

Alma Mater Studiorum - Università degli Studi di Bologna

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

Corso di laurea V.O. in Ingegneria Civile - Indirizzo Trasporti

*INSEGNAMENTO: TECNICA DEI LAVORI STRADALI, FERROVIARI,
AEROPORTUALI*

IL RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

Tesi di Laurea di:

LUCIA ROSA

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. ANDREA SIMONE

Sessione III

Anno Accademico 2009 - 2010

PAROLE CHIAVE:

Riciclaggio

Pavimentazioni stradali

Stabilizzazione

Manutenzione prestazionale

Materiali a basso impatto ambientale

IL RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

INDICE

Capitolo 1 - Le pavimentazioni stradali ed il loro degrado

1.1. La pavimentazione: funzionalità e composizione.....	1
1.2. Il degrado della pavimentazione.....	4
1.3. Manutenzione stradale.....	5

Capitolo 2 - Considerazioni generali sul riciclaggio

2.1. Introduzione al riciclaggio.....	7
2.2. Breve storia del riciclaggio in Italia: dalla fresatura a caldo degli anni '70 al primo intervento di riciclaggio, totalmente a freddo, in situ.....	8
2.3. Tecniche di riciclaggio.....	11

Capitolo 3 - Riciclaggio a caldo, in impianto

3.1. Considerazioni generali.....	13
3.2. Gli impianti.....	13
3.3. Impianto discontinuo.....	14
3.4. Modifica per il riciclaggio.....	15
3.5. Impianto continuo, tipo Drum Mixer.....	18
3.6. Modifica per il riciclaggio.....	20

Capitolo 4 - Riciclaggio a freddo, in impianto

4.1. Considerazioni generali, descrizione di un impianto di riciclaggio e del processo produttivo.....	23
4.2. Le emulsione bituminose.....	26
4.3. Il bitume schiumato.....	28

Capitolo 5 - Riciclaggio a caldo, in situ

5.1. Considerazioni generali, vantaggi e svantaggi della tecnica.....	31
5.2. I treni di riciclaggio.....	33
5.3. Riciclaggio in situ a caldo: primi risultati.....	33
5.3.1. Tecnologia Marini.....	34
5.3.2. Tecnologia Martec.....	35
5.3.3. Uso combinato delle due tecnologie.....	37
5.3.4. Conclusioni.....	40
5.4. Tecnologia Hit.....	40
5.4.1. Cenno alla pavimentazione drenante in Italia.....	40
5.4.2. Progettazione e produzione delle pavimentazioni stradali porose.....	42
5.4.3. Descrizione della tecnologia Hit.....	43

Capitolo 6 - Riciclaggio a freddo, in situ

6.1. Vantaggi e svantaggi della tecnica.....	49
6.2. Categorie del riciclaggio a freddo.....	51
6.3. Treno di riciclaggio: composizione e modalità esecutive.....	53

Capitolo 7 - Tecnologie innovative a tiepido

7.1. Salvaguardia ambientale: dal protocollo di Kyoto alle innovative tecniche WMA.....	57
7.2. Descrizione delle tecniche WMA.....	59
7.3. Additivazione con fluidificanti del bitume.....	64
7.3.1. Additivi organici.....	64
7.3.1.1. Le paraffine F-T (Sasobit-Sasol Wax GmbH, Germany).....	65
7.3.1.1.1. Breve storia delle paraffine F-T.....	65
7.3.1.1.2. Descrizione.....	66
7.3.1.2. Tecnologia 3E (Colas, France).....	68
7.3.1.3. Ecoflex (Screg, France).....	69
7.3.1.4. La cera Montan (Asphaltan B-Romonta GmbH, Germany).....	69
7.3.1.5. Amidi di acidi grassi (Licomont BS 100-Clariant, Switzerland).....	70

7.3.2. Gli additivi chimici.....	71
7.3.2.1. L'Interlow-T (Interchimica Srl, Italy).....	71
7.3.2.2. Rediset (Akzo Nobel, Netherland).....	73
7.3.2.3. Revix (Mathy construction-Ergon, US).....	74
7.3.2.4. Cecabase Rt (CECA Archema Group, France).....	75
7.3.2.5. Evotherm (Mead-Westvaco, US).....	76
7.4. Trasformazione del bitume in schiuma.....	78
7.4.1. Zeoliti sintetiche (AsphaMin-Eurovia Services GmbH, Germany).....	79
7.4.2. Advera WMA (PQ Corporation, US).....	80
7.4.3. Il metodo Wam-Foam (Shell, UK-Kolo Veidekke, Norway).....	82
7.4.4. Conglomerati bituminosi a bassa energia LEA (Lea-Co, France).....	83
7.4.5. LEAB (Bam, Netherland).....	86
7.4.6. LT Asphalt (Nynas, Netherland).....	87
7.4.7. Double Barrel Green (Astec, US).....	88
7.4.8. AQUABlack WMA (Maxam Equipment, US).....	90
7.4.9. Terex foamed warm mix asphalt system (Terex Roadbuilding, US).....	92
7.4.10. Ultrafoam GX (Gencor, US).....	92
7.5. Tecniche a base di emulsione bituminosa.....	93
7.5.1. Ecomac (Screg, France).....	94

