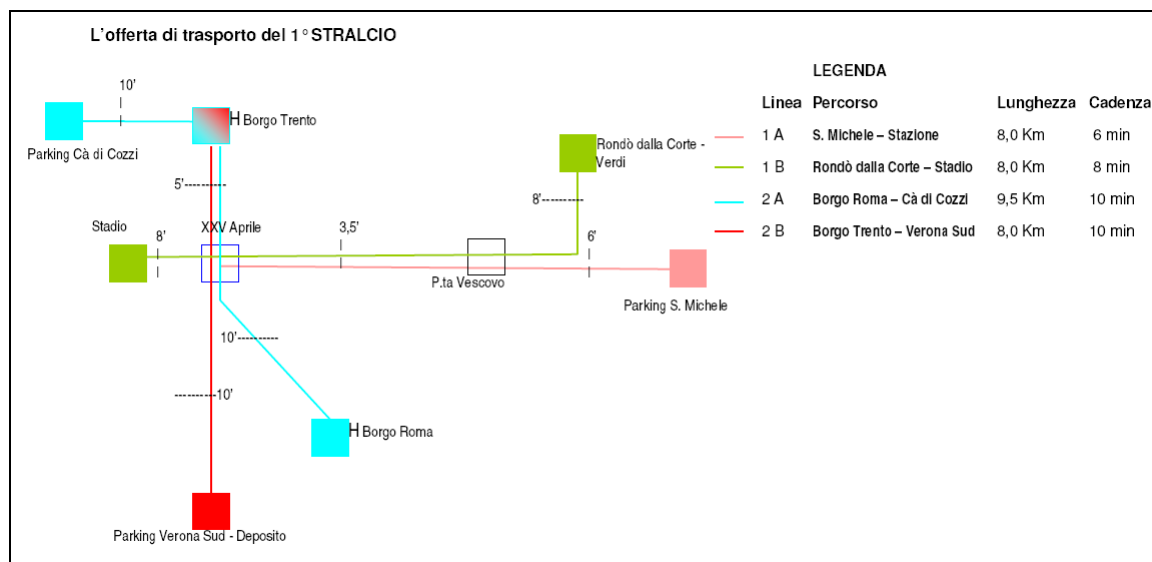


Figura 1: schema delle linee di trasporto e delle frequenze.

Il tram su gomma proposto è costituito da 3 assi rispettivamente di:

- 78 kN (asse anteriore);
- 130 kN (asse centrale);
- 130 kN (asse centrale).

I pneumatici sono del tipo:

- 2*275/70 R22.5 (asse anteriore);
- 2*495/45 R22.5 (altri assi).

I pneumatici, che costituiscono l'asse anteriore, hanno una pressione di gonfiaggio di circa 0.90 MPa mentre, sull'asse posteriore, la pressione di gonfiaggio è pari a circa 0.80 MPa.

In definitiva, i valori utilizzati nei calcoli per l'asse standard sono i seguenti (condizione di carico 1):

- a) Carico asse = 130 kN;
- b) Carico su ogni ruota = 65 kN;
- c) Pressione di gonfiaggio = 0.8 MPa;
- d) Area impronta di carico supposta circolare = 0.0814 m^2 ;
- e) Diametro dell'impronta di carico supposta circolare = 0.322 m.

S'è anche analizzata una seconda condizione in cui il carico sulla singola ruota è distribuito su due aree circolari affiancate; in questa seconda situazione si sono utilizzati i seguenti dati (condizione di carico 2):

- a) Carico asse = 130 kN;
- b) Carico su ogni ruota = 65 kN;
- c) Pressione di gonfiaggio = 0.8 MPa;
- d) Area impronta di carico = 0.0814 m^2 .

3. TIPOLOGIE DELLA SOVRASTRUTTURA

3.1. Introduzione

La scelta dei pacchetti da inserire nella sovrastruttura stradale della nuova filovia di Verona è basata sulle caratteristiche dei Moduli di portanza del sottofondo ottenuti dai sondaggi con Falling Weight Deflectometer. Per maggiori dettagli sulle caratteristiche ed esiti della prova si rimanda alla specifica relazione d'interpretazione dei dati ed alle considerazioni riportate al paragrafo 5.5 del presente documento

3.2. Pavimentazioni Prescelte

3.2.1. Pacchetto A-Sr : flessibile spessori ridotti

Il pacchetto A-Sr rappresenta la scelta per le tratte con Modulo FWD di Sottofondo minore di 300MPa. Lo strato di usura dello spessore di 4 cm verrà confezionato con bitume ad alta lavorabilità (WMA) hard. Il binder e la base, rispettivamente di 8 e 12 cm, saranno confezionati con bitume ad alto modulo anch'esso ad alta lavorabilità.

Nella tabella seguente sono sintetizzati gli spessori e le caratteristiche minime di Modulo degli stati legati (Tabella 3):

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato (3500 MPa)	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato (6000 MPa)	s = 8 cm
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo (8000 MPa)	s = 12 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 20 cm

PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE - TIPOLOGIA A- Sr Spessori ridotti

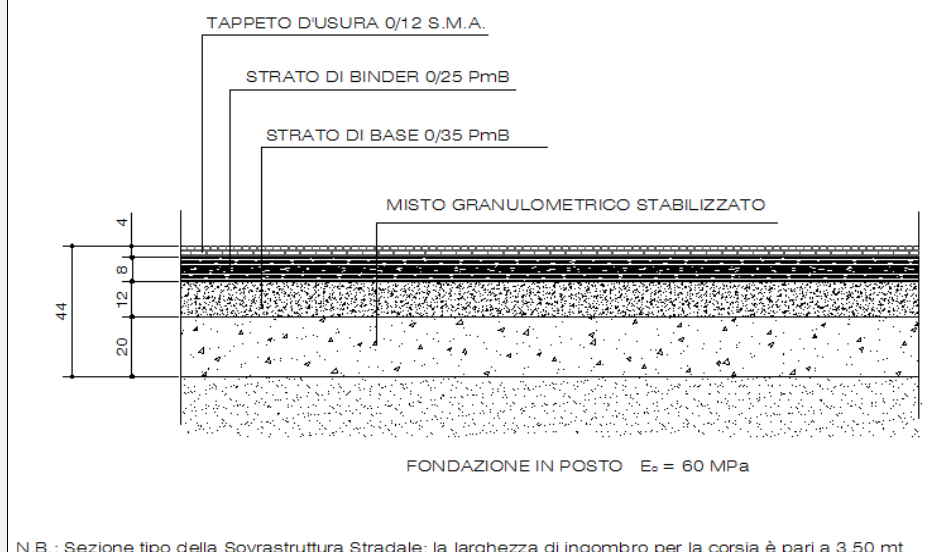


Tabella 3: tipologia di pacchetto A-Sr: pavimentazione flessibile con spessori ridotti.

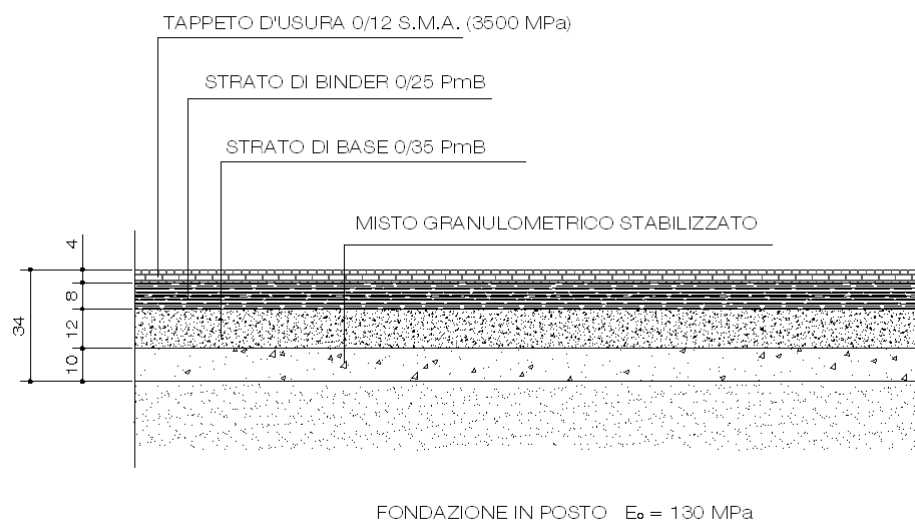
3.2.2. Pacchetto A1-Sr: flessibile spessori ridotti con stabilizzato 10cm

Il pacchetto A1-Sr rappresenta la scelta per le tratte con Modulo FWD di Sottofondo maggiore o uguale di 300MPa. Lo strato di usura dello spessore di 4 cm verrà confezionato con bitume ad alta lavorabilità (WMA) hard. Il binder e la base, rispettivamente di 8 e 12 cm, saranno confezionati con bitume ad alto modulo anch'esso ad alta lavorabilità. In questa soluzione viene ridotto lo spessore dello stabilizzato in quanto soddisfacente risulta la portanza del sottofondo.

Nella tabella seguente sono sintetizzati gli spessori e le caratteristiche minime di Modulo degli stati legati (Tabella 4):

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato (3500 MPa)	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato (6000 MPa)	s = 8 cm
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo (8000 MPa)	s = 12 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 10 cm

PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE - TIPOLOGIA A1 - Sr Spessori ridotti



N.B.: Sezione tipo della Sovrastuttura Stradale; la larghezza di ingombro per la corsia è pari a 3.50 mt

Tabella 4: tipologia di pacchetto A1-Sr: pavimentazione flessibile con spessori ridotti e fondazione di 10 cm.

3.2.3. Pacchetto A: pacchetto flessibile con base rinforzata e stabilizzato 20cm

Il pacchetto A rappresenta la soluzione da adottare per fermate e le aree di sosta o fine corsa con Modulo FWD del sottofondo inferiore a 300 MPa. Lo strato di usura dello spessore di 4 cm verrà confezionato con bitume ad alta lavorabilità (WMA) hard. Il binder e la base, rispettivamente di 8 e 15 cm, saranno confezionati con bitume ad alto modulo anch'esso ad alta lavorabilità. Lo stabilizzato granulometrico sarà dello spessore di 20 cm.

Nella tabella seguente sono sintetizzati gli spessori e le caratteristiche minime di Modulo degli stati legati (Tabella 5):

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato (3500 MPa)	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato (6000 MPa)	s = 8 cm
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo (8000 MPa)	s = 15 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 20 cm

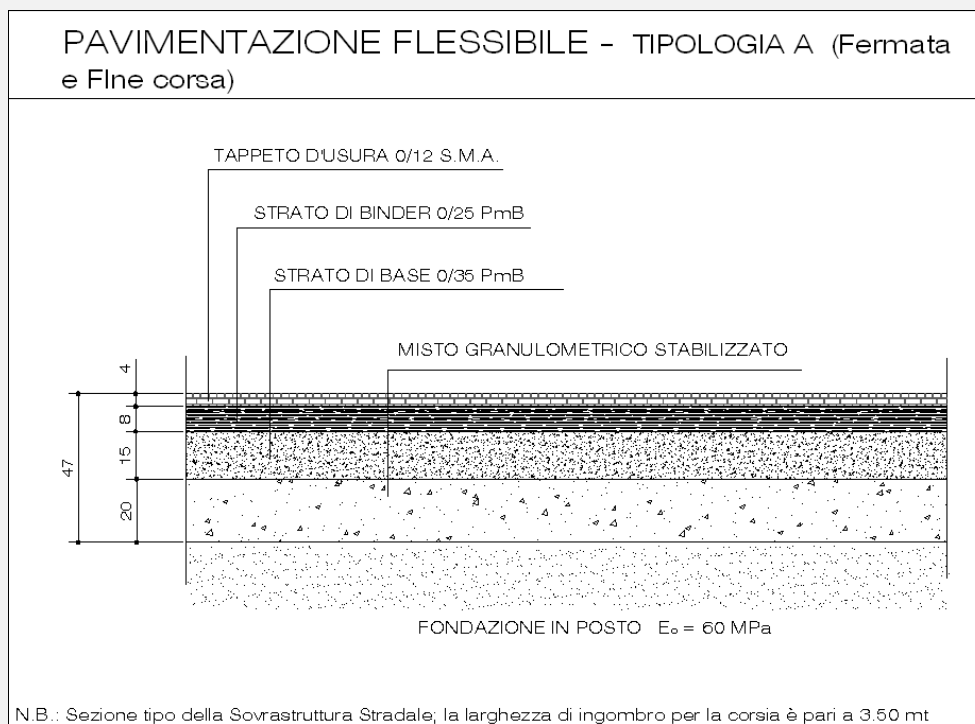


Tabella 5: tipologia di pacchetto A flessibile per fermata e fine corsa.

3.2.4. Pacchetto A1: fondazione in stabilizzato granulometrico di 10 cm

Il pacchetto A1 rappresenta la soluzione da adottare per fermate e le aree di sosta o fine corsa con Modulo FWD del sottofondo maggiore o uguale di 300 MPa. Lo strato di usura dello spessore di 4 cm verrà confezionato con bitume ad alta lavorabilità (WMA) hard. Il binder e la base, rispettivamente di 8 e 15 cm, saranno confezionati con bitume ad alto modulo anch'esso ad alta lavorabilità. Lo stabilizzato granulometrico sarà dello spessore di 10 cm.

Nella tabella seguente sono sintetizzati gli spessori e le caratteristiche minime di Modulo degli stati legati (Tabella 6):

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato (3500 MPa)	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato (6000 MPa)	s = 8 cm
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo (8000 MPa)	s = 15 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 10 cm

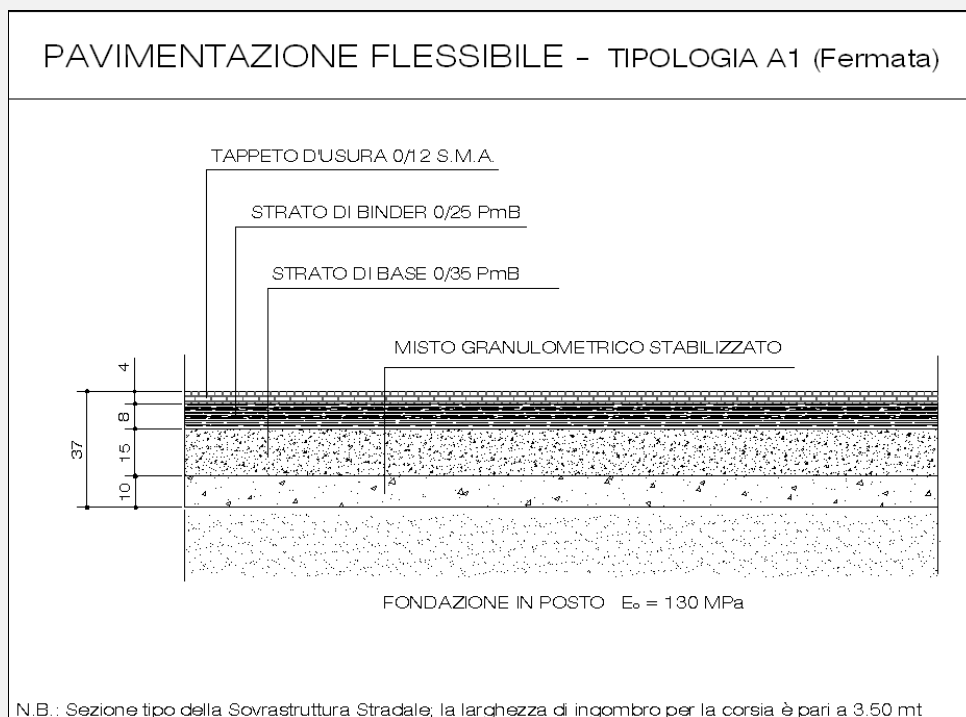


Tabella 6: tipologia di pacchetto A1 per fermata con fondazione in stabilizzato di 10 cm.

3.2.5. Pacchetto C : base in Misto Cementato

La pavimentazione rigida, tipologia C, è la soluzione prescelta in corrispondenza di eventuali tratte in cui sia presente una pavimentazione in pavè senza una sottostante soletta in calcestruzzo .

Lo strato di collegamento sarà in malta sabbia-cemento dello spessore di 7cm. Per lo strato di base si è definito l'utilizzo di un Misto Cementato dello spessore di 20cm che poggia su una fondazione in misto granulometrico stabilizzato (Tabella 7).

Strato di usura in cubetti di porfido 8/10	s = 8/10 cm
Strato di collegamento in sabbia e cemento	s = 7 cm
Misto cementato 0/35	s = 20 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 20 cm

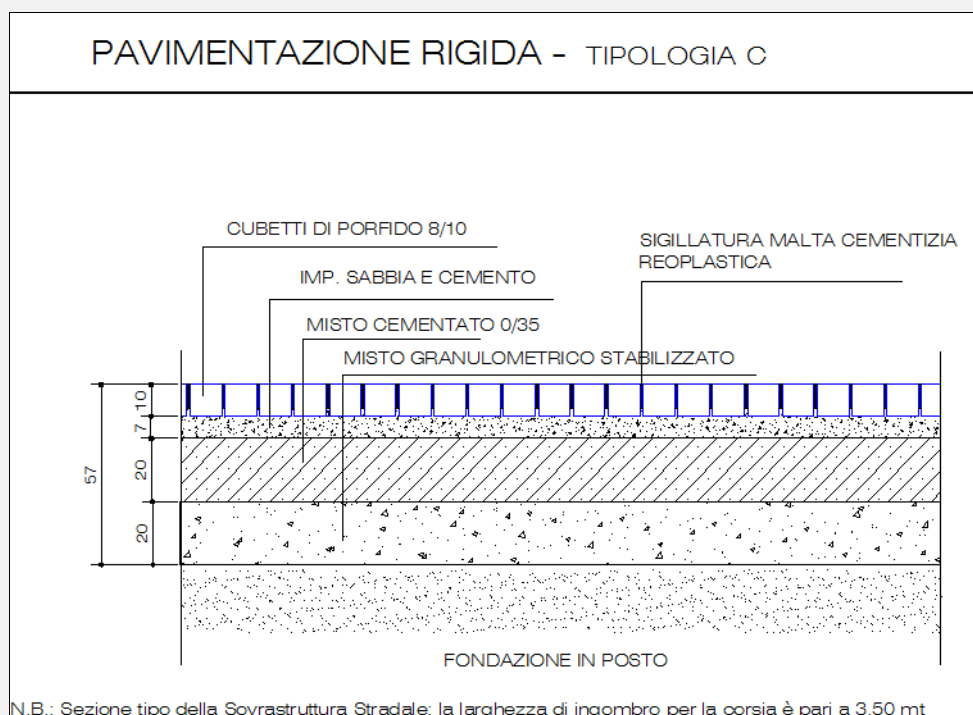


Tabella 7: tipologia di pacchetto C: base in Misto Cementato e fondazione di 20 cm in stabilizzato granulometrico.