Capitolo 8 - Materie prime secondarie per utilizzo stradale

8.1. Introduzione alle materie prime secondarie.....	95
8.2. Materiale proveniente da C&D.....	95
8.2.1. I rifiuti da C&D: quadro d'insieme.....	95
8.2.2. Impianti per il riciclaggio dei rifiuti derivanti da C&D.....	98
8.2.3. Qualità delle materie prime secondarie.....	101
8.2.4. Riutilizzo delle materie prime secondarie.....	102
8.3. Materiale proveniente da terre e rocce da scavo.....	104
8.3.1. Generalità.....	104
8.3.2. Un esempio di recupero di terre e rocce da scavo: lo smarino delle gallerie.....	105
8.3.3. Normativa relativa alle terre e rocce da scavo.....	108

8.4. Materiale recuperato in sito.....	111
8.4.1. Il materiale fresato.....	111
8.4.2. Stabilizzazione in sito.....	114
8.5. Individuazione delle tipologie di rifiuto nella normativa attuale: Codici CER.....	122

Capitolo 9 - Breve storia del quadro normativo Italiano in tema di rifiuti e marcatura CE

9.1. Dal Decreto Ronchi al D.Lgs 152/2006.....	125
9.2. Marcatura CE: quadro d'insieme.....	127
9.3. Dalla direttiva 89/106/CE alla marcatura CE degli aggregati riciclati.....	128
9.4. Sostituzione della UNI EN 10006:2002.....	131
9.5. UNI EN 13108: la marcatura CE dei conglomerati bituminosi.....	132
9.6. Rifiuti inerti e nuove prospettive per il riciclaggio: dalla legge n. 448/2001 e dal DM n.203/2003, alla circolare 5205 del 15 Luglio 2005.....	134

Capitolo 10 - Dall'approccio empirico a quello fondamentale

10.1. Capitolati speciali d'appalto prestazionali.....	140
10.2. Progettazione delle miscele: un nuovo approccio.....	142
10.3. L'evoluzione delle presse.....	143
10.4. La pressa a fatica da cantiere.....	145
10.5. L'evoluzione dei controlli ad alto rendimento.....	147
10.6. L'evoluzione dei criteri progettuali.....	149
10.7. Studio a carattere prenormativo delle Norme Tecniche di tipo prestazionale per Capitolati speciali d'appalto.....	150
10.8. Linee guida di progetto e Norme Tecniche prestazionali ANAS 2008.....	151
10.8.1. Parte prima: descrizione delle Linee Guida per il progetto.....	153
10.8.2. Parte seconda: Norme tecniche sui materiali.....	158
10.8.3. Parte terza: controlli prestazionali ad Alto Rendimento.....	161
10.8.3.1. Il controllo della portanza: FWD, TSD, LFWD.....	161
10.8.3.2. Controllo di aderenza e tessitura.....	168
10.8.3.3. Controllo di regolarità.....	172
10.8.3.4. Controllo degli spessori degli strati legati.....	173

10.8.4. Conclusioni.....	174
10.9. Il Test ITSM per la determinazione del modulo di rigidezza.....	175
10.10. Il Test ITFT per la determinazione della resistenza a fatica.....	177

Capitolo 11 - Risanamento profondo della ex ss. 343 “Asolana”

11.1. Progetto della pavimentazione.....	180
11.1.1. Generalità.....	180
11.1.2. Relazione descrittiva dell’intervento.....	181
11.1.3. Aspetti progettuali: gli obiettivi dell’intervento.....	182
11.1.4. Le indagini sui materiali esistenti: risultati delle prove di laboratorio (condotte nel 2008).....	183
11.1.5. La soluzione progettuale proposta.....	186
11.1.6. Generalità sul programma Bisar e definizione dei moduli elastici e di Poisson da utilizzare.....	187
11.1.7. Analisi del traffico per la valutazione del carico.....	189
11.1.8. Verifiche.....	190
11.2. Progetto delle miscele elaborate per l’intervento di Colorno.....	190
11.2.1. Studio di formulazione: fondazione con terreno stabilizzato con leganti idraulici.....	191
11.2.1.1. Generalità sulla stabilizzazione dei terreni.....	191
11.2.1.2. La stabilizzazione a cemento.....	192
11.2.1.3. La stabilizzazione a calce.....	193
11.2.1.3.1. Comportamento a breve termine.....	194
11.2.1.3.2. Comportamento a lungo termine.....	194
11.2.1.4. Operazioni di cantiere per una stabilizzazione a calce e/o cemento. ...	195
11.2.1.5. Le indagini condotte sul terreno di fondazione.....	196
11.2.1.6. Il mix design del terreno di sottofondo e la scelta del legante idraulico di stabilizzazione.....	197
11.3. Studio di formulazione: conglomerato bituminoso riciclato a freddo in impianto con emulsione bituminosa modificata.....	203
11.3.1. Generalità.....	203
11.3.2. I Materiali costituenti e loro qualificazione.....	204
11.3.3. Studio della miscela di progetto: il Mix Design.....	206