3.2.6. Pacchetto C1: con soletta in cls pre-esistente

La soluzione C1 rappresenta la scelta da adottare in presenza di una pavimentazione in pavè con sottostante soletta in calcestruzzo . Il pacchetto C1 è anche quello previsto in corrispondenza delle pavimentazioni in pavè interferite dal progetto.

E' analogo al pacchetto C con la differenza che misto stabilizzato e misto cementato vengono sostituiti dalla soletta preesistente (Tabella 8).

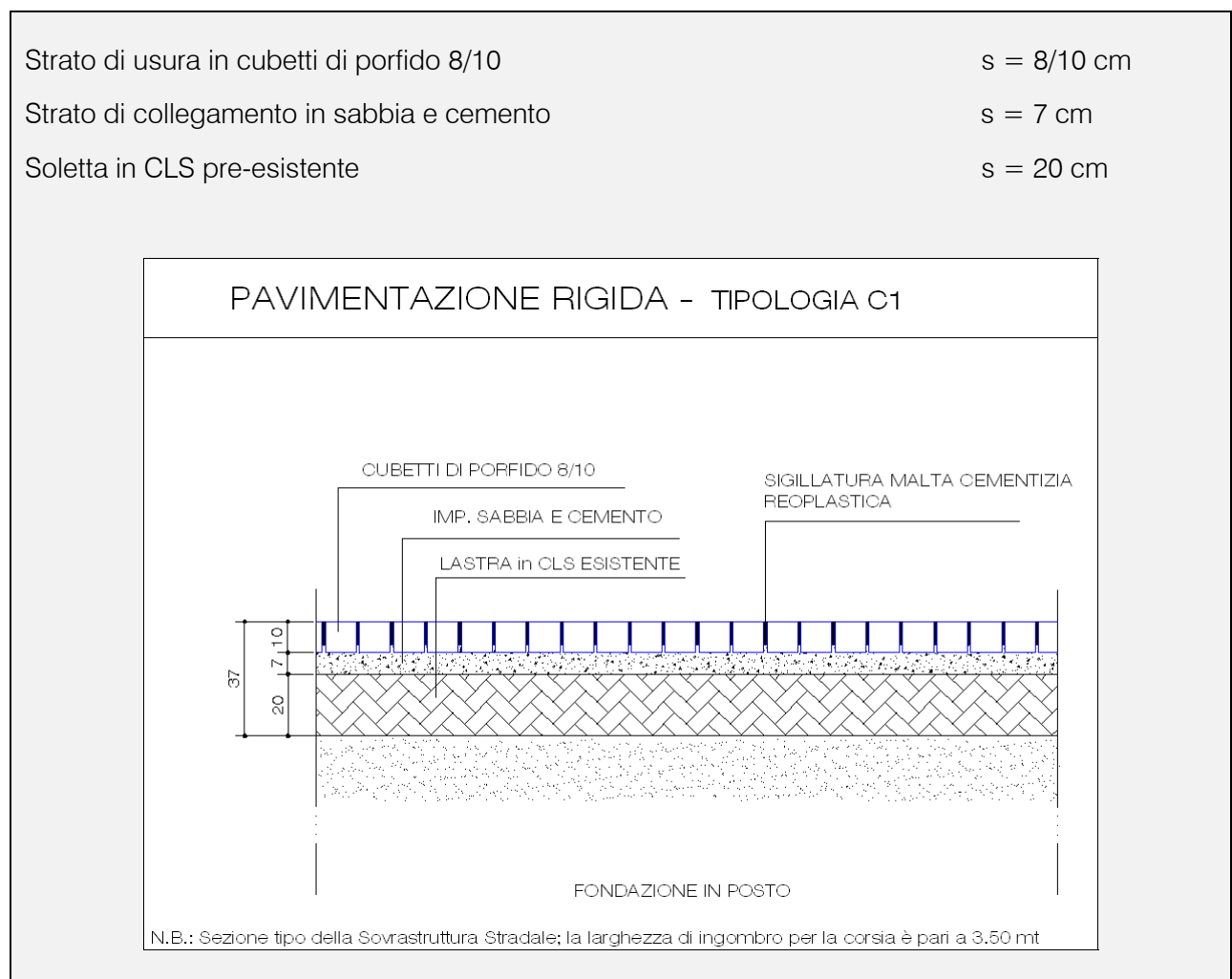


Tabella 8: tipologia di pacchetto C1: con soletta in cls pre-esistente.

3.3. Soluzioni Alternative

3.3.1. Pacchetto B - S : pavimentazione con base in Misto Cementato

Il Pacchetto B - S presenta lo stesso strato di usura delle soluzioni flessibile prescelte sia in termini di materiali che di spessore, un binder con lo stesso bitume ad alto modulo modificato Warm (WMA) ma di spessore 10 cm. Il Misto Cementato ha uno spessore di 20 cm e poggia su una fondazione in stabilizzato granulometrico di 20 cm (Tabella 9).

Può essere utilizzata come alternativa alla A-Sr.

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato (3500 MPa)	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato (6000 MPa)	s = 10 cm
Misto Cementato	s = 20 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 20 cm

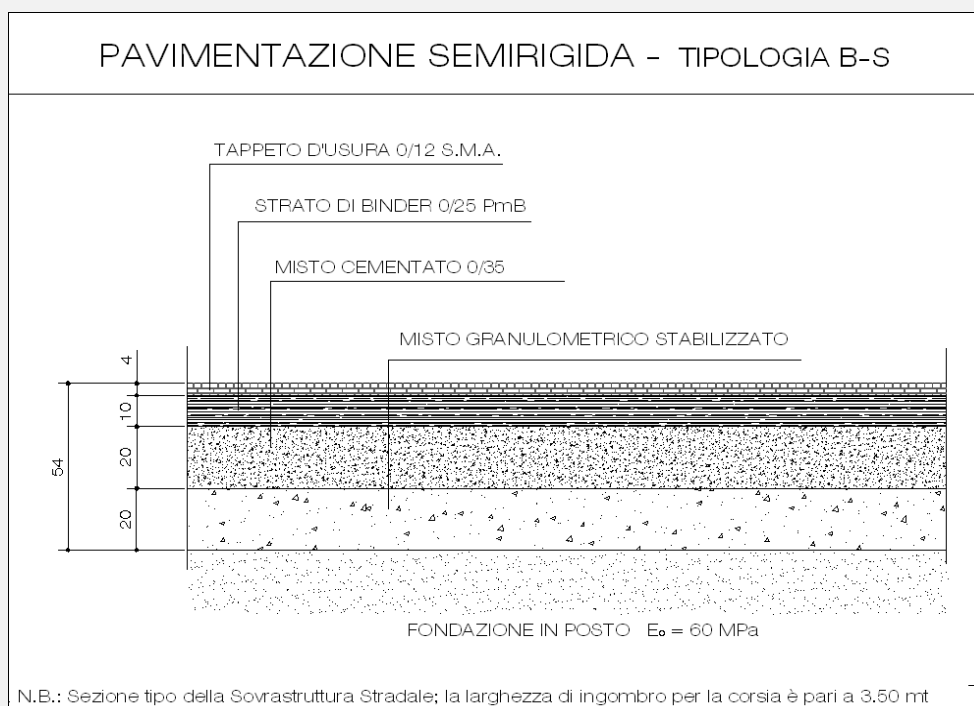


Tabella 9: tipologia di pacchetto B-S: pavimentazione semirigida con base in Misto Cementato di 20 cm.

3.3.2. Pacchetto B1-S : pavimentazione con base in Misto Cementato e 10 cm di stabilizzato

Il Pacchetto B1-S presenta lo stesso strato di usura delle soluzioni flessibile prescelte sia in termini di materiali che di spessore, un binder con lo stesso biutme ad alto modulo modificato Warm (WMA) ma di spessore 10 cm. Il Misto Cementato ha uno spessore di 20 cm e poggia su una fondazione in stabilizzato granulometrico di 10 cm (Tabella 10).

Può essere utilizzata come alternativa alla A1-Sr.

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato (3500 MPa)	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato (6000 MPa)	s = 10 cm
Misto Cementato 0/35	s = 20 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 10 cm

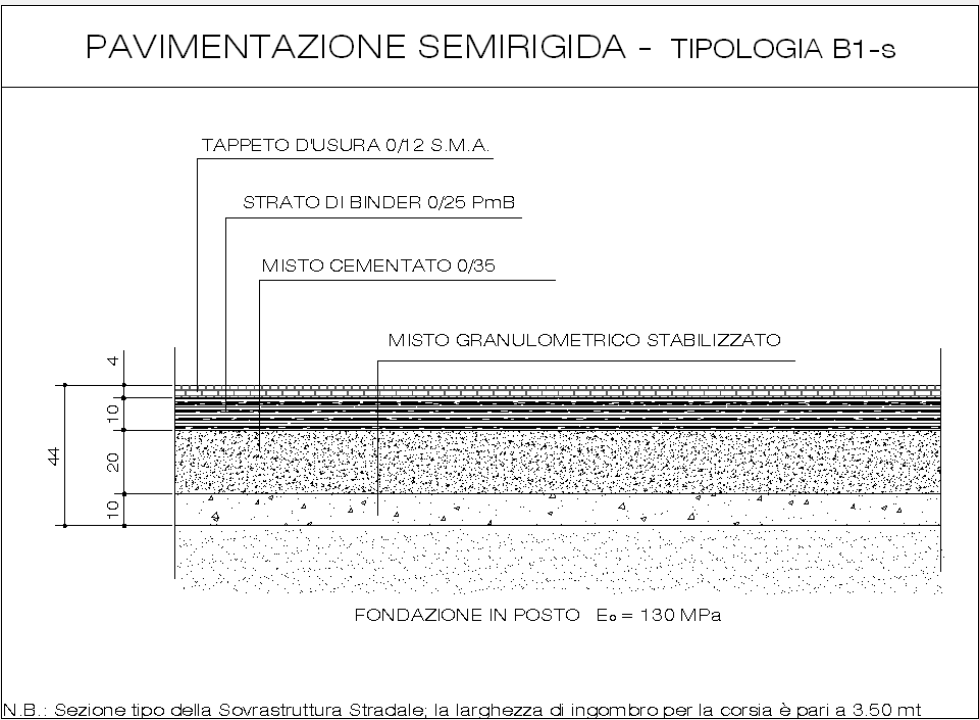


Tabella 10: tipologia di pacchetto B1-s: semirigida con fondazione di 10 cm.

3.3.3. Pacchetto A - Sc : pavimentazione flessibile con stabilizzato Schiumato e Cemento

Il pacchetto A-Sc è una soluzione alternativa alla A-Sr. L'unica differenza è nello strato di fondazione in quanto prevede l'utilizzo di un riciclato a freddo in impianto stabilizzato con Bitume Schiumato e Cemento. Le prestazioni, paragonate a quella della A-Sr, sono superiori ed inoltre si riesce a garantire un migliore addensamento dello strato di Base (Tabella 11).

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato	s = 8 cm
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo	s = 12 cm
Strato di fondazione in Schiumato e Cemento	s = 20 cm

PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE - TIPOLOGIA A-Sc Schiumato e Cemento

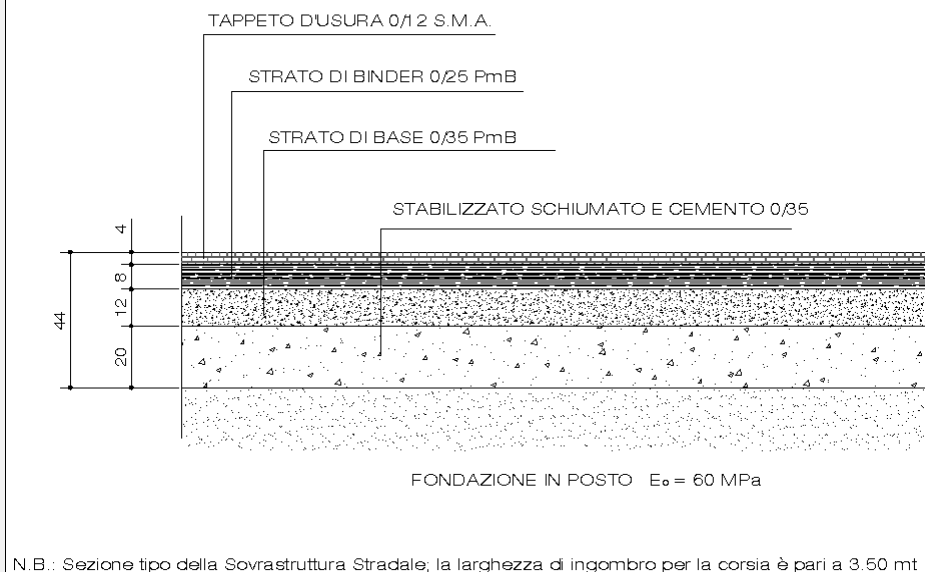


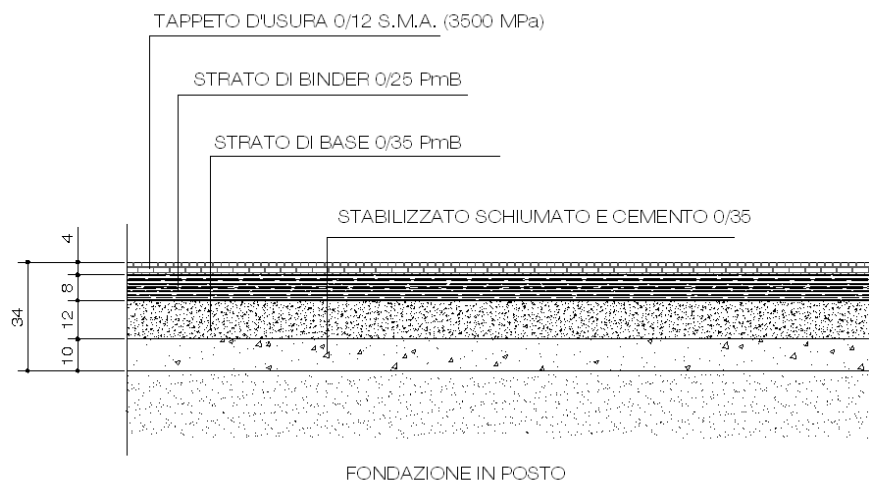
Tabella 11: tipologia di pacchetto A-Sc: fondazione in stabilizzato Schiumato e Cemento.

3.3.4. Pacchetto A1 - Sc : pavimentazione flessibile con stabilizzato Schiumato e Cemento

Il pacchetto A1-Sc è una soluzione alternativa alla A1-Sr. L'unica differenza è nello strato di fondazione in quanto prevede l'utilizzo di un riciclato a freddo in impianto stabilizzato con bitume Schiumato e Cemento. Le prestazioni paragonate a quella della A1-Sr sono sicuramente superiori ed inoltre si riesce a garantire una maggiore compattabilità e lavorabilità dello strato di Base (Tabella 12).

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato	s = 8 cm
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo	s = 12 cm
Strato di fondazione in Schiumato e Cemento	s = 10 cm

PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE - TIPOLOGIA A1 - Sc Spessori ridotti



N.B.: Sezione tipo della Sovrastruttura Stradale; la larghezza di ingombro per la corsia è pari a 3,50 mt

Tabella 12: tipologia di pacchetto A1-Sc: fondazione di 10 cm in Schiumato e Cemento.

3.3.5. Pacchetto C2: Pacchetto in Pavè con base ad alto modulo e fondazione in Misto Cementato

Questa soluzione è un'alternativa alla soluzione C in quanto, in detta soluzione, le tensioni nello strato in Misto Cementato risultano al limite. Si propone di sostituire lo strato di Misto Cementato con una base in conglomerato bituminoso ad alto modulo di 15 cm e la fondazione in stabilizzato con un Misto Cementato (Tabella 13).

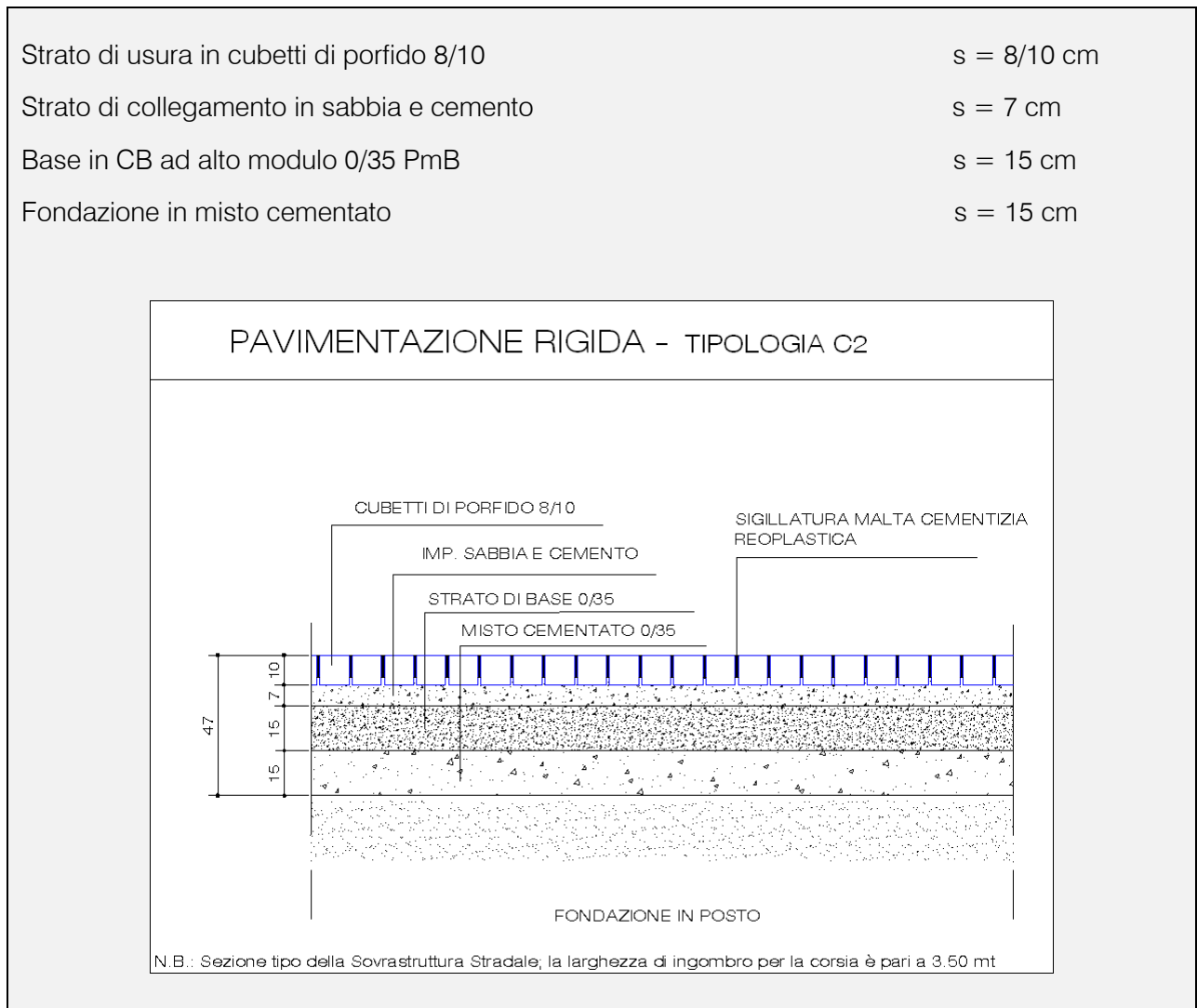


Tabella 13: tipologia di pacchetto C2: pavimentazione rigida con base in C.B. alto modulo.