11.4. Lo strato di usura finale.....	211
11.5. Programma Bisar ed esempio di calcolo.....	216
11.5.1. Generalità.....	216
11.5.2. Fase di inserimento dati nel programma e “Block Report” finale.....	218
11.5.3. Verifiche strutturali e funzionali.....	224
11.5.3.1. Descrizione.....	224
11.5.3.2. Risultati delle verifiche strutturali e funzionali.....	225
11.5.3.3. Conclusioni.....	225
11.5.4. Verifiche a fatica.....	227
11.5.4.1. Descrizione.....	227
11.5.4.2. Risultati delle verifiche a fatica.....	227
11.5.4.3. Conclusioni.....	227
Bibliografia.....	230
Ringraziamenti.....	235

CAPITOLO 1 - LE PAVIMENTAZIONI STRADALI ED IL LORO DEGRADO

1.1 La pavimentazione: funzionalità e composizione

Prima di parlare di riciclaggio vero e proprio, è opportuno fornire indicazioni, sul significato della *pavimentazione stradale*.

Essa è per definizione quella struttura sovrastante un rilevato o il terreno in sito nelle trincee, atta a garantire la transitabilità del traffico veicolare, con lo scopo di assolvere a diverse funzioni:

- conferire caratteristiche superficiali di *planarità* ed *aderenza*, assicurando una circolazione confortevole e sicura;
- dissipare in profondità gli sforzi e le pressioni trasmesse dalle ruote veicolari (in relazione alla pressione di gonfiaggio dei pneumatici), affinché l'intero pacchetto stradale possa resistere ad un elevato numero di passaggi, il più a lungo possibile;
- proteggere la pavimentazione stessa ed il terreno sottostante da agenti atmosferici pericolosi per la stabilità del piano viabile (dal gelo in particolare) [27].

La pavimentazione stradale è costituita da vari strati, ciascuno con caratteristiche proprie, composizionali e funzionali, che spesso possono raggiungere anche la profondità di un metro; i tre elementi principali che la compongono sono: il *manto*, la *struttura* ed il *sottofondo*.

Il *manto* è la parte più superficiale della pavimentazione, e in quanto tale rappresenta il primo contatto con il carico; deve perciò essere dotato di resistenza notevole e caratteristiche geometriche perfette: i materiali utilizzati dovranno pertanto avere delle formulazioni compositive specifiche, che non solo assolvano alle funzioni richieste, ma le mantengano elevate nel tempo, affinché la vita utile della pavimentazione stessa sia la più lunga possibile.

Il manto effettuerà una protezione di tutta la struttura della pavimentazione, in particolare nei confronti di due elementi: l'elemento traffico e l'elemento ambiente.

La protezione dal traffico è relativa sia ai carichi trasmessi dalle ruote, come abbiamo già avuto modo di accennare, ma anche all'azione di sfregamento esercitata dai pneumatici stessi, con conseguente abrasione della superficie, perdita di attrito (resistenza allo slittamento) e inevitabile aumento della pericolosità [27].

La protezione dall'ambiente invece, deriva da due principali forme di attacco: gli effetti termici, che conferiscono alla pavimentazione continue contrazioni e dilatazioni, ed il deterioramento provocato dal sole, da cui assorbono quotidianamente raggi ultravioletti,

che ne accelerano l'invecchiamento; per ovviare a questi tipi di attacco, il manto risultante, dovrà pertanto essere elastico e durevole.

Il bitume è certamente uno dei leganti più utilizzati per questo tipo di strato, con uno spettro di utilizzo che va da strade a traffico intenso, a strade a traffico ridotto.

La *struttura* permette il trasferimento del carico dal manto al sottofondo. Anch'essa è composta da vari strati, che analizzeremo nel dettaglio fra poco, con materiali e caratteristiche di resistenza differenti. Ogni strato riceve un carico dallo strato sovrastante, e lo diffonde su un'area più ampia della parte sottostante; chiaramente le sollecitazioni maggiori saranno nella parte superiore della pavimentazione, e pertanto ad essa verranno richieste caratteristiche di resistenza più elevate [27].

Inoltre queste stesse caratteristiche saranno rapportate alla tipologia di carico, ossia al livello di traffico presente, legato alla sua ritmicità, ma anche alla classificazione dei veicoli che percorrono la strada stessa, che potranno essere di tipo pesante, leggero o a due ruote.

La struttura è composta a sua volta da materiali granulari e da materiali legati: i primi, comprendenti pietrisco e ghiaia, trasferiscono i carichi applicati attraverso i singoli granuli; tuttavia a seguito dei carichi ripetuti e all'avvicinarsi dei granuli stessi gli uni agli altri, si potrebbe verificare un graduale "addensamento" in qualsiasi strato della struttura, e che avrebbe come diretta conseguenza una deformazione superficiale, con un andamento tipico di solchi in corrispondenza dell'area di passaggio (impronta) delle ruote; i materiali legati invece, che includono i materiali stabilizzati e l'asfalto, hanno il compito di ricevere i carichi verticali, che generano sollecitazioni di flessione, ossia trazione nella metà inferiore e compressione nella metà superiore, a causa del continuo passaggio di veicoli, con conseguente rottura a fatica: si creano infatti delle fessure nella parte inferiore dello strato, che si propagano verticalmente e che risalgono lungo la struttura, man mano che le ripetizioni di carico proseguono [27].

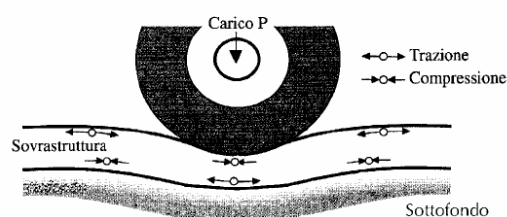


Fig. 1.1: Sollecitazioni flessionali di una struttura stradale

Il *sottofondo* è costituito da terreno naturale, alla base del corpo stradale; le caratteristiche intrinseche dei materiali utilizzati, determinano una maggiore o minore resistenza del sottofondo stesso, influenzando la scelta del tipo di struttura sovrastante da adottare, che dovrà garantire una distribuzione del carico tale da non causare deformazioni permanenti.

Analizzando più in dettaglio gli strati che costituiscono una pavimentazione, possiamo distinguere, partendo dall'alto:

- uno strato di usura, in conglomerato bituminoso;
- uno strato di collegamento, in conglomerato bituminoso, denominato “binder”;
- uno strato di base, sempre in conglomerato bituminoso;
- uno strato di sottobase in misto cementato, utilizzato solamente per strade e autostrade con un volume notevole di traffico pesante;
- uno strato di fondazione, in misto granulare, stabilizzato meccanicamente (per mezzo di rulli compattatori particolari);
- uno strato di sottofondazione, utilizzato per strade a ridotto o nullo volume di traffico pesante, in sostituzione della fondazione, o nei casi in cui il terreno sia di tipo limoso o argilloso.

Anche gli spessori dei vari strati possono cambiare, in funzione della tipologia di pavimentazione, che potrà essere flessibile, semi-rigida o rigida: in quest'ultimo caso lo strato superficiale è però costituito da conglomerato cementizio e non bituminoso; questo tipo di pavimentazione è per lo più utilizzato per piazzali di sosta aeroportuali, e non verranno trattati in questa sede [27].

Si osservi come variano gli spessori nella seguente figura, in rapporto alla tipologia di pavimentazione:

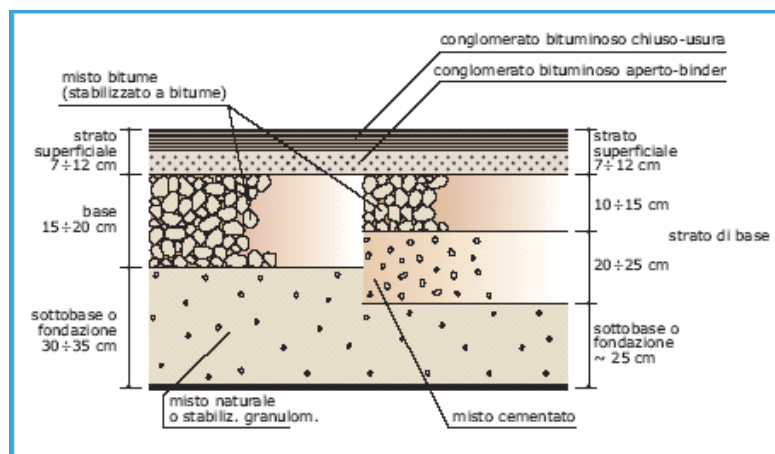


Fig. 1.2: Sovrastruttura stradale flessibile e semirigida

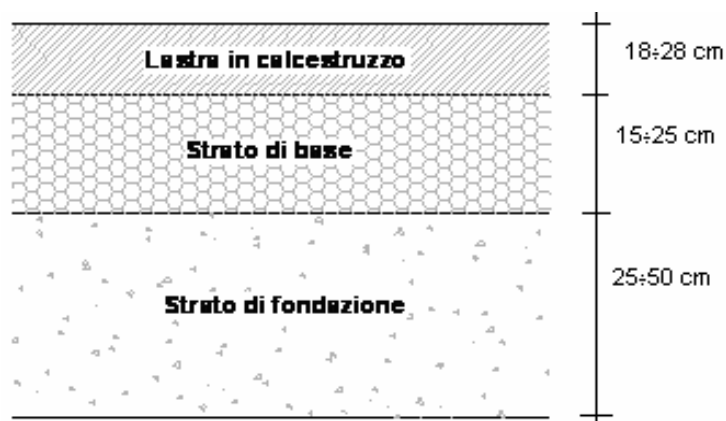


Fig. 1.3: Sovrastruttura stradale rigida

1.2 Il degrado della pavimentazione

Come abbiamo precedentemente accennato, tra le cause di degrado della pavimentazione stradale, vanno certamente menzionati i fattori ambientali ed il carico veicolare.