4. DESCRIZIONE DELLE SCELTE PROGETTUALI

4.1. Introduzione

La sovrastruttura stradale a servizio della nuova linea tramviaria deve assolvere alle seguenti esigenze progettuali:

- a. Garantire la stabilità strutturale durante l'intera vita utile dell'infrastruttura valutata in 30 anni.
- b. Assicurare caratteristiche funzionali accettabili in qualsiasi condizione meteorologica sia sotto l'aspetto dell'aderenza e quindi della sicurezza della circolazione, sia sotto l'aspetto della regolarità del piano viabile e quindi del comfort di moto.
- c. Intervenire con profondità modeste nella situazione esistente al fine di interferire il meno possibile con i sottoservizi attualmente in opera.
- d. Organizzare la sovrastruttura stradale con i dispositivi necessari al fine di limitare, ed anche annullare, le vibrazioni indotte dai veicoli circolanti negli edifici limitrofi.
- e. Armonizzare le operazioni di costruzione al fine di snellire la cantierizzazione in modo che i disagi alla circolazione, durante lo svolgimento dei lavori, siano i minori possibili.
- f. Assicurare la possibilità di ispezione ai sottoservizi che rimangono sotto la nuova sovrastruttura.
- g. Consentire un ridotto impatto ambientale in termini di risparmio energetico, di inerti pregiati e di risorse di cava.

In merito al punto a), chiaramente lo stato di sollecitazione sotto carico deve essere contenuto nei limiti accettabili in relazione alle caratteristiche dei materiali. Il calcolo deve essere condotto considerando anche le leggi di fatica al fine di valutare la ripetitività dei carichi fino alla fine della vita utile, considerando per vita utile l'arco temporale nel quale non sono necessarie opere di manutenzione straordinarie. Per soddisfare la stabilità strutturale e la regolarità del piano stradale si propongono conglomerati bituminosi con legante modificato, per la pavimentazione di tipo flessibile uno strato di base ad alto modulo e per la pavimentazione di tipo semi-rigido uno strato di 20 cm di misto cementato.

Per quanto riguarda le caratteristiche funzionali della pavimentazione espresse al punto b), si deve porre particolare attenzione allo strato più superficiale, quello di usura. Tale strato è previsto in conglomerato bituminoso modificato tipo SMA che oltre a garantire una maggiore durabilità consente di avere elevati valori di aderenza superficiale in virtù della sua microrugosità e della sua macrorugosità.

Al fine di intervenire con profondità modeste, come espresso al punto c), per non interferire con i sottoservizi, occorre che la sovrastruttura di nuova costruzione sia costituita da strati rigidi e resistenti. Si ritiene quindi che sia necessario utilizzare strati legati a cemento (pavimentazione di tipo semirigido) o strati di base in conglomerato bituminoso ad alto modulo (pavimentazione di tipo flessibile) per spessori

complessivi che non superino i 47 cm. In alcune strade sono presenti servizi di svariati gestori ed è presumibile che non sempre siano state rispettate le profondità sopra citate; è pertanto possibile che alcuni sottoservizi si trovino a profondità minori a causa degli inevitabili conflitti di quota esistenti. Per tutto ciò si è deciso di contenere lo spessore dello scavo nell'ambito dei 60 cm prevedendo tale soluzione esclusivamente nei tratti ove il sottofondo abbia minore portanza e riducendolo ulteriormente all'aumentare delle caratteristiche del modulo dello stesso.

Il problema della limitazione delle vibrazioni, od anche del loro annullamento, di cui si è fatto cenno al punto d), riveste una particolare rilevanza in una città come Verona dove le strade del centro storico sono strette e gli edifici sono antichi. Infatti le vibrazioni sono lesive degli assetti strutturali degli edifici e compromettono la qualità della vita degli abitanti. Per contenere le dimensioni di questo problema occorre agire su due fronti. Il primo, e certamente di gran lunga il più importante quando la nuova linea si trova particolarmente vicina agli edifici, è quello di isolare la sovrastruttura avvolgendola in materiali idonei in modo che le vibrazioni si smorzino al suo interno e non si propaghino all'esterno. Il secondo è quello di utilizzare materiali ad elevate prestazioni con elevati moduli di rigidità e che garantiscono la migliore regolarità e la maggiore resistenza all'ormaiamento.

In merito alle operazioni di costruzione e quindi allo snellimento della cantierizzazione, di cui si è detto al punto e), la costruzione della sovrastruttura deve necessitare di un numero modesto di operazioni. Quindi deve essere limitato il numero degli strati e la posa degli stessi deve avvenire con procedimenti rapidi altamente meccanizzati mediante un processo sequenziale che non richiede tempi di attesa.

Le tecnologie proposte sono tutte ad elevata "meccanizzazione" e permettono di garantire la lavorabilità in quasi tutte le condizioni operative. Per garantire una elevata lavorabilità, tempi di stesa più rapidi ed un migliore addensamento per tutti i conglomerati bituminosi stesi a caldo si propone l'impiego di bitumi additivati e fluidificati con paraffine.

Per quanto riguarda la possibilità di ispezione dei sottoservizi, di cui si è detto al punto f), occorre che i materiali che si pongono in opera siano facilmente aggredibili e facilmente ripristinabili. Per questo motivo si è indirizzata la scelta verso la pavimentazione di tipo flessibile o eventualmente su una pavimentazione di tipo semi-rigido, escludendo in ogni caso la pavimentazione di tipo rigido con lastra in cls.

In ultimo, al fine di ridurre il consumo di materiali inerti di cava pregiati e contemporaneamente garantire un certo risparmio energetico, come espresso al punto g), si prevede l'utilizzo di materiale fresato proveniente dalla demolizione di vecchie pavimentazioni da riciclare a caldo all'interno degli strati legati a bitume. L'additivazione con fluidificante del bitume oltre a garantire ottime caratteristiche prestazionali permette di riciclare in impianto senza nessun accorgimento particolare fino al 35-40% di materiale in peso. In questo modo si ottiene un duplice vantaggio: risparmio di materie prime pregiate che sarebbero state

necessarie per la realizzazione dei conglomerati bituminosi e benefici energetici per l'utilizzo della tecnologia a tiepido.

In particolare si è definito l'utilizzo di conglomerati bituminosi modificati tiepidi ad alta lavorabilità o "fluidificati" (Warm Mix Asphalt ovvero tecnologie di miscelazione dei conglomerati a tiepido). In questi ultimi anni si stanno diffondendo delle nuove tecnologie che permettono di produrre e stendere miscele di conglomerato bituminoso a temperature inferiori a 120°C. Il vantaggio immediatamente riscontrabile consiste in una significativa riduzione del consumo di energia necessaria alla produzione dei classici conglomerati bituminosi a caldo in impianto. Quindi il risparmio energetico comporta anche un minore inquinamento atmosferico; è infatti dimostrato che un innalzamento della temperatura di 10°C fa raddoppiare il volume dei fumi prodotti. Le basse temperature di posa in opera portano anche vantaggi in termini di maggiore facilità di addensamento (soprattutto con bitumi modificati), con conseguente riduzione della percentuale dei vuoti in sito e migliori prestazioni in termini di durabilità, resistenza ai carichi ed agli agenti atmosferici.

Le temperature elevate di produzione degli "Hot mix asphalt" (HMA) sono dovute alla elevata viscosità del legante (bitume), le temperature medie di realizzazione e stesa risultano poi ulteriormente superiori nel caso si utilizzino bitumi modificati. Con una riduzione delle temperature di miscelazione in impianto e stesa si ottengono dei significativi vantaggi in termini di risparmio energetico, produzione di fumi nocivi e di odori fastidiosi sia in impianto che in cantiere risulta inoltre agevolato l'impiego di materiale fresato perché può essere riscaldato a temperature inferiori a quelle tradizionalmente utilizzate per i conglomerati a caldo.

Una delle tecnologie principali per la produzione di WMA è rappresentata dall'utilizzo di additivi di tipo organico come le cere paraffiniche.

Essi permettono la produzione di miscele tiepide WMA riducendo la viscosità del legante bituminoso ad una data temperatura. La riduzione di viscosità permette la perfetta miscelazione ed il ricoprimento di tutte le particelle di aggregato da parte del mastice legante a temperature più basse di quelle generalmente richieste per la produzione di miscele a caldo HMA senza che risultino necessarie delle significative modifiche di impianto e di attrezzature. L'impiego di cere paraffiniche e di bitumi modificati è preferibile rispetto alle zeoliti in quanto non determinano nessuna modifica di processi produttivi già collaudati (sia in impianto che nell'importante fase di messa in opera), permettono un perfetto controllo della qualità del materiale e del prodotto finito in tutte le fasi e garantiscono una maggiore uniformità ed affidabilità del legante.

Le zeoliti possono comunque essere utilizzate qualora si volessero ridurre ulteriormente le temperature di miscelazione e stesa al fine di impiegare percentuali di materiale fresato prossime al 40%.



Figura 2: stesa del conglomerato SMA “Antiskid” tiepido e verifica delle temperature

L’impiego di miscele WMA (vedi Figura 2) per tutti gli strati legati a bitume (SMA, binder e Base ad alto modulo) permette di garantire, rispetto ai conglomerati bituminosi a caldo (modificati o meno):

- una significativa riduzione del consumo energetico;
- una riduzione dell’impatto ambientale;
- una migliore qualità della messa in opera ed una maggiore affidabilità ed uniformità delle caratteristiche volumetriche della miscela in tutte le condizioni (ottimali o meno);
- una minore perdita delle parti volatili a causa dell’alta temperatura e conseguentemente un minor invecchiamento del legante bituminoso nella fase di produzione e stesa con conseguente incremento delle prestazioni del conglomerato bituminoso nel tempo;
- una maggiore durabilità degli strati;
- una maggiore portanza degli strati grazie alla maggiore viscosità del legante alle temperature massime di utilizzo ;
- l’ancor più facile riciclo a « tiepido » in impianto di materiale fresato proveniente dalla demolizione di vecchie pavimentazioni con percentuali prossime al 35-40% in peso senza nessuna sostanziale modifica del processo produttivo e con ottime prestazioni in opera del prodotto finito.

Un tappeto tipo SMA antiskid tiepido con bitume modificato è attualmente utilizzato a Bologna per la realizzazione del “piano di corsa” della metrotranvia su gomma a guida vincolata (“Civis”).

Nello specifico, il tappeto di usura superficiale realizzato a Bologna è caratterizzato dall’additivazione del legante con ossido di ferro, che conferisce allo stesso una tipica colorazione superficiale tipo rosso “mattoni” (vedi Figura 3).



Figura 3: vista e sezione di provini tipo SMA “Antiskid” tiepido prelevati da campo prove sperimentale per il tappeto superficiale della pavimentazione della metrotranvia su gomma di Bologna (“Civis”).

Per tutti i materiali proposti viene riportata una dettagliata scheda tecnica delle pavimentazioni.

Sostanzialmente si è privilegiato l'impiego del conglomerato bituminoso con bitume modificato per i seguenti motivi:

- rapidità di realizzazione e di apertura dei tronchi stradali al traffico rispetto qualsiasi scelta che comporti l'uso di conglomerati cementizi;
- affinità nell'uso di macchine per la cantierizzazione;
- possibilità di lavorare con più squadre e con tempi sfalsati non superiori a (2÷3) giorni per le diverse realizzazioni;
- facilità e rapidità per interventi d'urgenza e di manutenzione sia in termini di tempo e sia di costi;
- smorzamento delle vibrazioni e delle emissioni acustiche indotte dal traffico dei veicoli.

4.2. MISTO GRANULOMETRICO STABILIZZATO

4.2.1. Descrizione

Il misto granulometrico stabilizzato è costituito principalmente da aggregati provenienti dalla fresatura della preesistente pavimentazione stradale la cui granulometria potrà essere eventualmente corretta con l'aggiunta di aggregato fresco in opportune quantità e pezzature. La stesa della miscela viene realizzata tramite motorgrader e successivamente compattata tramite rulli compattatori tradizionali.

4.2.2. Materiali inerti

Nel caso di impiego di aggregati provenienti da operazioni di riciclo occorrerà verificare l'assenza di sostanze plastiche (limi, argille) e la rispondenza alle prescrizioni granulometriche (CNR BU n. 23 del 14.12.71) indicate nel fuso seguente (Tabella 14).

SERIE CRIVELLI E SETACCI UNI	PASSANTE TOTALE IN PESO %
Crivello 71	100
Crivello 40	75 ÷ 100
Crivello 25	60 ÷ 87
Crivello 10	35 ÷ 67
Crivello 5	25 ÷ 50
Setaccio 2	15 ÷ 40
Setaccio 0,4	7 ÷ 22
Setaccio 0,075	2 ÷ 10

Tabella 14: fuso granulometrico di riferimento dello stabilizzato.

Qualora le caratteristiche del misto non rispondessero a tali indicazioni si deve operare mediante l'aggiunta di inerti di dimensioni e caratteristiche tali da riportare la curva granulometrica nel fuso richiesto (Figura 4).

Gli inerti di integrazione dovranno provenire esclusivamente da frantumati di cava (frantumazione 100%), ed essere conformi alle seguenti specifiche:

1. perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature (CNR 34/73) inferiore al 25% in peso;
2. sensibilità al gelo (CNR 80/80) inferiore al 30%;
3. coefficiente di imbibizione (CNR fasc. IV/1953) inferiore a 0.015;
4. coefficienti di forma Cf e di appiattimento Ca (CNR 95/84) inferiori rispettivamente a 3 ed 1.58.

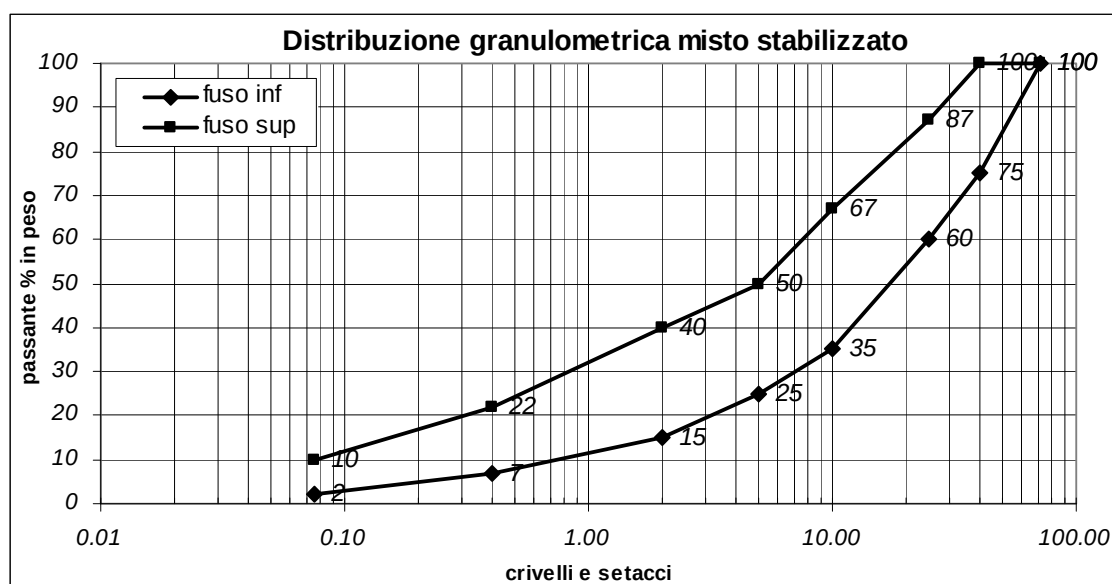


Figura 4: fuso di riferimento per il misto stabilizzato.

4.2.3. Modalità esecutive

La posa in opera della miscela deve essere effettuata mediante sistemi che consentano di ottenere uno strato perfettamente sagomato, privo di sgranamenti, fessurazioni ed esente da difetti dovuti alla segregazione degli elementi litoidi più grossi. Subito dopo la stesa si deve procedere al livellamento dello stabilizzato ed alla compattazione mediante l'impiego di un rullo vibrante di carico statico > 20 ton con controllo di frequenza e di ampiezza di vibrazione e di un rullo gommato di carico statico > 25 ton. Si avrà cura inoltre che la compattazione sia condotta con la metodologia più adeguata per ottenere un uniforme addensamento in ogni punto ed evitare fessurazioni e scorrimenti nello strato appena steso.

Al termine della compattazione lo strato finito deve avere una densità secca uniforme in tutto lo spessore non inferiore al 98% di quella Proctor.

Subito dopo il completamento delle opere di costipamento e di rifinitura deve essere eseguita la spruzzatura di un velo protettivo di emulsione acida al 55% in ragione di 0,5 Kg/m².

4.2.4. Controllo delle lavorazioni

Il controllo della qualità del misto granulometrico stabilizzato e della sua posa in opera deve essere effettuato mediante prove di laboratorio sui materiali costituenti, sulla miscela e con prove in situ. L'ubicazione dei prelievi e la frequenza delle prove saranno a discrezione della Direzione Lavori. Sui materiali costituenti devono essere verificate le caratteristiche di accettabilità. Sulla miscela vengono determinate: la granulometria degli aggregati (riciclati e di integrazione).

Dovranno inoltre essere previste prove di carico con piastra in sito per le quali il valore del modulo di deformazione M_d al primo ciclo di carico s nell'intervallo compreso fra 0.15 e 0.25 daN/cm², rilevato in un tempo compreso tra 6 e 12 ore dalla compattazione non dovrà mai essere inferiore ai 80 daN/cm².