I fattori ambientali interessano in prima istanza gli strati più superficiali della pavimentazione: basti pensare a come i raggi ultravioletti favoriscano l'indurimento e l'invecchiamento precoce del bitume, riducendo la propria elasticità; a causa di questo irrigidimento, gli sforzi di compressione e trazione a cui il manto è sottoposto, ne favoriscono la fessurazione, accentuata anche dalle continue contrazioni-dilatazioni termiche [18].

Tuttavia non appena questo strato superficiale perde la propria capacità strutturale, gli strati inferiori sono sottoposti a maggiori aggressioni, soprattutto da parte dell'acqua che penetra dalle fessure, con un conseguente deterioramento, di tipo esponenziale.

Il carico veicolare incide altrettanto significativamente in questo processo di degrado; ad ogni transito infatti, si genera una deformazione indotta, di tipo temporaneo, sulla pavimentazione, che nel caso di veicolo leggero è del tutto irrilevante, ma che nel caso di veicolo pesante assume un'entità non trascurabile, provocando deformazioni a fatica e fessurazioni; se teniamo conto anche del fatto che i ripetuti passaggi di automezzi, hanno un effetto cumulativo, e che gli assali sono spesso sovraccarichi, il deterioramento che ne consegue, è sempre più accelerato nel tempo [18].

Anche l'effetto di ammorbidimento dell'acqua che si è insinuata, provoca una riduzione della resistenza della stessa sovrastruttura; la stretta correlazione nonché consequenzialità tra tutti questi fattori, rende chiaro come sia necessaria un'opera di

manutenzione “preventiva”, che tenda ad intervenire sulla pavimentazione prima che i danni causati, compromettano tutto il pacchetto stradale [18].

Tuttavia anche la mancanza di circolazione veicolare può provocare fessurazione superficiale: il traffico stesso ha difatti un’azione impastante che mantiene vivo il bitume; il passaggio dei veicoli tende a chiudere le fessurazioni, causate dall’ossidazione e dal conseguente indurimento del legante, non appena esse si formano, impedendone così una maggior propagazione.

Il livello di degrado di una pavimentazione, da cui indirettamente deriva il suo livello prestazionale, è stimabile per mezzo di parametri rappresentativi, che si valutano con mezzi ad alto rendimento (Aran, FWD,...); le misurazioni vengono effettuate periodicamente, ed arricchiscono una banca dati che viene continuamente monitorata.

1.3 Manutenzione stradale

La manutenzione stradale, alla luce di quanto esposto precedentemente, si pone l’obiettivo di mantenere l’infrastruttura in buone condizioni di esercizio, grazie ad una normativa adeguata, leggi, e criteri di gestione economica.

La Manutenzione Programmata è un ottimo strumento di supporto decisionale, che permette non solo di organizzare al meglio gli interventi da effettuare sulla pavimentazione stradale, ma anche di collocarli in un punto ben preciso della propria vita utile, al fine di ottimizzare le risorse possedute, sia quelle intrinseche della pavimentazione stessa, che economiche: spesso infatti, anche per carenza di fondi disponibili, l’ente gestore ricorre a tecnologie manutentorie a basso costo, o addirittura le posticipa nel tempo.

La tempistica di intervento è tuttavia fondamentale per un reale, e non apparente, risparmio economico: osservando la curva di decadimento qualitativa di una pavimentazione flessibile standard (media), si nota come il degrado del primo 40% della sovrastruttura, avvenga durante un periodo corrispondente al 75% della sua vita utile, mentre il secondo 40% durante il solo 12%: i costi di investimento in manutenzione, effettuati nel secondo 40%, possono addirittura essere maggiori di quattro o cinque volte, rispetto ad un intervento più tempestivo [8].

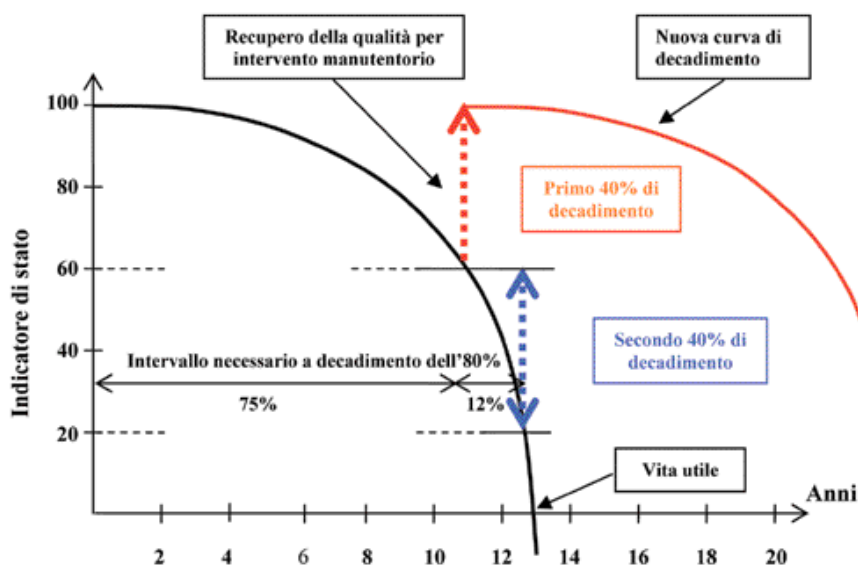


Fig. 1.4: Curva di decadimento di una pavimentazione stradale

Un continuo monitoraggio della pavimentazione, permette quindi di identificare il momento più opportuno per l'intervento, che sia esso un trattamento superficiale, un rinforzo, una ricostruzione parziale o totale, e di stimarne la vita utile residua; a sua volta il gestore potrà scegliere la tecnologia di intervento più efficiente ed efficace nel suo caso, in un ventaglio di opportunità che si arricchisce man mano che la ricerca e lo sviluppo dei lavori autostradali, compiono passi avanti [28].

CAPITOLO 2 - CONSIDERAZIONI GENERALI SUL RICICLAGGIO

2.1 Introduzione al riciclaggio

Nel corso degli ultimi decenni le infrastrutture hanno avuto uno sviluppo notevole: il trasporto su strada è aumentato, in particolar modo il volume relativo ai veicoli pesanti, che movimentano le merci con maggior rapidità e flessibilità rispetto ad un trasporto su rotaia; la tipologia stessa dei veicoli è cambiata, ed il carico per asse di un mezzo pesante, è di gran lunga maggiore rispetto al passato; il deterioramento già presente sulle nostre strade, viene così ad accentuarsi, rendendo inevitabili gli interventi di manutenzione. Queste considerazioni valgono non solo per l'Italia, ma anche per la maggior parte dei paesi Europei, che dovranno dedicare in futuro un budget sempre più elevato alla manutenzione stradale: nel caso in cui, per mancanza di fondi, non si sia intervenuto prima sulla pavimentazione, con conseguente ed irreversibile deperimento della rete stradale, potrebbe essere necessario il rifacimento totale delle stesse strade, con costi notevolmente maggiori.

Tuttavia con la crisi economica che in questo periodo si sta affrontando, si rende necessario aumentare la redditività dei ridotti budget disponibili da parte dei singoli paesi; se consideriamo anche il fatto che questa tipologia di interventi comporta notevoli consumi di risorse pregiate e non rinnovabili, quali aggregati lapidei e bitume, e che vengono contestualmente prodotti ingenti quantità di materiali di risulta, con costi sia economici di dismissione, che ambientali di inquinamento, si rende ancora più necessaria la ricerca di una soluzione alternativa al problema [34].

Questa soluzione arriva infatti con il *riciclaggio*; nel settore delle pavimentazioni stradali col termine “riciclare”, si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale fresato, per la produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. Le motivazioni che spingono verso questa direzione, sono molteplici:

- riduzione dell'impiego di materie prime vergini;
- riduzione dei territori da destinare a discarica;
- limitazione dell'inquinamento del suolo e dell'atmosfera, derivante dal trasporto e dall'incenerimento dei rifiuti;
- conservazione dell'energia;
- vantaggi economici;
- vantaggi tecnici.

Tuttavia In Italia, al contrario di come avviene in molti altri paesi industrializzati, la

tecnica del reimpiego del fresato non ha avuto ancora un largo utilizzo. Da una stima approssimata sulla quantità di materiale di recupero proveniente dalla demolizione delle pavimentazioni stradali degradate, risulta che la quantità di conglomerato bituminoso fresato è pari a circa 12 milioni di tonnellate, su un totale di quasi 40 milioni di tonnellate di conglomerato bituminoso prodotto annualmente, con una percentuale di reimpiego stimata intorno al 15% (circa 1.8 milioni di tonnellate). Tale dato risulta molto inferiore rispetto a quello dei maggiori paesi sviluppati, dove si recupera oltre l'80% dello stesso materiale fresato.

Paese	Produzione annuale di conglomerati t·10 ⁶	Produzione annuale di fresato t·10 ⁶	Percentuale di impiego del fresato %
Francia	38,0	7,0	25
Germania	63,5	16,0	80
Svizzera	4,7	1,8	30
Paesi Bassi	7,5	3,0	100
Regno Unito	27,5	8,0	90
Usa	515,0	50,0	80
Giappone	70,1	22,0	80
Italia	36,3	12,0	15

Tab. 2.1: Produzione annuale di conglomerato bituminoso in alcuni paesi e percentuali del materiale recuperato

2.2 Breve storia del riciclaggio in Italia: dalla fresatura a caldo degli anni '70 al primo intervento di riciclaggio, totalmente a freddo, in situ

Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali ha inizio in Italia all'incirca negli anni '70, grazie alla fresatura degli strati superficiali, e in concomitanza della crisi petrolifera del tempo.

La prima tecnica utilizzata fu quella della fresatura a caldo, ottenuta mediante un riscaldamento ed una successiva demolizione di 5 o 6 cm della pavimentazione superficiale, con l'utilizzo di speciali pettini [26].

Il successo fu immediato: considerando il fatto che molte barriere di sicurezza erano già state installate, la scarifica della pavimentazione non comportava un innalzamento della loro quota, con una conseguente ed onerosa risistemazione delle barriere stesse; ciò sarebbe invece accaduto aggiungendo uno strato superficiale sopra la vecchia pavimentazione.