Le caratteristiche del Misto Granulometrico Stabilizzato trattato sono raccolte nella seguente tabella (15):

AGGREGATO	
Perdita in peso per abrasione "Los Angeles"	$\leq 25\%$
Dimensione massima	71 mm
Sensibilità al gelo	$\leq 30\%$
Coefficiente di imbibizione	≤ 0.015
Coefficiente di forma	≤ 3
Coefficiente di appiattimento	≤ 1.58

Tabella 15: caratteristiche aggregati del misto granulometrico stabilizzato.

4.3. MISTO CEMENTATO

4.3.1. Descrizione

Il misto cementato per fondazione (sottobase) sarà costituito da una miscela di inerti lapidei, impastata con cemento ed acqua in impianto centralizzato con dosatori a peso o a volume, da stendersi in un unico strato dello spessore finito di 20 cm. Altri spessori potranno essere richiesti purché non inferiori a 15 cm e non superiori a 30 cm.

4.3.2. Materiali inerti

Saranno impiegate ghiaie e sabbie di cava e/o di fiume con percentuale di frantumato complessiva compresa tra il 30 ed il 60% in peso sul totale degli inerti. A discrezione della D.L. potranno essere impiegate quantità di materiale frantumato superiori al limite stabilito, in questo caso la miscela finale dovrà essere tale da presentare le stesse resistenze a compressione e a trazione a 7 giorni prescritte nel seguito; questo risultato potrà ottenersi aumentando la percentuale delle sabbie presenti nella miscela e/o la quantità di passante allo 0,075 mm. Per le granulometrie possibili, detti materiali potranno anche essere integrati con ceneri volanti (Tabella 16).

Gli inerti avranno i seguenti requisiti:

- Aggregato di dimensioni non superiori a 40 mm, né di forma appiattita, allungata o lenticolare;
- Granulometria compresa nel seguente fuso ed avente andamento continuo ed uniforme (CNR B.U. n. 23 del 14.12.1971);

SERIE CRIVELLI E SETACCI UNI	PASSANTE TOTALE IN PESO %
Crivello 40	100
Crivello 30	80 ÷ 100
Crivello 25	72 ÷ 90
Crivello 15	53 ÷ 70
Crivello 10	40 ÷ 55
Setaccio 5	28 ÷ 40
Setaccio 2	18 ÷ 30
Setaccio 0,4	8 ÷ 18
Setaccio 0,18	6 ÷ 14
Setaccio 0,075	5 ÷ 10

Tabella 16: fuso granulometrico del misto cementato.

- Perdita in peso alla prova Los Angeles (CNR B.U. n. 34 del 28.03.1973) non superiore a 30% in peso;
- Equivalente in sabbia (CNR B.U. n. 27 del 30.03.1972) compreso fra 30 e 60;
- Indice di plasticità (CNR UNI 10014) uguale a zero (materiale non plastico).

4.3.3. Legante idraulico

Dovrà essere impiegato cemento normale (Portland, pozzolanico o d'alto forno) di classe 325. A titolo indicativo la percentuale di cemento sarà compresa tra il 2,5% e il 3,5% sul peso degli inerti asciutti. E' possibile sostituire parzialmente questa percentuale con cenere di carbone del tipo leggero di recente produzione. Orientativamente le ceneri leggere possono sostituire fino al 40% del peso indicato di cemento. La quantità in peso di ceneri da aggiungere per ottenere pari caratteristiche meccaniche, scaturirà da apposite prove di laboratorio. Indicativamente ogni punto percentuale di cemento potrà essere sostituito da 4-5 punti percentuali di ceneri.

4.4. CONGLOMERATO BITUMINOSO AD ALTO MODULO PER STRATI DI BASE E COLLEGAMENTO

4.4.1. Descrizione

La parte superiore della sovrastruttura stradale sarà costituita da un triplo strato di conglomerato bituminoso steso a caldo, e precisamente: da una parte inferiore portante composta da base e binder e da uno strato superiore di usura. Allo scopo di aumentare la resistenza a fatica e alle deformazioni, si

realizzano strati portanti (base e binder) in conglomerato bituminoso tiepido ad alto modulo complesso. Il conglomerato ad alto modulo è stato studiato essenzialmente per:

- aumentarne la lavorabilità e ridurre l'impatto ambientale;
- sopportare elevati carichi dinamici;
- minimizzare il rischio di deformazioni permanenti (ormaie);
- favorire la ripartizione di carichi, riducendo i fenomeni di punzonamento;
- resistere maggiormente ai fenomeni di fatica ed invecchiamento.

Il conglomerato sarà costituito da una miscela di pietrischetti, graniglie, sabbie ed additivi, secondo le definizioni riportate nell' Art. 1 delle norme C.N.R., fascicolo n. 4/1953 "norme per l'accettazione dei pietrischi, dei pietrischetti, delle graniglie, delle sabbie e degli additivi per costruzioni stradali", mescolati a caldo con apposito bitume modificato e steso in opera mediante macchina vibrofinitrice e compattato con idonei rulli.

4.4.2. Materiali inerti

Il prelievo dei campioni di materiali inerti, per il controllo dei requisiti di accettazione appresso indicati, verrà effettuato secondo le norme C.N.R., Capitolo II del fascicolo 4/1953. Per il prelevamento dei campioni destinati alle prove di controllo dei requisiti di accettazione, così come per le modalità di esecuzione delle prove stesse, valgono le prescrizioni contenute nel fascicolo C.N.R. B.U n. 93 (11-7-1983). L'aggregato grosso dovrà essere ottenuto esclusivamente per frantumazione ed essere costituito da elementi sani, duri, durevoli, poliedrici, con spigoli vivi, a superficie ruvida, puliti ed esenti da polvere o da materiali estranei. L'aggregato grosso sarà costituito da materiali che potranno anche essere di provenienza o natura petrografica diversa, indicativamente si riporta in un 35-40% l'impiego di rocce di natura eruttivo magmatica, possibilmente porfiriche, purché alle prove appresso elencate, eseguite su campioni rispondenti alla miscela che si intende formare, risponda ai seguenti requisiti:

- perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature (C.N.R. 34/1973), inferiore al 25%;
- indice dei vuoti delle singole pezzature, (C.N.R. 4/1953), inferiore a 0,80;
- coefficiente di forma (UNI 8520) per ogni classe di aggregati, maggiore di 0,25;
- coefficiente di appiattimento (UNI 8520) per ogni classe di aggregati, minore di 10;
- coefficiente di imbibizione (C.N.R. 4/1953), inferiore a 0,015;
- materiale non idrofilo (C.N.R. 4/1953);
- materiale che non spoglia in acqua a 40°C (C.N.R. 138/1992).

L'aggregato fino sarà costituito esclusivamente da sabbie di frantumazione che dovranno soddisfare i requisiti dell' Art. 5 delle norme C.N.R. fascicolo n. 4 del 1953 ed in particolare:

- equivalente in sabbia (C.N.R. 27/1972), maggiore di 70;
- materiale non idrofilo (C.N.R. 4/1953);

- perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sul materiale granulare di origine delle sabbie (C.N.R. 34/1973), inferiore al 25%;

Gli additivi minerali (fillers) saranno costituiti da polvere di rocce preferibilmente calcaree o da cemento, calce idrata, calce idraulica e dovranno risultare alla setacciatura per via secca per il 100% al setaccio n. 40 ASTM, per almeno il 90% al setaccio n. 80 ASTM e per almeno l'80% al setaccio n. 200 ASTM.

4.4.3. Legante – bitume modificato Warm ad alto modulo

Dovranno essere impiegati bitumi modificati mediante l'opportuna additivazione di idonei polimeri e fluidificanti al fine di determinare un aumento dell'intervallo di plasticità (riduzione della suscettibilità termica), un aumento dell'adesione ed una riduzione della viscosità alle alte temperature. La modifica delle proprietà reologiche dovrà inoltre conseguire nei conglomerati bituminosi, una maggiore resistenza alle sollecitazioni ed alla loro ripetizione (comportamento a fatica). I tipi, i dosaggi e le condizioni di impiego, saranno comunicati preventivamente alla D.L.. Il legante modificato dovrà essere prodotto in appositi impianti capaci di dosare e disperdere perfettamente i polimeri ed il fluidificante nel bitume e dovrà presentare caratteristiche di costanza qualitativa, verificata da laboratori attrezzati. Lo stoccaggio dovrà avvenire in apposito serbatoio riscaldato, coibentato e preventivamente svuotato dal bitume preesistente. Il prelevamento dei campioni di bitume dovrà avvenire secondo la norma EN 58. I dati della caratterizzazione chimico-fisica e reologica del legante elastomerizzato dovranno rientrare fra quelli di seguito indicati in Tabella 17:

Tipo di prova	Metodo di prova	PmB 30 – 50 / 65 Classe 2
Punto di rammollimento P.A.	EN 1427	> 65 °C
Penetrazione a 25°C	EN 1426	30 – 50 dmm
Punto di rottura Fraass	EN 12593	< - 10 °C
Viscosità dinamica a 160°C*	ASTM D 4402	> 300 mPa*s
Ritorno elastico a 25°C	EN 13398	min. 50%
Stabilità allo stoccaggio:	EN 13399	
sulla penetrazione		± 5 dmm
sul rammollimento		± 5 °C
Invecchiamento (RTFOT)	EN 12607	
sulla penetrazione		> 65% dell'originale
sul rammollimento		± 5°C dall'originale

Tabella 17: caratteristiche legante ad alto mdoulo Tipologia *) Rpm 20, Spindle 21

4.4.4. Miscele

Le miscele da adottarsi dovranno avere una composizione granulometrica contenute nei seguenti fusi (Tabella 18, 19, Figure 5, 6) riportati di seguito:

Conglomerato bituminoso per strato di base	
Crivelli e setacci UNI	Passante % totale in peso
Crivello 40	100
Crivello 30	80 - 100
Crivello 25	70 – 95
Crivello 15	45 – 70
Crivello 10	35 – 60
Crivello 5	25 – 50
Setaccio 2	18 – 40
Setaccio 0,4	6 – 20
Setaccio 0,18	4 – 14
Setaccio 0,075	4 - 8

Tabella 18: fuso granulometrico di riferimento della base.

Conglomerato bituminoso per strato di binder	
Crivelli e setacci UNI	Passante % totale in peso
Crivello 30	100
Crivello 20	80 - 100
Crivello 15	70 – 90
Crivello 10	55 – 75
Crivello 5	35 – 55
Setaccio 2	25 - 42
Setaccio 0,4	12 – 24
Setaccio 0,18	10 – 15
Setaccio 0,075	6 – 12

Tabella 19: fuso granulometrico di riferimento del binder.

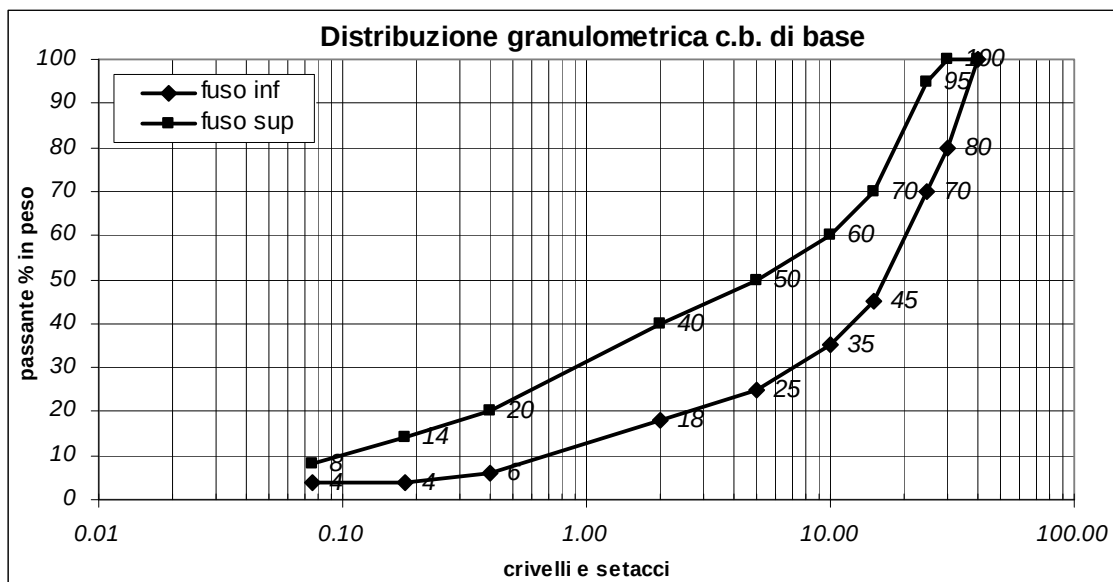


Figura 5: fuso granulometrico della base.

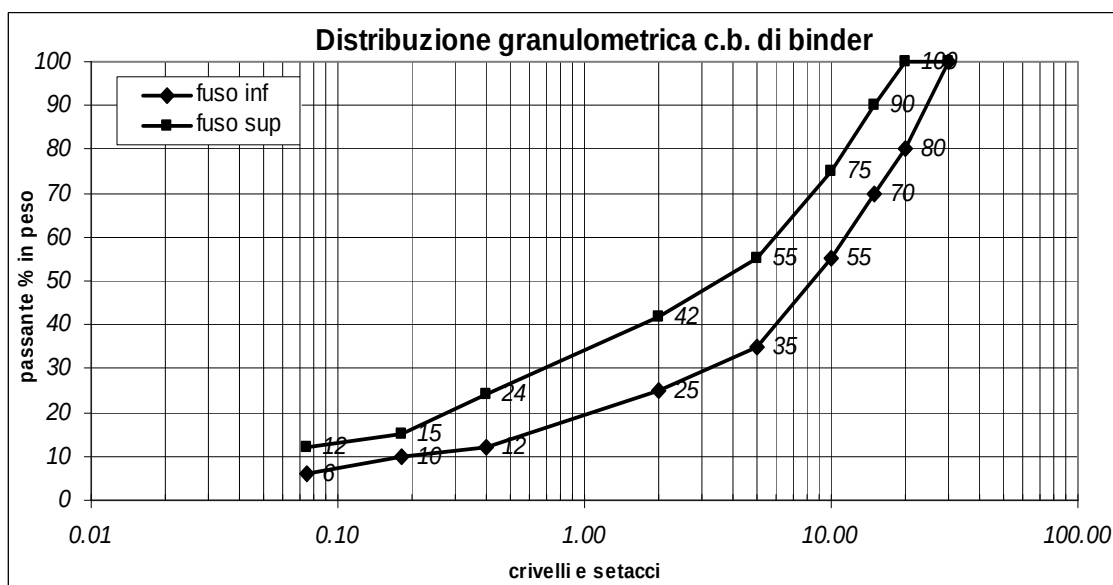


Figura 6: Fuso granulometrico del binder.

Il legante bituminoso dovrà essere compreso tra il 4,5% ed il 5,5% riferito al peso totale degli aggregati.

Il contenuto di bitume della miscela dovrà comunque essere quello necessario all'ottimizzazione delle caratteristiche di seguito riportate. Il conglomerato dovrà avere i seguenti requisiti:

- il valore della stabilità Marshall (C.N.R. 30-1973) eseguita a 60°C su provini costipati con 75 colpi di maglio per faccia dovrà essere di almeno 1200 Kg. Il valore della rigidità Marshall, cioè il rapporto tra stabilità misurata in Kg e lo scorrimento misurato in mm, dovrà essere in ogni caso superiore a 400;
- la resistenza alla prova di trazione indiretta (C.N.R. B.U. 134) a 25°C di almeno 1,5 N/mm²;
- la percentuale dei vuoti dei provini Marshall deve essere compresa fra 2 e 6%.

- la percentuale dei vuoti residui in opera deve essere compresa fra 3 e 7% e comunque la massa volumica del conglomerato in sito non dovrà essere inferiore al 97% della massa volumica dei provini Marshall compattati in laboratorio.
- la prova Marshall eseguita su provini che abbiano subito un periodo di immersione in acqua distillata per 15 giorni a temperatura ambiente, dovrà dare un valore di stabilità non inferiore al 75% di quelli precedentemente indicati.
- la miscela dovrà rispondere alle seguenti caratteristiche dinamiche: la determinazione del modulo complesso effettuata su provini prelevati da una stesa di prova tra il 15° ed il 20° giorno dalla loro confezione dovrà fornire i valori riportati in tabella 20:

Temperatura	Modulo Complesso
10°C	> 14.000 MPa
25°C	> 7.000 MPa
40°C	> 1.500 MPa

Tabella 20: Modulo Complesso del conglomerato a diverse temperature.

- determinazione della deformabilità a carico costante (creep). I valori del parametro Jp dovranno essere compresi tra quelli di seguito riportati (Tabella 21):

Temperatura	
10°C	1*10E-8 \ 10*10E-8 cm ² /kg*s
25°C	1*10E-8 \ 10*10E-7 cm ² /kg*s
40°C	1*10E-8 \ 10*10E-6 cm ² /kg*s

Tabella 21: valori del parametro Jp in riferimento alle diverse temperature.

4.4.5. Controllo dei requisiti di accettazione

L'Impresa farà eseguire prove sperimentali sui campioni di aggregato e di legante per la relativa accettazione. Dovrà inoltre presentare, con congruo anticipo rispetto all'inizio dei lavori e per ogni cantiere di produzione, la composizione delle miscele che intende adottare; ogni composizione proposta dovrà essere corredata da una completa documentazione degli studi effettuati in laboratorio, attraverso i quali si è ricavata la ricetta ottimale.

Una volta accettata dalla DL la composizione proposta, l'Impresa deve ad essa attenersi rigorosamente comprovandone l'osservanza. Non saranno ammesse variazioni del contenuto di aggregato grosso superiore a $\pm 5\%$ e di sabbia superiore $\pm 3\%$ sulla percentuale corrispondente alla curva granulometrica prescelta, e di $\pm 1\%$ sulla percentuale di additivo. Per la quantità di bitume non sarà tollerato uno scostamento dalla percentuale stabilita di $\pm 0,5\%$. Tali valori dovranno essere verificati con le prove sul conglomerato bituminoso prelevato all'impianto come pure dall'esame delle carote prelevate in sito. In laboratorio dovranno essere effettuate, quando necessarie:

- la verifica granulometrica dei singoli aggregati approvvigionati in cantiere e quella degli aggregati stessi all'uscita dei vagli di riclassificazione;
- la verifica della composizione del conglomerato bituminoso (granulometria degli inerti, % di bitume, % di additivo) prelevando lo stesso all'uscita del mescolatore o a quella della tramoggia di stoccaggio;
- la verifica delle caratteristiche Marshall del conglomerato e precisamente: peso di volume (C.N.R. B.U. n. 40/73) media di due prove; percentuale dei vuoti (C.N.R. B.U. n. 39/73) media di due prove; stabilità e rigidità Marshall (C.N.R. B.U. n. 30/73);

Inoltre, con la frequenza necessaria saranno effettuati periodici controlli delle bilance, delle tarature dei termometri dell'impianto, la verifica delle caratteristiche del bitume, la verifica dell'umidità residua degli aggregati minerali all'uscita dell'essiccatore ed ogni altro controllo ritenuto opportuno.