La presenza però di notevoli contenitori di gas su strada, per la fresatura a caldo, e la limitatezza dello spessore di scarifica, hanno spinto i ricercatori a rivolgere i loro studi verso tecnologie meno pericolose e più produttive [27].

Nel 1983 infatti, sulla Roma-Civitavecchia iniziarono i primi lavori di riciclaggio in situ con impianti mobili molto simili a quelli fissi, con una produttività di 120 tonn/ora, che raggiungevano profondità di più di 10 cm con impiego di frese a freddo, e che riuscivano a riciclare fino all'80% del materiale di recupero, da integrarsi con un 20% di inerti vergini, per la correzione della curva granulometrica di progetto; il primo treno di riciclaggio in Italia fu sviluppato ad opera della Pavimental, impresa di costruzioni stradali costituita nel 1982 per la manutenzione della rete autostradale, insieme alla ditta Marini.

Il primo impianto fisso di riciclaggio invece, è da attribuirsi agli inizi degli anni '80, che permise la realizzazione di un importante intervento manutentorio dell'intera pista n.1 dell'aeroporto di Fiumicino: in questa tipologia di impianto, il materiale di recupero, ottenuto dalla dismissione di pavimentazioni bituminose, veniva portato nel cantiere fisso e riciclato, in quantità che al massimo si aggiravano attorno al 40-50%.

Sempre nel 1983, sono stati realizzati i primi interventi di recupero di materiali granulari di fondazione o sottofondazione, con demolizione e miscelazione in situ, con cemento e calce, e con un riutilizzo del 100% del materiale di scarifica (Autostrada I.R.I.-tratto Magliano Sabina-Fiano) [26].

Tra il 1984 e il 1990, lungo la rete autostradale I.R.I., furono eseguite notevoli opere di recupero, per un totale di 2,5 milioni di tonnellate di materiale riciclato a caldo, ma fresato a freddo; il sistema fu favorevolmente adottato anche da altre Amministrazioni italiane, e furono nel complesso utilizzati 13 treni mobili in tutta Italia, di cui 5 della sola Autostrada I.R.I., mentre nel Mondo ben 30.

Sempre nello stesso periodo, nel programma di ampliamento a tre corsie nei tratti Bergamo-Brescia, Bologna-Rimini, Roma-Frosinone, Capua-Napoli, fu utilizzato materiale di recupero fresato, per misti granulari [27].

Nel 1989 ebbero inizio in Italia i primi tentativi di riciclaggio delle pavimentazioni bituminose, totalmente a freddo, sia per la fresatura che per il confezionamento, con emulsioni bituminose, mediante un apposito treno di riciclaggio, dalla produzione oraria di ben 250 tonn/ora; l'unico difetto della tecnologia, era rappresentato dai lunghi tempi di attesa per la riapertura al traffico, anche di 3-4 giorni, a cui ragionevolmente seguirono nuovi studi ed esperimenti in materia.

Ampliare questo mercato e indirizzarlo dal punto di vista della salvaguardia ambientale, comporta innanzitutto:

- progettare le nuove pavimentazioni stradali con il criterio di riutilizzare tutto il materiale di risulta, in tutti i cicli di manutenzione futuri;
- avvalersi il più possibile di tecniche che mirino al recupero del 100% del materiale;
- adottare tecnologie che salvaguardino il più possibile l'ambiente, e sotto tutti gli aspetti.

Relativamente a quest'ultimo punto, si pone quindi maggior attenzione a quelli che sono i processi di riciclaggio in situ, con lo scopo di minimizzare non solo i costi, ma anche l'inquinamento ambientale e i consumi energetici, che deriverebbero dai continui trasporti tra cantiere e impianto fisso [27].

Un'altra problematica da non sottovalutare, è quella delle code che un cantiere stradale genera in fase di manutenzione; i tempi di attesa riguardano infatti non solo gli automobilisti, ma anche gli autocarri, anch'essi incappati nelle code, che riforniscono i cantieri stessi di materiali: ne deriva un crollo della produttività, anche di 5 volte inferiore, ed un allungamento dei tempi di manutenzione, di disturbo, e di conseguente ripristino della strada. Sono da preferirsi, a maggior ragione, lavorazioni con treni di riciclaggio in situ, che riutilizzando il materiale recuperato al 100%, e limitano il rifornimento dall'esterno ai soli acqua e legante (5%).

Nonostante gli studi, le ricerche, le sperimentazioni effettuate in materia, il riciclaggio tarda a spiccare il volo, soprattutto in Italia, e dal punto di vista dell'AIPCR, Associazione Mondiale Della Strada, ciò è attribuibile a diversi fattori, tra cui ricordiamo:

- carenza di normativa tecnica di riferimento;
- legislazione inadeguata;
- scarsa conoscenza da parte della stazione appaltante, dei vantaggi ottenibili dalle tecniche, anche a causa della loro modesta diffusione;
- un comune convincimento che materiali e tecniche di riciclaggio, siano più onerosi rispetto a quelli tradizionali.