4.4.6. Formazione e confezione delle miscele

Il conglomerato sarà confezionato mediante impianti fissi autorizzati, di idonee caratteristiche, mantenuti sempre perfettamente funzionanti in ogni loro parte. La produzione di ciascun impianto non dovrà essere spinta oltre la sua potenzialità per garantire il perfetto essiccamento, l'uniforme riscaldamento della miscela ed una perfetta vagliatura che assicuri una idonea riclassificazione delle singole classi degli aggregati. L'impianto dovrà comunque garantire uniformità di produzione ed essere in grado di realizzare miscele del tutto rispondenti a quelle di progetto. Il dosaggio dei componenti della miscela dovrà essere eseguito a peso mediante idonea apparecchiatura la cui efficienza dovrà essere costantemente controllata. Ogni impianto dovrà assicurare il riscaldamento del bitume alla temperatura richiesta ed a viscosità uniforme fino al momento della miscelazione nonché il perfetto dosaggio sia del bitume che dell'additivo. La zona destinata all'ammannimento degli inerti sarà preventivamente e convenientemente sistemata per annullare la presenza di sostanze argillose e ristagni di acqua che possano compromettere la pulizia degli aggregati. Inoltre i cumuli delle diverse classi dovranno essere nettamente separati tra di loro e l'operazione di rifornimento nei predosatori eseguita con la massima cura. Il tempo di mescolazione effettivo sarà stabilito in funzione delle caratteristiche dell'impianto e dell'effettiva temperatura raggiunta dai componenti la miscela, in misura tale da permettere un completo ed uniforme rivestimento degli inerti con il legante; comunque esso non dovrà mai scendere al di sotto dei 25 secondi. La temperatura degli aggregati, opportunamente essiccati, all'atto della mescolazione dovrà essere compresa tra 120°C e 130°C e quella del legante tra 120°C e 130°C, salvo diverse disposizioni della DL in rapporto al tipo di bitume impiegato. Per la verifica delle suddette temperature, gli essiccatori, le caldaie e le tramogge degli impianti dovranno essere muniti di termometri fissi perfettamente funzionanti e periodicamente tarati. L'umidità degli aggregati all'uscita dell'essiccatore non dovrà di norma superare lo 0,2%.

4.4.7. Posa in opera delle miscele

La miscela bituminosa verrà stesa sul piano finito della fondazione dopo che sia stata accertata dalla DL la rispondenza di quest'ultima ai requisiti di quota, sagoma, densità e portanza. Prima della stesa del conglomerato sulla fondazione in misto stabilizzato, per garantire l'ancoraggio, si dovrà provvedere alla rimozione della sabbia e delle eventuali parti fini non trattenute. La posa in opera dei conglomerati bituminosi verrà effettuata a mezzo di macchine vibrofinitrici dei tipi approvati dalla DL, in perfetto stato di efficienza e dotate di automatismo di autolivellamento. Le vibrofinitrici dovranno comunque lasciare uno strato finito perfettamente sagomato, privo di sgranamenti, fessurazioni ed esente da difetti dovuti a segregazioni degli elementi litoidi più grossi. Nella stesa si dovrà porre la massima cura alla formazione dei giunti longitudinali preferibilmente ottenuti mediante tempestivo affiancamento di una strisciata alla precedente con l'impiego di 2 o più finitrici. Qualora ciò non sia possibile, il bordo della striscia già realizzata dovrà essere spruzzato con emulsione bituminosa per assicurare la saldatura della striscia successiva. Se il bordo risulterà danneggiato o arrotondato si dovrà procedere al taglio verticale con idonea attrezzatura. I giunti trasversali, derivanti dalle interruzioni giornaliere, dovranno essere realizzati sempre previo taglio ed asportazione della parte terminale di azzeramento. La sovrapposizione dei giunti longitudinali tra i vari strati sarà programmata e realizzata in maniera che essi risultino fra di loro sfalsati di almeno cm 20 e non cadano mai in corrispondenza delle 2 fasce della corsia di marcia normalmente interessata dalle ruote dei veicoli pesanti. Il trasporto del conglomerato dall'impianto di confezione al cantiere di stesa, dovrà avvenire mediante mezzi di trasporto di adeguata portata, efficienti e veloci e comunque sempre dotati di telone di copertura per evitare i raffreddamenti superficiali eccessivi e formazione di crostoni. La temperatura del conglomerato bituminoso all'atto della stesa, controllata immediatamente dietro la finitrice, dovrà risultare in ogni momento non inferiore a 120°C. La stesa dei conglomerati dovrà essere sospesa quando le condizioni meteorologiche generali possano pregiudicare la perfetta riuscita del lavoro. La compattazione dei conglomerati dovrà iniziare appena stesi dalla vibrofinitrice e condotta a termine senza soluzione di continuità. La compattazione sarà realizzata a mezzo di rulli gommati o vibrati gommati (comunque con peso non inferiore a 18 ton.) con l'ausilio di rulli a ruote metalliche (comunque con peso non inferiore a 10 ton.), tutti in numero adeguato ed aventi idoneo peso e caratteristiche tecnologiche avanzate in modo da assicurare il raggiungimento delle massime densità ottenibili. Al termine della compattazione, lo strato dovrà avere una densità uniforme in tutto lo spessore non inferiore al 98% di quella Marshall, rilevata all'impianto o alla stesa. Tale valutazione sarà eseguita sulla produzione secondo la norma B.U. C.N.R. 40-1973, su carote; il valore risulterà dalla media di due prove. Si avrà cura inoltre che la compattazione sia condotta con la metodologia più adeguata per ottenere uniforme addensamento in ogni punto ed evitare fessurazioni e scorrimenti nello strato appena steso. La superficie degli strati dovrà presentarsi priva di

irregolarità ed ondulazioni. Un'asta rettilinea lunga m 4, posta in qualunque direzione sulla superficie finita di ciascuno strato dovrà aderirvi uniformemente. Saranno tollerati scostamenti contenuti nel limite di 10 mm. Il tutto nel rispetto degli spessori e delle sagome di progetto.

4.5. MISTO GRANULOMETRICO STABILIZZATO TRATTATO CON SCHIUMATO E CEMENTO

4.5.1. Descrizione

Il misto granulometrico stabilizzato trattato con bitume schiumato e cemento è costituito principalmente da aggregati provenienti dalla fresatura della preesistente fondazione stradale la cui granulometria potrà essere eventualmente corretta con l'aggiunta di aggregato fresco in opportune quantità e pezzature, miscelati a freddo in apposito impianto centralizzato assieme a cemento Portland 325, bitume schiumato ed acqua. La stesa della miscela ottenuta viene realizzata tramite motograder oppure tramite una normale vibrofinitrice e successivamente compattata tramite rulli compattatori tradizionali.

4.5.2. Materiali inerti

Nel caso di impiego di aggregati provenienti da operazioni di riciclo occorrerà verificare l'assenza di sostanze plastiche (limi, argille) e la rispondenza alle prescrizioni granulometriche (CNR BU n. 23 del 14.12.71) indicate nel fuso seguente (Tabella 22, Figura 7).

SERIE CRIVELLI E SETACCI UNI	PASSANTE TOTALE IN PESO %
Crivello 71	100
Crivello 40	75 ÷ 100
Crivello 25	60 ÷ 87
Crivello 10	35 ÷ 67
Crivello 5	25 ÷ 50
Setaccio 2	15 ÷ 40
Setaccio 0,4	7 ÷ 22
Setaccio 0,075	2 ÷ 10

Tabella 22: fuso di riferimento dello stabilizzato con schiumato e cemento.

Qualora le caratteristiche del misto non rispondessero a tali indicazioni si deve operare mediante l'aggiunta di inerti di dimensioni e caratteristiche tali da riportare la curva granulometrica nel fuso richiesto.

Gli inerti di integrazione devono essere conformi alle seguenti specifiche:

- perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature (CNR 34/73) inferiore al 25% in peso;
- sensibilità al gelo (CNR 80/80) inferiore al 30%;
- coefficiente di imbibizione (CNR fasc. IV/1953) inferiore a 0.015;
- coefficienti di forma Cf e di appiattimento Ca (CNR 95/84) inferiori rispettivamente a 3 ed 1.58.

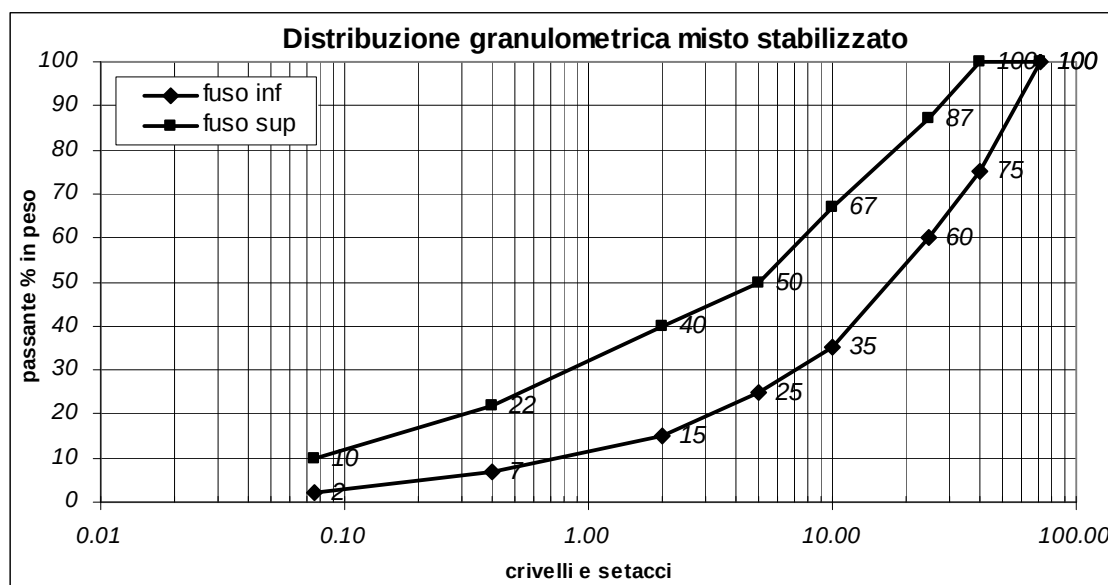


Figura 7: rappresentazione grafica del fuso di riferimento.

4.5.3. Bitume schiumato

Il legante è costituito da bitume schiumato dosato in percentuale variabile (3 ÷ 3.5% circa) sul peso dell'aggregato.

Ai fini dell'accettazione, almeno 15 giorni prima dell'inizio della posa in opera, l'Impresa è tenuta a predisporre la qualificazione del bitume tramite certificazione attestante i requisiti prescritti. Tale certificazione deve essere di norma rilasciata dal produttore o da un Laboratorio che opera per c/terzi.

4.5.4. Cemento

Deve essere impiegato cemento Portland, d'altoforno o pozzolanico (tipo I, III o IV) con classe di resistenza 325, in percentuale variabile (2.5 ÷ 3.0% circa) sul peso dell'aggregato.

4.5.5. Acqua

Deve essere impiegata acqua pura, priva di sostanze organiche, esente da impurità dannose, oli, acidi, alcali, materia organica e qualsiasi altra sostanza nociva.

4.5.6. Miscele

Le percentuali ottimali di cemento, di bitume schiumato, di acqua e dell'eventuale integrazione di inerti saranno stabilite in relazione alle prove di addensamento e di resistenza eseguite in laboratorio su provini cilindrici di miscela, confezionati entro stampi C.B.R. (CNR UNI 10009). In particolare, sarà necessario operare secondo quanto segue:

1. - per una corretto impiego del materiale fresato preesistente è opportuno eseguire, sulla tratta interessata dai lavori, prelievi di materiale per determinarne in laboratorio l'umidità (CNR UNI 10008/63) e la curva granulometrica (CNR 23/71). Le determinazioni sopra riportate devono essere intensificate in caso di disomogeneità del materiale;
2. - per la determinazione dell'Umidità ottimale di costipamento e relativa Densità massima secca della miscela degli aggregati di progetto si esegue uno studio Proctor modificato (CNR B.U. n°69/78). La miscela granulometrica sottoposta a prova Proctor deve contenere una percentuale di cemento pari all'incirca alla metà di quella ottimale e quantità d'acqua massime crescenti dell'1,0% in peso;
3. - per la determinazione delle percentuali ottimali di bitume schiumato e di cemento, si confezionano provini di miscela essiccata entro stampi C.B.R. impiegati senza disco spaziatore (altezza 17,78 cm, diametro 15,24 cm, volume 3242 cm³) da maturarsi 7 giorni a T=25 °C e sottoporsi a prove di compressione e trazione indiretta. Per il confezionamento dei provini gli stampi C.B.R. verranno muniti di collare di prolunga allo scopo di consentire il regolare costipamento dell'ultimo strato con la consueta eccedenza di circa 1 cm rispetto all'altezza dello stampo vero e proprio. Tale eccedenza deve essere eliminata, previa rimozione del collare suddetto e rasatura dello stampo, affinché l'altezza del provino risulti definitivamente 17,78 cm. La miscela verrà costipata su 5 strati con il pestello e l'altezza di caduta di cui alla norma AASHTO modificata e 85 colpi per strato, in modo da ottenere una energia di costipamento pari a quella della prova citata (diametro pestello 51±0,5 mm, peso pestello 4,535±0,005 daN, altezza di caduta 45,7 cm). Le miscele che costituiscono i provini dovranno essere confezionate con quantità crescenti di emulsione bituminosa modificata sovrastabilizzata e cemento, calcolandole in modo che la percentuale di umidità effettiva dell'impasto non sia mai superiore a quella misurata sulla curva di massima densità.

Le rotture dei provini devono avvenire secondo le seguenti modalità e per ogni percentuale di cemento e di bitume si dovranno confezionare:

- n. 3 provini per la determinazione della resistenza a compressione (CNR BU n. 29/83)
- n. 3 provini per la determinazione della resistenza a trazione indiretta (Brasiliana) (CNR BU n. 97/84)

Dai risultati delle prove di laboratorio devono essere scelti la curva, la densità, le resistenze di progetto, la quantità di bitume schiumato e di cemento di progetto da usare come riferimento nelle prove di controllo.

La miscela ottimizzata deve possedere una resistenza a compressione a 7 giorni non minore di 25 daN/cm² e non superiore a 45 daN/cm², ed a trazione non inferiore a 2.5 daN/cm².

4.5.7. Modalità esecutive

La posa in opera della miscela deve essere effettuata mediante sistemi che consentano di ottenere uno strato perfettamente sagomato, privo di sgranamenti, fessurazioni ed esente da difetti dovuti alla segregazione degli elementi litoidi più grossi. Subito dopo la stesa si deve procedere al livellamento del conglomerato ed alla compattazione mediante l'impiego di un rullo vibrante di carico statico > 20 ton con controllo di frequenza e di ampiezza di vibrazione e di un rullo gommato di carico statico > 25 ton. Si avrà cura inoltre che la compattazione sia condotta con la metodologia più adeguata per ottenere un uniforme addensamento in ogni punto ed evitare fessurazioni e scorrimenti nello strato appena steso.

Al termine della compattazione lo strato finito deve avere una densità secca uniforme in tutto lo spessore non inferiore al 98% di quella Proctor.

Subito dopo il completamento delle opere di costipamento e di rifinitura deve essere eseguita la spruzzatura di un velo protettivo di emulsione acida al 55% in ragione di 0,5 Kg/m².

Con temperatura dell'aria inferiore ai 5°C la lavorazione della miscela deve essere sospesa e comunque sempre in caso di pioggia. Le lavorazioni successive e l'apertura al traffico di cantiere, dipenderà dalle resistenze raggiunte, comunque saranno decise di volta in volta.

4.5.8. Controllo delle lavorazioni

Il controllo della qualità del misto granulometrico stabilizzato trattato con cemento e bitume schiumato e della sua posa in opera deve essere effettuato mediante prove di laboratorio sui materiali costituenti, sulla miscela, sulle carote estratte dalla pavimentazione e con prove in situ.

L'ubicazione dei prelievi e la frequenza delle prove saranno a discrezione della Direzione Lavori.

Sui materiali costituenti devono essere verificate le caratteristiche di accettabilità. Sulla miscela vengono determinate: la percentuale di bitume, la percentuale d'acqua, la granulometria degli aggregati (riciclati e di integrazione).

Le caratteristiche della miscela compattata in sito verranno controllate dopo 15 giorni dalla stesa. Sulle carote vengono determinati il peso di volume e la percentuale dei vuoti residui.

Potranno, inoltre, essere eseguite prove di carico con piastra in sito per le quali il valore del modulo di deformazione M_d al primo ciclo di carico e nell'intervallo compreso fra 1.5 e 2.5 daN/cm², rilevato in un tempo compreso tra 6 e 12 ore dalla compattazione non dovrà mai essere inferiore ai 1500 daN/cm².

Le caratteristiche del Misto Granulometrico Stabilizzato trattato con bitume schiumato e cemento sono raccolte nella seguente tabella (23):

AGGREGATO			
Perdita in peso per abrasione “Los Angeles”		≤ 25%	
Dimensione massima		71 mm	
Sensibilità al gelo		≤ 30%	
Coefficiente di imbibizione		≤ 0.015	
Coefficiente di forma		≤ 3	
Coefficiente di appiattimento		≤ 1.58	
BITUME DA SCHIUMARE			
CARATTERISTICHE	Normativa	unità di misura	Valori Indicativi
Penetrazione a 25°C, 100 g / 5”	EN 1426	dmm	90
Punto di rammollimento (P.A.)	EN 1427	°C	45
Viscosità dinamica 160°C	EN 13702-1	Pas	0.13
CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI MEDIE		unità di misura	Valori indicativi
Volume di schiumatura con % acqua = 3		Volume	15 - 30
Tempo di half time		Secondi	60 – 180
CONDIZIONI OPERATIVE		unità di misura	Valori indicativi
Temperatura di impiego ottimale		°C	175
Temperatura di impiego		°C	160 - 180
(*) Cement MIX: 100 gr di cemento 325 (o in alternativa 100 gra di calce IDRATA) miscelati intimamente con 30 gr di acqua vengono addizionati 100 gr di emulsione sovrastabilizzata e mescolati per almeno 20 minuti. Durante questo tempo non si deve verificare nessuna formazione di coaguli e la miscela deve rimanere liquida.			
MISCELA IN LABORATORIO			
Resistenza compressione a 7 gg. (daN/cm²)		25 ≤ σ _C ≤ 45	
Resistenza trazione a 7 gg.(Prova Brasiliana) (daN/cm²)		σ _T ≥ 2,5	
MISCELA IN SITO			
Densità in sito		≥ 98 % γ _{D max}	
Md (Δp =1.5–2.5 daN/cm²) (daN/cm²)		M _d ≥ 1500	

Tabella 23: specifiche degli aggregati del legante e della miscela.

4.6. CONGLOMERATO BITUMINOSO PER STRATI DI USURA ANTISDRUCCIOLO SMA

4.6.1. Descrizione

Lo Splitt-Mastix-Asphalt (SMA) è un conglomerato bituminoso chiuso a scheletro essenzialmente granulare (ovvero avente un quantitativo superiore al 70% di graniglia sul totale degli aggregati lapidei, filler compreso), povero in sabbia e relativamente ricco in mastice di bitume. Lo SMA è composto da una curva abbastanza discontinua i cui vuoti vengono riempiti dal mastice di bitume modificato, filler e fibre, che gli conferiscono elevate proprietà meccaniche, una forte resistenza all'invecchiamento ed un aspetto superficiale rugoso. Infatti, scopo della curva di tipo SMA, è quello di realizzare un conglomerato per:

- migliorare la sicurezza del traffico (in caso di pioggia, eliminazione dell'effetto acquaplaning e forte riduzione dell'effetto spray dei pneumatici);
- ridurre l'inquinamento acustico dei veicoli.

Il piano di posa dovrà essere impermeabile ed avere una pendenza trasversale sufficiente per assicurare il drenaggio superficiale dell'acqua e lo scarico nelle cunette o scivoli laterali. A tale scopo lo spessore finito dovrà essere di 4 cm.

4.6.2. Materiali inerti

Il prelievo dei campioni di materiali inerti, per il controllo dei requisiti di accettazione appresso indicati, verrà effettuato secondo le norme C.N.R., Capitolo II del fascicolo 4/1953. Per il prelevamento dei campioni destinati alle prove di controllo dei requisiti di accettazione, così come per le modalità di esecuzione delle prove stesse, valgono le prescrizioni contenute nel fascicolo C.N.R. B.U n. 93 (11-7-1983). L'aggregato grosso dovrà essere ottenuto per frantumazione ed essere costituito da elementi sani, duri, durevoli, poliedrici, con spigoli vivi, a superficie ruvida, puliti ed esenti da polvere o da materiali estranei. L'aggregato grosso sarà costituito da materiali che potranno anche essere di provenienza o natura petrografica diversa, purché alle prove appresso elencate, eseguite su campioni rispondenti alla miscela che si intende formare, risponda ai seguenti requisiti:

- il materiale deve provenire da frantumazione di rocce silicee eruttivo magmatiche preferibilmente porfiriche;
- perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature (C.N.R. 34/1973), inferiore od uguale al 20%;
- coefficiente di levigabilità accelerata (C.N.R. 140), maggiore di 0,45;
- coefficiente di forma maggiore di 0,15;
- coefficiente di appiattimento (AFNOR P 18-561) per ogni classe di aggregati, minore di 10;
- coefficiente di imbibizione (C.N.R. 4/1953), inferiore a 0,015;
- materiale non idrofilo (C.N.R. 4/1953), con limitazione per la perdita in peso allo 0,7%;

L'aggregato fino sarà costituito da sabbie esclusivamente di frantumazione che dovranno soddisfare ai requisiti dell' Art. 5 delle norme C.N.R. fascicolo n. 4 del 1953 ed in particolare:

- equivalente in sabbia (C.N.R. 27/1972), maggiore di 70%;

Gli additivi minerali (fillers) saranno costituiti da polvere di rocce preferibilmente calcaree o da cemento, calce idrata, calce idraulica e dovranno risultare alla setacciatura per via secca per il 100% al setaccio n. 40 ASTM, per almeno il 90% al setaccio n. 80 ASTM e per almeno il 80% al setaccio n. 200 ASTM.

4.6.3. Legante – bitume modificato warm tipo hard

Dovranno essere impiegati bitumi modificati mediante l'opportuna additivazione di idonei polimeri e fluidificanti al fine di determinare un aumento dell'intervallo di elasto-plasticità (riduzione della suscettibilità termica), un aumento dell'adesione, una riduzione della viscosità alle alte temperature fine al miglioramento della lavorabilità alle temperature 120-130°C. La modifica delle proprietà reologiche dovrà inoltre conseguire nei conglomerati bituminosi, una maggiore resistenza alle sollecitazioni ed alla loro ripetizione (comportamento a fatica). Il dosaggio dei polimeri suscettibili di impiego potrà variare a secondo delle condizioni di impiego, della natura degli aggregati e delle caratteristiche del prodotto, tra il 5 e l'8% sul peso del bitume. I tipi, i dosaggi e le condizioni di impiego, dovranno ottenere il preventivo benessere della DL. Il legante modificato dovrà essere prodotto in appositi impianti capaci di dosare e disperdere perfettamente i polimeri nel bitume e dovrà presentare caratteristiche di costanza qualitativa, verificata da laboratori attrezzati. Lo stoccaggio dovrà avvenire in apposito serbatoio riscaldato, coibentato e preventivamente svuotato dal bitume preesistente. Il prelevamento dei campioni di bitume dovrà avvenire secondo la norma EN 58. I dati della caratterizzazione chimico-fisica e reologica del legante fluidificato elastomerizzato dovranno rientrare fra quelli di seguito indicati (Tabella 24):

Tipo di prova	Metodo di prova	Caratteristiche richieste
Punto di rammollimento P.A.	EN 1427	superiore a 75 °C
Penertazione a 25°C	EN 1426	50 - 70 dmm
Punto di rottura Fraass	EN 12593	< -15°C
Viscosità dinamica a 160°C*	ASTM D 4402	superiore a 0,4 Pa*s
Ritorno elastico a 25°C	EN 13398	min. 75%
Stabilità allo stoccaggio:	EN 13399	
- sulla penetrazione		± 5 dmm
- sul rammollimento		± 3°C
Invecchiamento (RTFOT)	EN 12607	
- sulla penetrazione		> 60% dell'originale
- sul rammollimento		± 5°C dall'originale

Tabella 24: caratteristiche reologiche del legante usato per l'usura *) Rpm 20, Spindle S21.

4.6.4. Fibre

Devono essere impiegate fibre stabilizzanti, di materiale plastico o carbonio con punto di fusione superiore ai 220-250°C, il cui tenore sarà regolato in funzione del tipo, ma che dovrà essere compreso tra lo (0.1÷0.7)% in peso.

4.6.5. Miscele

Le miscele degli aggregati da adottarsi per lo strato di usura SMA dovranno avere una composizione granulometrica contenuta nel seguente fuso (Tabella 25, Figura 8):

Serie setacci ASTM	Maglie mm	Passante % totale in peso
		<u>0/12 mm</u>
Setaccio	14	100
Setaccio	12.5	90 - 100
Setaccio	8	58 - 83
Setaccio	4	27 - 44
Setaccio	2	20 - 30
Setaccio	1	17 - 27
Setaccio	0,5	13 - 23
Setaccio	0,063	8 - 13

Tabella 25: fuso di riferimento per lo strato di usura.

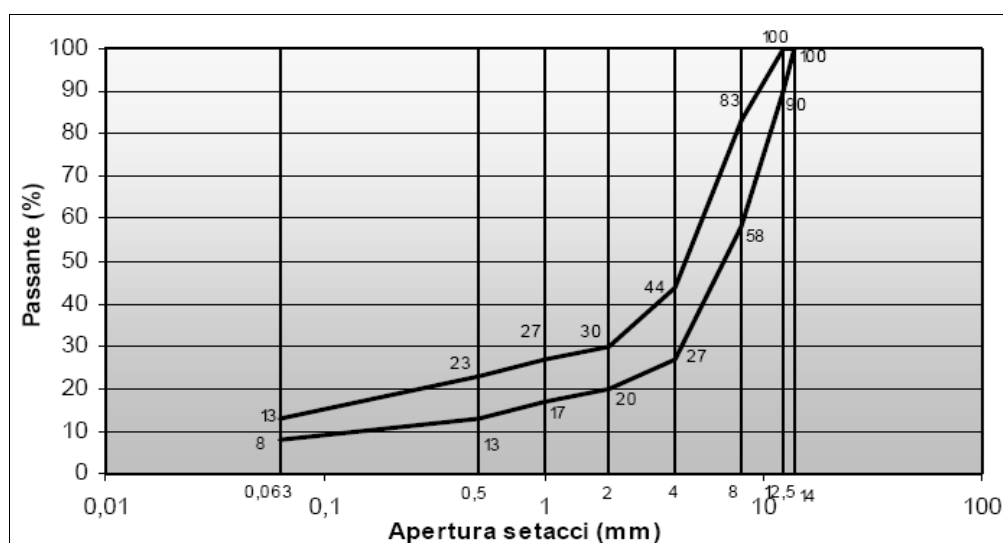


Figura 8: Fuso granulometrico dello SMA.

Il legante bituminoso non dovrà essere inferiore al 6 % riferito al peso totale degli aggregati. Il contenuto di bitume della miscela dovrà comunque essere quello necessario all'ottimizzazione delle caratteristiche di seguito riportate. Il conglomerato dovrà avere i seguenti requisiti:

- a) resistenza meccanica tale da sopportare senza deformazioni permanenti le sollecitazioni trasmesse dalle ruote dei veicoli sia in fase dinamica che statica, anche sotto le più alte temperature estive, senza peraltro manifestare comportamenti negativi durante i mesi invernali; il valore della stabilità Marshall (C.N.R. 30-1973) eseguita a 60°C su provini costipati con 75 colpi di maglio per faccia dovrà essere di almeno 800 Kg. Il valore della rigidità Marshall, cioè il rapporto tra stabilità misurata in Kg e lo scorrimento misurato in mm, dovrà essere in ogni caso superiore a 320;
- b) la resistenza alla prova di trazione indiretta (C.N.R. B.U. 134) a 25°C di almeno 0,80 N/mm²;
- c) la deformazione alla prova di impronta (C.N.R. 136-1991) con punzone da 500 mmq a 60°C dopo 60 minuti, deve essere inferiore a 5 dmm;
- d) la percentuale dei vuoti dei provini Marshall deve essere compresa fra 3 e 7%.

4.6.6. Controllo dei requisiti di accettazione

L'Impresa farà eseguire prove sperimentali sui campioni di aggregato e di legante per la relativa accettazione. L'Impresa dovrà presentare, con congruo anticipo rispetto all'inizio dei lavori e per ogni cantiere di produzione, la composizione delle miscele che intende adottare; ogni composizione proposta dovrà essere corredata da una completa documentazione degli studi effettuati in laboratorio, attraverso i quali si è ricavata la ricetta ottimale. Una volta accettata dalla DL la composizione proposta, l'Impresa deve ad essa attenersi rigorosamente comprovandone l'osservanza. Non saranno ammesse variazioni del contenuto di aggregato grosso superiore al $\pm 3,5\%$ e di sabbia superiore al $\pm 2\%$ sulla percentuale corrispondente alla curva granulometrica prescelta, e del $\pm 1\%$ sulla percentuale di additivo. Per la quantità di bitume non sarà tollerato uno scostamento dalla percentuale stabilita del $\pm 0,2\%$. Tali valori dovranno essere verificati con le prove sul conglomerato bituminoso prelevato all'impianto come pure dall'esame delle carote prelevate in sito. In laboratorio dovranno essere effettuate, quando necessarie:

- la verifica granulometrica dei singoli aggregati approvvigionati in cantiere e quella degli aggregati stessi all'uscita dei vagli di riclassificazione;
- la verifica della composizione del conglomerato bituminoso (granulometria degli inerti, % di bitume, % di additivo) prelevando lo stesso all'uscita del mescolatore o a quella della tramoggia di stoccaggio;
- la verifica delle caratteristiche Marshall del conglomerato e precisamente: peso di volume (C.N.R. B.U. n. 40/73) media di due prove; percentuale dei vuoti (C.N.R. B.U. n. 39/73) media di due prove; stabilità e rigidità Marshall (C.N.R. B.U. n. 30/73);

Inoltre, con la frequenza necessaria saranno effettuati periodici controlli delle bilance, delle tarature dei termometri dell'impianto, la verifica delle caratteristiche del bitume, la verifica dell'umidità residua degli aggregati minerali all'uscita dell'essiccatore ed ogni altro controllo ritenuto opportuno.

4.6.7. Formazione e confezione delle miscele

Il conglomerato sarà confezionato mediante impianti fissi autorizzati, di idonee caratteristiche, mantenuti sempre perfettamente funzionanti in ogni loro parte. La produzione di ciascun impianto non dovrà essere spinta oltre la sua potenzialità per garantire il perfetto essiccamento, l'uniforme riscaldamento della miscela ed una perfetta vagliatura che assicuri una idonea riclassificazione delle singole classi degli aggregati. L'impianto dovrà comunque garantire uniformità di produzione ed essere in grado di realizzare miscele del tutto rispondenti a quelle di progetto. Il dosaggio dei componenti della miscela dovrà essere eseguito a peso mediante idonea apparecchiatura la cui efficienza dovrà essere costantemente controllata. Ogni impianto dovrà assicurare il riscaldamento del bitume alla temperatura richiesta ed a viscosità uniforme fino al momento della miscelazione nonché il perfetto dosaggio sia del bitume che dell'additivo. La zona destinata all'ammannimento degli inerti sarà preventivamente e convenientemente sistemata per annullare la presenza di sostanze argillose e ristagni di acqua che possano compromettere la pulizia degli aggregati. Inoltre i cumuli delle diverse classi dovranno essere nettamente separati tra di loro e l'operazione di rifornimento nei predosatori eseguita con la massima cura. Il tempo di mescolazione effettivo sarà stabilito in funzione delle caratteristiche dell'impianto e dell'effettiva temperatura raggiunta dai componenti la miscela, in misura tale da permettere un completo ed uniforme rivestimento degli inerti con il legante; comunque esso non dovrà mai scendere al di sotto dei 25 secondi. La temperatura degli aggregati, opportunamente essiccati, all'atto della mescolazione dovrà essere compresa tra 120°C e 130°C e quella del legante tra 120°C e 130°C, salvo diverse disposizioni della DL in rapporto al tipo di bitume impiegato. Per la verifica delle suddette temperature, gli essiccatori, le caldaie e le tramogge degli impianti dovranno essere muniti di termometri fissi perfettamente funzionanti e periodicamente tarati. L'umidità degli aggregati all'uscita dell'essiccatore non dovrà di norma superare lo 0,2%.

4.6.8. Preparazione del piano di posa

Si dovrà provvedere alla stesa di una uniforme mano di attacco impermeabilizzante con emulsione di bitume modificato (le caratteristiche di tale bitume sono le stesse di quello usato per il confezionamento del conglomerato) in ragione di circa kg/m² 1,0. Si dovrà provvedere quindi al successivo spargimento di uno strato di graniglia 8/12 mm della stessa natura chimica di quella usata per il conglomerato (prebitumata con lo 0,6 - 0,8% di bitume sul peso degli inerti di pen. 50/70 dmm), nella quantità di 8-10 litri/m², come strato antiaderente per i mezzi d'opera ed alla sua immediata rullatura per favorirne l'adesione alla mano di attacco. L'eventuale eccesso di graniglia o comunque quella non ancorata dovrà essere eliminata mediante motospazzatrice aspirante.

4.6.9. Posa in opera delle miscele

La miscela bituminosa verrà stesa sul piano finito dopo che sia stata accertata dalla DL la rispondenza di quest'ultimo ai requisiti di quota, sagoma, densità e portanza indicati. La posa in opera dei conglomerati bituminosi verrà effettuata a mezzo di macchine vibrofinitrici dei tipi approvati dalla DL, in perfetto stato di efficienza e dotate di automatismo di autolivellamento. Le vibrofinitrici dovranno comunque lasciare uno strato finito perfettamente sagomato, privo di sgranamenti, fessurazioni ed esente da difetti dovuti a segregazioni degli elementi litoidi più grossi. Nella stesa si dovrà porre la massima cura alla formazione dei giunti longitudinali preferibilmente ottenuti mediante tempestivo affiancamento di una strisciata alla precedente con l'impiego di 2 o più finitrici. Qualora ciò non sia possibile, il bordo della striscia già realizzata dovrà essere spruzzato con emulsione bituminosa per assicurare la saldatura della striscia successiva. Se il bordo risulterà danneggiato o arrotondato si dovrà procedere al taglio verticale con idonea attrezzatura. I giunti trasversali, derivanti dalle interruzioni giornaliere, dovranno essere realizzati sempre previo taglio ed asportazione della parte terminale di azzeramento. La sovrapposizione dei giunti longitudinali tra i vari strati sarà programmata e realizzata in maniera che essi risultino fra di loro sfalsati di almeno cm 20 e non cadano mai in corrispondenza delle 2 fasce della corsia di marcia normalmente interessata dalle ruote dei veicoli pesanti. Il trasporto del conglomerato dall'impianto di confezione al cantiere di stesa, dovrà avvenire mediante mezzi di trasporto di adeguata portata, efficienti e veloci e comunque sempre dotati di telone di copertura per evitare i raffreddamenti superficiali eccessivi e formazione di crostoni. La temperatura del conglomerato bituminoso all'atto della stesa, controllata immediatamente dietro la finitrice, dovrà risultare in ogni momento non inferiore a 120°C. La stesa dei conglomerati dovrà essere sospesa quando le condizioni meteorologiche generali possano pregiudicare la perfetta riuscita del lavoro. La compattazione dei conglomerati dovrà iniziare appena stesi dalla vibrofinitrice e condotta a termine senza soluzione di continuità. La compattazione sarà realizzata a mezzo di rulli a ruote metalliche da 8 - 12 tonnellate a rapida inversione di marcia e con ruote motrici rivolte verso la finitrice. La rullatura dovrà iniziare con il costipamento della giunzione longitudinale con la striscia adiacente, passando quindi sull'altro lato della nuova striscia, procedendo poi gradatamente verso il centro, e tornando infine sulla giunzione. Al termine della compattazione, lo strato dovrà avere le seguenti caratteristiche:

- densità uniforme in tutto lo spessore non inferiore al 97% di quella Marshall dello stesso giorno rilevata all'impianto o alla stesa, con vuoti residui non superiori al 6% dopo 180 giorni dall'apertura al traffico. Tale valutazione sarà eseguita sulla produzione secondo la norma B.U. C.N.R. 40-1973, su carote di 10 - 15 cm di diametro; il valore risulterà dalla media di due prove.

Si avrà cura inoltre che la compattazione sia condotta con la metodologia più adeguata per ottenere uniforme addensamento in ogni punto ed evitare fessurazioni e scorrimenti nello strato appena steso.

4.6.10. Requisiti di accettazione della superficie viabile

La superficie degli strati dovrà presentarsi priva di irregolarità ed ondulazioni. Un'asta rettilinea lunga m 4, posta in qualunque direzione sulla superficie finita di ciascuno strato dovrà aderirvi uniformemente. Il tutto nel rispetto degli spessori e delle sagome di progetto

La resistenza di attrito radente (SRT) della pavimentazione (CNR BU n. 105 del 15.03.85) misurata con l'apparecchio portatile a pendolo deve risultare non inferiore al seguente valore: $SRT \geq 55$

I valori di zona SRT, costituiti dalla media dei valori misurati in 5 punti scelti sulla medesima traiettoria parallela all'asse stradale alla distanza di 10 m l'uno dall'altro, dovranno risultare ovunque superiori ai valori sopraindicati.

Tali valori, inoltre, non dovranno differire, dopo circa 2 mesi di assoggettamento al traffico, più di 2 punti da quelli ottenuti nelle medesime rispettive zone della pavimentazione appena ultimata.

Inoltre, la macro-rugosità superficiale (CNR BU n. 94 del 15.10.83) misurata con il sistema dell'altezza in sabbia dovrà avere i seguenti requisiti:

$$HS \geq 1 \text{ (mm)}$$

Le misure di resistenza di attrito radente e di macro-rugosità superficiale dovranno essere effettuate in un periodo di tempo compreso tra il 15° ed il 180° giorno dall'apertura al traffico.

5. CALCOLO DELLE SOVRASTRUTTURE STRADALI

5.1. INTRODUZIONE

Il problema della progettazione e dimensionamento delle sovrastrutture stradali è stato oggetto negli ultimi decenni, in tutti i paesi del mondo in qualche modo interessati ai problemi del trasporto su strada, di un impegno scientifico eccezionale sia per il numero che per la portata delle ricerche compiute. Infatti il problema presenta estremo interesse da un lato per gli oneri economici connessi con la costruzione della sovrastruttura in cui anche modeste variazioni di spessore degli strati o delle caratteristiche dei materiali comportano ingenti variazioni dei costi, dall'altro per il danno arrecato al trasporto stradale da interventi di manutenzione non programmata ma resi necessari dall'imprevisto decadimento della sovrastruttura dovuto ad una errata progettazione.

In linea di principio il metodo di progetto di una sovrastruttura stradale non differisce sostanzialmente da quello di una qualsiasi altra struttura dell'ingegneria civile: note le caratteristiche meccaniche dei materiali da impiegare ed i carichi trasmessi dai veicoli, si tratta di dimensionare lo spessore dei vari strati in modo da contenere entro limiti prefissati i danni che tali carichi impongono.

Purtroppo nel caso delle sovrastrutture stradali il problema diventa estremamente complesso a causa delle caratteristiche dei materiali che variano in relazione alle situazioni ambientali ed in relazione allo stato tensionale indotto dai carichi. Inoltre i materiali, per effetto delle ripetute sollecitazioni e deformazioni prodotte dal passaggio dei veicoli, subiscono una progressiva alterazione da cui deriva una perdita delle caratteristiche di integrità e quindi di resistenza meccanica. Conseguentemente diventa quindi inevitabile associare ad ogni sovrastruttura sottoposta ad un certo traffico il concetto di "vita utile", intendendosi per vita utile quel periodo di tempo entro il quale la sovrastruttura non necessita di interventi straordinari.

Occorre quindi, per un corretto dimensionamento, fissare l'arco temporale di vita utile, determinare in tale arco temporale il numero di ripetizioni di carico ed infine verificare, mediante l'utilizzo di appropriate leggi di fatica, che i materiali resistano. In questa logica la sovrastruttura deve primariamente garantire modesta deformabilità e quindi elevata portanza per evitare che l'accumularsi del "danno da fatica", cioè la progressiva modificazione delle caratteristiche meccaniche degli strati, riduca eccessivamente la vita utile e richieda troppo frequenti interventi di manutenzione.

Il metodo di calcolo della sovrastruttura che più modernamente viene utilizzato è quello "razionale". Esso segue nelle sue grandi linee la logica impiegata nel progetto delle altre opere dell'ingegneria civile.

Si disegna la sovrastruttura caratterizzata dal numero, dallo spessore degli strati e dai materiali per ciascuno di questi impiegati; si esegue l'analisi dello stato tensionale e di deformazione prodotto negli strati e nel sottofondo dai carichi di traffico; si verifica che le tensioni e le deformazioni così calcolate non diano luogo ad alterazioni della sovrastruttura incompatibili con la sua funzionalità e sicurezza. Nel caso in cui tali alterazioni siano inaccettabili, si ridisegna la sovrastruttura e si ripete il procedimento.

Le alterazioni che interessano nel caso delle sovrastrutture flessibili e semirigide sono le fessurazioni da fatica e le ormaie. Il problema dalle ormaie può considerarsi risolto qualora in superficie si utilizzino conglomerati bituminosi confezionati con bitumi modificati e con inerti contenenti una buona percentuale di frantumato e caratterizzati da appropriata curva granulometrica. Le fessurazioni da fatica sono controllate mediante il calcolo tensionale e deformativo con il riferimento delle leggi di fatica dei materiali.

Per il calcolo la sovrastruttura stradale viene schematizzata come una serie di strati orizzontali sovrapposti, indefiniti in pianta e di spessore costante che possiedono le proprietà della omogeneità, della isotropia e della elasticità lineare. Questi strati sono appoggiati sul sottofondo schematizzato come un semispazio indefinito, anche esso omogeneo, elastico, isotropo. Si considera che fra di loro gli strati siano solidarizzati.

Ogni strato ed il sottofondo sono caratterizzati dal modulo "E" e dal coefficiente di Poisson "v".

I carichi di traffico agenti sulla superficie della sovrastruttura sono quelli verticali trasmessi dalle ruote dei veicoli, che si ritengono uniformemente distribuiti su superfici circolari, di area uguale a quella di impronta dei pneumatici con pressione pari a quella di gonfiaggio degli stessi.

In queste condizioni il problema presenta caratteristiche di simmetria polare; è quindi possibile assumere un sistema di riferimento polare con origine nel centro dell'area circolare di carico e asse "z" verticale rivolto verso il basso. Nei metodi di calcolo più recenti è prevista la presenza contemporanea di più carichi e quindi non esiste simmetria polare. Lo stato di tensione e di deformazione in qualsiasi punto del complesso degli strati, di coordinate x, y e z è individuato dalle sei componenti di tensione e di deformazione agenti sulle facce di un elementino delimitato dai piani paralleli a quelli del sistema di riferimento.

5.2. CARICHI, TRAFFICO E DEFLESSIONI AMMISSIBILI

L'analisi dei carichi di una pavimentazione richiede la conoscenza del numero e del tipo di veicoli che interesseranno la sovrastruttura durante la sua vita utile. E' quindi importante conoscere il carico trasmesso dagli assi del tram sulla sovrastruttura ed anche la frequenza degli stessi durante il servizio.

Per quanto riguarda i carichi il Nuovo Codice della Strada limita gli assi singoli al carico di 120 kN. Tuttavia considerato che:

- spesso i veicoli pesanti sono sovraccaricati,
- gli enti gestori delle strade hanno facoltà di deroga,
- i veicoli pesanti viaggiano a notevole velocità e quindi inducono effetti dinamici,

si è ritenuto opportuno fare riferimento all'asse da 130 kN.

A questo proposito si nota che lo scarto di 10 kN sul carico per asse comporta notevole aggravio delle sollecitazioni sulla sovrastruttura, come si deduce dalla formula di Yoder per la determinazione dei coefficienti di equivalenza.

L'asse da 130 kN è stato richiesto anche da ATC (l'Azienda di Trasporti Pubblici di Bologna) per la metro tramvia del capoluogo emiliano.

In definitiva i valori utilizzati nei calcoli per l'asse standard sono i seguenti:

- a) Carico asse = 130 kN;
- b) Carico su ogni ruota = 65 kN;
- c) Pressione di gonfiaggio = 0.8 MPa.

Per quanto riguarda il numero di assi equivalenti cumulati durante l'arco temporale di vita utile, assunto pari a 30 anni, si fanno le seguenti considerazioni:

- su ogni linea per ogni direzione di marcia si considera il transito di un tram ogni 4 minuti nelle 12 ore diurne ed il transito di un tram ogni 10 minuti nelle 10 ore notturne.
- totale veicoli al giorno: $20 \times 12 + 6 \times 12 = 315$
- totale veicoli all'anno: $315 \times 365 = 114.975$

- totale veicoli nella vita utile: $114.975 \times 30 = 3.449.750$
- totale assi equivalenti da 130 kN durante la vita utile:
- $3.449.750 \times 2 = 6.898.500$, in cifra tonda 6.900.000 (6.9E+06).

Per quanto riguarda le deflessioni ammissibili sulla sovrastruttura, si fa riferimento alle esperienze svolte dal Dipartimento DICAM, sezione STRADE dell'Università di Bologna. In pratica si è constatato che, per strade molto trafficate, la vita utile è sufficientemente lunga allorché le deflessioni in superficie, sotto l'asse da 130 kN siano dell'ordine di 0,50 mm.

5.3. DESCRIZIONE PROPRIETÀ DEI MATERIALI

In questo paragrafo si riportano sinteticamente i valori caratteristici dei parametri meccanici utilizzati per il calcolo degli stati tensionali, deformativi e per la valutazione della deflessione massima, delle deformazioni negli strati legati e non e del "danno a fatica".

5.3.1. Conglomerati bituminosi

I conglomerati bituminosi sono confezionati con bitume modificato. Si ammettono i seguenti valori massimi di resistenza a trazione:

- c.b. tappeto S.M.A.: 0,80 MPa
- c.b. di collegamento e di base: 1,00 MPa

Per la verifica a fatica si assume la legge di VERSTRAETEN adattata alla realtà italiana secondo la formulazione della Autostrade S.p.A. che tiene conto dei fenomeni di autoriparazione, dei tempi intercorrenti fra successive applicazioni di carico e della variabilità delle traiettorie:

$$\epsilon_N = 50 \cdot 10^{-4} \cdot N^{-0,234}$$

con ϵ_N deformazione unitaria alla rottura per trazione, per un numero di applicazioni di carico N.

Al fine di avere una soddisfacente resistenza a fatica, le deformazioni unitarie di trazione devono risultare:

$$\epsilon_{rad} < 0,0003 = 300 \mu\epsilon$$

In merito ai moduli, la letteratura scientifica considera per i conglomerati bituminosi modificati valori molto elevati, superiori a 10000 MPa.

In analogia alla linea tramviaria bolognese si assumono in progetto i seguenti moduli:

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| - strato di usura in SMA | $E = 3500 \text{ MPa}$ |
| - strato di collegamento | $E = 6000 \text{ MPa}$ |
| - strato di base | $E = 8000 \text{ MPa}$ |

Per tutti i tre tipi di materiali bituminosi si assume il seguente coefficiente di Poisson:

$$\nu = 0,35$$

5.3.2. Sottofondo per materiali in posto esistenti

Particolare attenzione merita l'assunzione del valore del modulo elastico per il sottofondo stradale esistente.

Dai risultati delle prove deflettometriche è emerso che il valore del modulo elastico dinamico calcolato per il sottofondo delle pavimentazioni sottoposte a prova è compreso tra i 50 ed i 500 MPa, e pertanto all'interno di un ampio spettro di valori.

Al fine di considerare mediamente tutte le situazioni critiche, il dimensionamento della sovrastruttura è stato effettuato considerando i seguenti moduli:

- $E_0 = 60 \text{ MPa}$
- $E_0 = 80 \text{ MPa}$
- $E_0 = 100 \text{ MPa}$
- $E_0 = 130 \text{ MPa}$
- $E_0 = 150 \text{ MPa}$

Per il coefficiente di Poisson da assumersi nei calcoli dei pacchetti si adotta in via cautelativa un valore di ν pari allo 0,45.

Per quanto riguarda la resistenza a fatica del sottofondo, affinché sia evitata la formazione di ormaie in superficie, la massima sollecitazione verticale σ_z sul sottofondo è legata al numero N di ripetizioni di carico ed al modulo E_0 scelto dalla relazione:

$$\sigma_z = \frac{0,006 \cdot E_0}{1 + 0,7 \cdot \log N}$$

Nel caso in cui per il sottofondo si è adottato il modulo elastico più basso, pari a $E_0 = 40 \text{ MPa}$, la tensione verticale σ_z trasmessa deve essere comunque minore di $0,04 \text{ MPa}$.

Infine, si deve anche verificare che per la massima deformazione specifica verticale ε_z sia soddisfatta la seguente limitazione sempre per contenere il fenomeno dell'ormaiamento:

$$\varepsilon_z < 0,0005 = 500 \mu\varepsilon$$

5.3.3. Misto Cementato e Stabilizzato E.B schiumata e cemento

Il misto cementato o lo stabilizzato schiumato e cemento vengono utilizzati per irrigidire la sovrastruttura al fine di aumentare la resistenza a fatica. Per quanto riguarda il modulo, utilizzando il modulo del materiale integro si otterrebbero sollecitazioni di trazione nel materiale superiori alla sua resistenza. Per cui, nella realtà, questi strati si fessurano. Per conoscere quindi lo stato tensionale e di deformazione è opportuno introdurre nel calcolo il modulo del materiale fessurato, cioè di quel materiale elastico ideale che ha la stessa deformabilità dello strato lesionato. Si assume quindi:

$E = 2000 \text{ MPa}$ per il Misto Cementato;

$E = 1500 \text{ MPa}$ per lo Schiumato e Cemento.

Per quanto riguarda il coefficiente di Poisson si assume:

$\nu = 0,25$ per il Misto Cementato;

$\nu = 0,30$ per lo Schiumato e Cemento.

La sollecitazione di trazione per flessione ammissibile è assunta pari all'85% della sollecitazione a rottura. Quindi con $\sigma_r = 0,35 \text{ MPa}$ si ottiene $\sigma_a = 0,2975 \text{ MPa}$.

Per il comportamento a fatica si assume la legge:

$$\sigma_N = \sigma_r (1 - H \cdot \log N)$$

con σ_N la sollecitazione che provoca la rottura dopo N applicazioni di carico, H un coefficiente compreso fra $0,03$ e $0,05$, σ_r la tensione di rottura a trazione $= 0,35 \text{ MPa}$.

La progettazione della miscela deve individuare una percentuale ottimale di cemento al fine di avere una resistenza alla compressione, su provini CBR dopo 7 gg. di stagionatura, compresa tra 2,5 e 5,5 MPa. Infatti la resistenza a compressione non deve essere troppo modesta per evidenti motivi, ma non deve essere nemmeno troppo elevata affinché il materiale non diventi troppo rigido e quindi facilmente fessurabile.

La resistenza a trazione indiretta deve essere superiore a 0,35 MPa.

5.4. VERIFICHE DELLE SOVRASTRUTTURE

5.4.1. Introduzione

Si utilizza il metodo razionale BISAR secondo il programma elaborato dal KONINKLIJKE SHELL LABORATORIUM che consente di determinare lo stato di tensione e di deformazione in ogni punto della sovrastruttura e del sottofondo per qualsiasi condizione di carico.

Nell'ipotesi di omogeneità, isotropia ed elasticità lineare di ogni strato, la pavimentazione è schematizzata come una serie di strati orizzontali sovrapposti, indefiniti in pianta e di spessore costante. Ogni strato è caratterizzato dal modulo di elasticità e dal coefficiente di Poisson.

Gli strati sono appoggiati sul sottofondo schematizzato come un semispazio indefinito, anche esso omogeneo, elastico, isotropo. Si considera che lungo il piano di separazione fra due strati vi sia completa solidarietà per cui non esiste uno scorrimento relativo.

Si assumono per i carichi di traffico agenti sulla pavimentazione solo quelli verticali trasmessi dalle ruote dei veicoli, che si ritengono uniformemente distribuiti su superfici circolari equivalenti, con pressione pari a quella di gonfiaggio dei pneumatici; non si considerano le azioni tangenziali che si esplicano nelle fasi inerziali.

5.4.2. Tipologia A, A1

Per la sovrastruttura A si sono considerati i seguenti moduli di sottofondo:

- $E_0 = 60 \text{ MPa}$;
- $E_0 = 80 \text{ MPa}$.

Per la sovrastruttura A-1, i Moduli del sottofondo considerati per le verifiche sono:

- $E_0 = 100 \text{ MPa}$;
- $E_0 = 130 \text{ MPa}$.

Nella Tabella (26) seguente sono riportati gli stati tensionali significativi per le verifiche a fatica della sovrastruttura.

TIPOLOGIA A

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato	s = 8 cm
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo	s = 15 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 20 cm

TIPOLOGIA A1

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato	s = 8 cm
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo	s = 15 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 10 cm

Sovrastuttura flessibile 4us-8bi-15ba	1-Deflessione Massima < 0.5mm	2-Deformazione conglomerato bituminoso <300µε	3 - Tensione Max (CB) - (Mpa) SUP	4 - Tensione Max (CB) - (Mpa) BASE	5 - Def. Sottofondo (µε) def< 500µε	6 -Verifica a fatica (CB) (µε) / (N) SUP	7-Verifica a fatica (CB) (µε) / (N) BASE	8 -Verifica a fatica (CB) (σMax) / (σN) Sottofondo	9 -Verifica a fatica (CB) (µε) / (N) Sottofondo
A (60 MPa)	0.458	86.9	-0.92	-0.37/1.04	311	Strato compresso	86.9/33.2E+06	0.019/0.044	311/11.22E+06
A (80 MPa)	0.381	83.4	-0.89	-0.35/0.98	278	Strato compresso	83.4/39.5E+06	0.023/0.058	278/17.57E+06
A1(100MPa)	0.354	88.8	-0.9	-0.35/1.06	304	Strato compresso	88.8/30.2E+06	0.032/0.074	304/12.29E+06
A1(130MPa)	0.299	84.5	-0.88	-0.34/100	274	Strato compresso	84.5/37.4E+06	0.037/0.094	274/18.62E+06

Tabella 26: stati tenso-deformativi calcolati in riferimento alla tipologia A e A1.

Tutte le verifiche sono ampiamente soddisfatte.

5.4.3. Tipologia A-Sr, A1-Sr

Sulla base delle verifiche svolte con le sovrastrutture A ed A-1, si è definita l'ipotesi di una riduzione dello spessore dello strato di base di 3cm. Le sovrastrutture così ottenute, definite A-SR ed A1-SR, sono state verificate considerando i seguenti moduli di sottofondo (Tabella 27):

- $E_0 = 60 \text{ MPa}$;
- $E_0 = 80 \text{ MPa}$;
- $E_0=100\text{MPa}$;
- $E_0=130\text{MPa}$;
- $E_0=150\text{MPa}$.

TIPOLOGIA A-Sr

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato	s = 8 cm
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo	s = 12 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 20 cm

TIPOLOGIA A1-Sr

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato	s = 8 cm
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo	s = 12 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 10 cm

Sovrastuttura flessibile 4us-8bi-12ba	1-Deflessione Massima < 0.5mm	2- Deformazione conglomerato bituminoso <300µε	3 - Tensione Max (CB) - (Mpa) SUP	4 - Tensione Max (CB) - (Mpa) BASE	5 - Def. Sottofondo (µε) def< 500µε	6 -Verifica a fatica (CB) (µε) / (N) SUP	7 -Verifica a fatica (CB) (µε) / (N) BASE	8 -Verifica a fatica (CB) (σ _{Max}) / (σN) Sottofondo	9 -Verifica a fatica (CB) (µε) / (N) Sottofondo
A-SR (60 MPa)	0.497	101.3	-1.085	-0.29 / 1.21	369	Strato compresso	101.3 / 17.2E+06	0.023 / 0.046	369 / 5.66E+6
A-SR (80 MPa)	0.414	97.3	-1.052	-0.28/1.15	329	Strato compresso	97.3/20.5E+06	0.027/0.06	329/8.89E+06
A1-SR(100MPa)	0.387	104.6	-1.081	-0.27/1.25	367	Strato compresso	104.6/15.03E+06	0.039/0.077	367/5.78E+06
A1-SR(130MPa)	0.327	99.5	-1.043	-0.26/1.18	329	Strato compresso	99.5/18.01E+06	0.045/0.098	329/8.95E+06
A1-SR(150MPa)	0.302	97.7	-0.95	-0.26/1.15	314	Strato compresso	97.7/20.12E+06	0.049/0.098	314/10.78E+06

Tabella 27: stati tenso-deformativi calcolati in riferimento alla tipologia A-Sr e A1-Sr.

In giallo sono evidenziate le soluzioni che evidenziano una crisi per fatica prima del raggiungimento dei 6.9E+06 passaggi previsti in fase di progetto.

5.4.4. Tipologia A-sc, A1-sc

Le sovrastrutture A-sc presentano uno strato in stabilizzato con schiumato e cemento, riciclato a freddo in impianto, nello strato di fondazione. Tale soluzione è stata esaminata per ottimizzare il rendimento dei conglomerati bituminosi ad alto modulo. I Moduli del sottofondo esaminati per le sovrastrutture in esame sono i seguenti (Tabella 28):

- $E_0 = 60 \text{ MPa}$;
- $E_0 = 80 \text{ MPa}$;

- $E_0=100\text{MPa}$;
- $E_0=130\text{MPa}$;
- $E_0=150\text{MPa}$.

TIPOLOGIA A-Sc

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato	$s = 4 \text{ cm}$
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato	$s = 8 \text{ cm}$
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo	$s = 12 \text{ cm}$
Strato di fondazione in stabilizzato con schiumato e cemento	$s = 20 \text{ cm}$

TIPOLOGIA A1-Sc

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato	$s = 4 \text{ cm}$
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato	$s = 8 \text{ cm}$
Strato di base in conglomerato bituminoso modificato alto modulo	$s = 12 \text{ cm}$
Strato di fondazione in stabilizzato con schiumato e cemento	$s = 10 \text{ cm}$

Sovrastuttura flessibile + sc 4us-8bi-12ba	1-Deflessione Massima < 0.5mm	2- Deformazione conglomerato bituminoso <300 $\mu\epsilon$	3 - Tensione Max (CB) - (Mpa) BAS	4 - Tensione Schiumato ($\sigma_{\text{MAX}}/ (85\% \sigma_r)$)	5 - Def. Sottofondo ($\mu\epsilon$) def< 500 $\mu\epsilon$	6 -Verifica a fatica (CB) ($\mu\epsilon$) / (N) BAS	7 -Verifica a fatica (Schiumato) ($\sigma_{\text{MAX}}/ (\sigma_N)$) Sottofondo	8 -Verifica a fatica ($\sigma_{\text{MAX}}/ (\sigma_N)$) Sottofondo	9 -Verifica a fatica ($\mu\epsilon$) / (N) Sottofondo
A-sc (60 MPa)	0.431	66.4	-0.323/0.73	0.225/0.297	288	66.4/10.4E+07	0.225/0.2659	0.018/0.043	288/15.2E+06
A-sc (80 MPa)	0.359	64.3	-0.309/0.71	0.207/0.297	263	64.3/12.0E+07	0.207/0.273	0.022/0.057	263/21.9E+06
A-sc (100 MPa)	0.354	62.7	-0.299/0.69	0.192/0.297	244	62.7/13.3E+07	0.192/0.271	0.025/0.070	244/29.6E+06
A-sc (130MPa)	0.266	60.8	-0.286/0.66	0.175/0.297	223	60.8/15.2E+07	0.175/0.269	0.029/0.090	223/42.4E+06
A1-sc (130MPa)	0.302	77	-0.273/0.88	0.230/0.297	300	77.0/55.6E+06	0.230/0.275	0.040/0.096	300/13.0E+06
A1-sc (150MPa)	0.302	74.8	-0.267/0.86	0.217/0.297	285	74.8/63.0E+06	0.217/0.274	0.044/0.109	285/15.9E+06

Tabella 28: stati tenso-deformativi calcolati in riferimento alla tipologia A-Sc e A1-Sc.

Tutte le verifiche sono ampiamente sofferdisfatte.

5.4.5. Tipologia B-s, B1-s

Le sovrastrutture B-s e B1-s presentano uno strato di fondazione in misto granulare stabilizzato. Su quest'ultimo poggia uno strato di 20 cm di Misto Cementato. Lo strato di binder confezionato con bitume fluidificato ad alto modulo è dello spessore di 10 cm. I risultati delle verifiche in funzione dei diversi moduli del sottofondo sono i seguenti (Tabella 28):

TIPOLOGIA B-s

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato	s = 10 cm
Strato di base in Misto Cementato	s = 20 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 20 cm

TIPOLOGIA B1-s

Strato di usura di tipo SMA in conglomerato bituminoso modificato	s = 4 cm
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso modificato	s = 10 cm
Strato di base in Misto Cementato	s = 20 cm
Strato di fondazione in misto granulare stabilizzato	s = 10 cm

Sovrastuttura Semirigida 4us-10bi-20mc	1- Deflessione Massima < 0.5mm	2- Deformazione conglomerato bituminoso <300µε	3 - Tensione Max (CB) - (Mpa) BAS	4 - Tensione Misto Cem. (σ _{Max})/(85%σ _r)	5 - Def. Sottofondo (µε) def< 500µε	6 -Verifica a fatica (CB) (µε) / (N) BAS	7 -Verifica a fatica (Misto Cem.) (σ _{Max}) / (σ _N)	8 -Verifica a fatica (σ _{Max}) / (σ _N) Sottofondo	9 -Verifica a fatica (µε) / (N) Sottofondo
B-S(60 MPa)	0.461	60.7	-1.04/0.325	0.271/0.297	322	60.7/15.3E+07	0.271/0.276	0.019/0.045	322/9.76E+06
B-S (80 MPa)	0.39	60.6	-1.01/0.326	0.257/0.297	288	60.6/15.5E+07	0.257/0.274	0.022/0.058	288/15.25E+06
B-S (100 MPa)	0.342	60.5	-0.99/0.327	0.246/0.297	263	60.5/15.5E+07	0.246/0.272	0.025/0.071	263/21.9E+06
B-S (130MPa)	0.295	60.7	-0.96/0.328	0.233/0.297	234	60.7/15.3E+07	0.233/0.270	0.027/0.091	234/35.0E+06
B1-S (130MPa)	0.316	62.5	-1.00/0.349	0.275/0.297	305	62.5/13.5E+07	0.275/0.276	0.038/0.096	305/12.2E+06
B1-S (150MPa)	0.291	62.5	-0.98/0.35	0.264/0.297	286	62.5/13.5E+08	0.264/0.274	0.041/0.11	286/15.7E+06

Tabella 29: stati tenso-deformativi calcolati in riferimento alla tipologia B-S e B1-S.

Tutte le verifiche risultano soddisfatte (Tabella 29).

5.5. ANALISI RISULTATI BACKCALCULATION FWD

Complessivamente sono state eseguite 75 battute con FWD e 31 carotaggi per i soli strati in conglomerato bituminoso del pacchetto stradale. I carotaggi hanno permesso di determinare gli spessori dei conglomerati, dato di input necessario nella procedura di back-calculation.

In alcune sezioni di misura nei tratti di via Città di Nimes, compreso tra piazza Renato Simoni e via Berni e via degli Alpini, le pavimentazioni sono di tipo a pavé. In tali tratti stradali non è stato possibile effettuare efficacemente l'indagine con FWD, sia per l'irregolarità del piano viabile, che non garantisce il

corretto contatto dei geofoni inficiando l'opportuna acquisizione dei dati, sia per la natura del materiale stesso, macroscopicamente disomogeneo. I fattori sopra citati rendono non completamente attendibile un calcolo puntuale delle proprietà meccaniche dei materiali in termini di modulo elastico equivalente; per tale caso è tuttavia stato possibile stabilire qualitativamente la risposta meccanica del pacchetto stradale e la tipologia di sottofondo.

5.5.1. Scelta delle sezioni tipo per il calcolo

Nella procedura di elaborazione, il limitato numero di strati (2) non si è rivelato sufficiente a fornire risultati soddisfacenti e si è reso necessario l'inserimento di ulteriori strati fittizi per permettere una corretta convergenza dei bacini misurati con quelli calcolati. Gli strati aggiunti devono essere interpretati come presenza di elementi di disomogeneità e disturbo del sottofondo illimitato, e non necessariamente come stratificazioni reali di materiali diversi. Una schematica rappresentazione della sezione di calcolo è riportata in Figura 9.

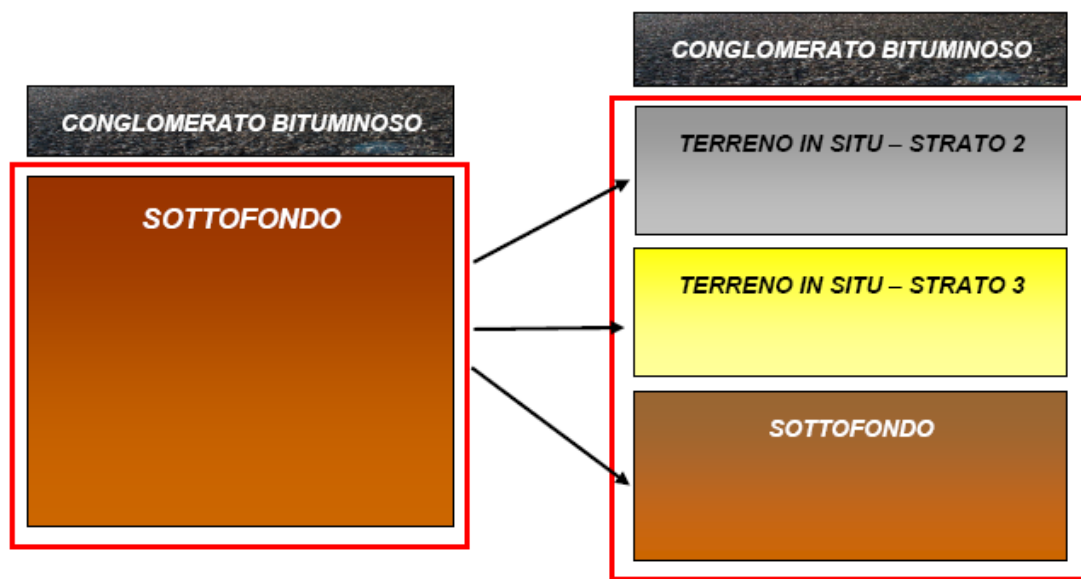


Figura 9: schematizzazione del pacchetto per la stima dei moduli in backcalculation.

La combinazione di spessori e moduli per gli strati fittizi è stata ottenuta iterativamente con il criterio del minimo errore percentuale ed è stata validata attraverso una post elaborazione con il software di calcolo BISAR.

5.5.2. Analisi dei risultati: moduli elastici e spessori

INDAGINE CON FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER DEL 07/11/2010									
RISULTATI BACK-CALCULATION									
Sezione	Posizione di battuta	ID Carota	Strati in conglomerato bituminoso		Terreno in situ - Strato 2		Terreno in situ - strato 3		Sottofondo
			Modulo a 20°C [MPa]	Spessore [cm]	Modulo [MPa]	Spessore [cm]	Modulo [MPa]	Spessore [cm]	Modulo [MPa]
2	Via Palladio	2	3252	10	-	-	-	-	170
3	Via Palladio		2602	10	-	-	-	-	150
4	Via Palladio		5204	10	-	-	-	-	190
7	Via Girolamo	3	5204	6	-	-	-	-	270
8	piazza 25 aprile		9106	6	-	-	-	-	300
9	piazza 25 aprile	4	7805	14.5	-	-	-	-	250
10	Via città di Nimes	5	11708	5	-	-	-	-	350
11	Via città di Nimes		3903	5	500	20	50	30	200
12	via Giberti		6505	5	400	20	50	30	200
13	via Giberti	6	13009	6	150	15			300
16	via degli Alpini		Pavè - probabile strato in misto granulare/ lastra in CLS in profondità						
17	via degli Alpini		Pavè - probabile strato in misto granulare/ lastra in CLS in profondità						
18	via degli Alpini		6505	6	1700	20	20	30	200
19	Stradone Scipione Maffei	7	7805	11	3300	10	65	30	250
20	Stradone San Fermo		5204	11	-	-	-	-	250
21	via San Paolo		3903	11	600	5	250	20	150
22	via 20 settembre	8	5204	10	2500	10	70	40	200
23	via 20 settembre		3903	10	600	20	50	50	250
24	via 20 settembre	9	5204	7	150	10	-	-	300
25	via Badile		4553	7	40	15	70	30	350
26	viale Spolverini	10	4553	7	1500	15	50	40	280
27B	via Pisano		4553	7	1500	17	50	30	450
26B	via Pisano		4683	7	1400	17	50	30	370
25B	via Pisano		4553	7	1500	14	60	35	350
28	via Zeviani		4553	7	2000	17	50	30	420
29	via Corsini		4943	7	2000	20	50	30	200
30	via Corsini	11	6505	14	2700	15	50	50	400
31	via Corsini		3512	14	1500	10	50	50	400
32	via Cernisone		1951	14	150	20	50	15	400
33	via Fedeli		3252	14	900	20	50	35	300
34	via Fedeli	12	3512	6	1650	20	50	35	300
35	via Marmolada		5854	6	200	10	-	-	300
36	via Marmolada	13	5854	8	250	30	70	50	200
38	via Dolomiti	14	6505	8	150	30	120	30	250
37	via Dolomiti		6505	8	2100	10	70	40	250
39	via del Capitel		6765	8	2000	10	70	35	400
40	via Dalla Corte	15	6765	6.5	4100	10	70	30	400
41	via Dalla Corte		3512	6.5	870	10	50	40	220
42	via D'Arezzo	16	3643	13	1000	10	50	40	250
43	via D'Arezzo		4163	13	800	10	70	35	270
44	via Della casa		4553	13	600	10	70	40	300
45	via Carmelitani Scalzi		4683	13	700	10	60	35	250
46	Stradone Porta Palio	17	5204	13	2000	5	70	30	200
47	corso Cavour		2992	13	650	20	900	30	400
48	corso Cavour		2732	13	700	20	1000	30	400
49	via Diaz		3382	13	1000	15	80	30	200
50	via 4 Novembre		3903	13	1600	10	60	30	160
51	via 4 Novembre	18	3903	7.5	1700	10	65	30	170
52	via 4 Novembre		4033	7.5	1400	10	60	30	170
53	via 24 Maggio		4553	7.5	1100	10	50	30	150
54	Piazzale Stefani	19	5204	6.5	1300	10	50	40	170
55b	via Mameli		4033	6.5	850	10	70	30	260
56	via Mameli	20	4033	10	900	10	70	40	230
57	via Mameli		3773	10	900	10	70	30	300
58	via Ca' di Cozzi		4683	10	700	10	70	40	300
59	via Ca' di Cozzi		4553	10	2800	15	140	20	420
60	viale del Pave	21	4813	11	3000	10	130	20	430
62	viale della Fiera	22	2602	10.5	800	10	70	40	270
63	via Scopoli		2992	10.5	750	10	70	40	250
64	viale dell'Agricoltura	23	3903	9	810	10	70	40	230
65	via Scuderlando	24	5074	12	1300	15	500	40	620
66	via Scuderlando		4943	12	1200	18	450	40	600
67	via Fiume	25	3512	4	1300	14	80	40	420
68	via San Giacomo	26	6505	10	1000	20	200	30	530
72	via Tunisi	27	1041	7.5	500	10	100	40	350
71	via Tunisi		1301	7.5	400	10	100	40	320
70	via Comacchio		6114	7.5	900	15	100	40	430
69	via Comacchio	28	6505	9.5	1000	12	100	40	450
73	viale del Lavoro		6374	9.5	1100	10	100	40	420
74	viale del Lavoro	29	3512	14.5	600	10	70	45	380
75	viale del Lavoro		3252	14.5	500	12	70	45	380
76	viale del Lavoro	30	3512	12	400	10	70	45	380
77	viale delle Nazioni		3903	12	2000	18	70	45	380
78	viale delle Nazioni	31	4163	6	2400	20	70	45	380
80	strada della genovese	32	2342	6	680	20	80	30	420

Tabella 30: moduli e rispettivi spessori degli strati individuati con backcalculation.

Analizzando complessivamente i risultati ottenuti dalla backcalculation (Tabella 30) per il sottofondo sono stati individuati Moduli di elasticità soddisfacenti che sottolineano una buona portanza del terreno di posa. Nei punti di rilievo 2, 3, 4, 7 le verifiche dei bacini di deflessione sono risultate soddisfatte senza l'utilizzo di strati intermedi. In questi quindi i Moduli del sottofondo possono essere considerati maggiormente attendibili.

Negli altri punti di rilievo l'inserimento di strati fittizi potrebbe aver condizionato la backcalculation del bacino di deflessione della prova stessa. Deve essere sottolineata la possibile influenza dei sottoservizi che potrebbero aver condizionato la stima dei Moduli.

In sintesi per la natura del rilievo effettuato in ambito urbano e non avendo a disposizione alcun rilievo di tipo stratigrafico del terreno in sito non è possibile considerare i valori di moduli di elasticità del sottofondo in senso assoluto se non per le sezioni 2, 3, 4 e 7 dove si registra un valore medio del modulo di sottofondo di 170-200 MPa.