Probabilmente dovrebbero essere proprio gli strumenti normativi, i primi a porre vincoli restrittivi sulla messa a discarica di materiale, con lo scopo di indirizzare il paese a favore del riciclaggio, e mostrando una sensibilità ambientale, che spontaneamente tarda

ad arrivare [26].

2.3 Tecniche di riciclaggio

Le tecniche oggi a disposizione nell'ambito del riciclaggio, possono essere macroscopicamente divise in:

- riciclaggio in impianto fisso;
- riciclaggio in situ.

Ciascuna di esse presenta vantaggi e svantaggi, che vedremo in seguito.

Un'altra caratterizzazione può essere fatta in relazione agli scambi energetici presenti all'atto del confezionamento del nuovo conglomerato:

- riciclaggio a caldo;
- riciclaggio a freddo.

A queste due ultime tipologie, se ne aggiunge però una terza, relativa a miscele bituminose tiepide, che per motivi che vedremo in seguito, saranno preferite ai processi a freddo; quest'ultima tecnologia è attualmente disponibile solo in impianti fissi, e sarà pertanto veramente efficiente quando ne sarà possibile la diffusione in impianti mobili.

Relativamente alle altre tipologie invece, esse possono combinarsi tra loro, potendo avere sia negli impianti fissi che negli impianti mobili, possibilità di riciclaggio sia a caldo che a freddo [8].

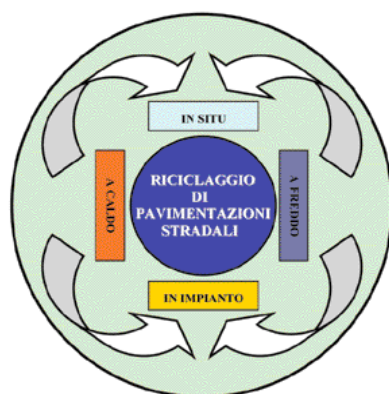


Fig. 2.1: Possibili combinazioni di riciclaggio

Rispetto alle tecniche tradizionali a caldo, come già accennato, il riciclaggio consente un risparmio di risorse non rinnovabili, come aggregati lapidei e bitume, ma anche di tutti i consumi relativi alla loro produzione, come impianti di frantumazione primaria o secondaria [34].

La demolizione delle pavimentazioni, non comporta più un consumo di risorse per lo

smaltimento del fresato stesso e per la gestione dell'area di discarica: il materiale viene riutilizzato, sia a caldo che a freddo.

Le tecniche in situ, inoltre, annullano il trasporto del fresato dal cantiere all'impianto, e conseguentemente del conglomerato dall'impianto al cantiere, permettendo un riutilizzo del materiale fino al 100% nel caso di riciclaggio a freddo.

La stessa distinzione fra riciclaggio a caldo o a freddo, caratterizza un maggior o minor consumo energetico, che si ripercuote direttamente sia sull'aspetto economico, ma anche su quello ambientale [34].

Più nello specifico analizzeremo quali siano i vantaggi e gli svantaggi che accompagnano queste tecnologie, e di quale avvalersi a seconda del caso, di volta in volta.

CAPITOLO 3 - RICICLAGGIO A CALDO, IN IMPIANTO

3.1 Considerazioni generali

Per riciclaggio a caldo si intendono tutte quelle tecniche che permettono il riutilizzo del conglomerato bituminoso in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento, sia preventivamente riscaldato e portato ad un'ideale temperatura, ossia oltre i 150°C. Tutte le restanti tecniche sono da considerarsi fredde o tiepide.

Nel riciclaggio a caldo si ottengono miscele, composte da:

- aggregati lapidei vergini;
- fresato in proporzioni variabili (come se fosse una selezione di aggregati);
- bitume tradizionale o modificato;
- eventuali ACF (Additivi Chimici Funzionali), per ringiovanire il bitume invecchiato.

Questa tipologia di miscela è confezionata in impianti fissi di produzione, le cui caratteristiche sono note, grazie ad un corretto dosaggio dei suoi componenti; la tecnica è senza dubbio quella che conferisce prestazioni più elevate al conglomerato riciclato, e che lo rendono idoneo per ogni tipo di impiego, dallo strato di base a quello di usura [38].

3.2 Gli impianti

Tutti gli impianti possono essere suddivisi in due categorie, a seconda che la miscelazione sia realizzata in modo discontinuo o continuo.

Nel primo caso gli inerti, dopo essere stati essiccati, vagliati e pesati, vengono mescolati tra loro e col bitume fino ad ottenere un impasto omogeneo; il conglomerato ottenuto viene poi scaricato dal mescolatore.

Nel secondo caso gli aggregati, dopo i preliminari trattamenti, vengono prelevati direttamente dai silos mediante saracinesche e alimentatori a nastro ed immessi, insieme al bitume, in un mescolatore ad azione continua.

La miscela, in entrambe i casi, fuoriesce dalla zona di mescolamento mediante un apposito convogliatore, e può essere trasportata alle tramogge di carico e quindi direttamente agli automezzi, oppure inviata ad un silos per lo stoccaggio provvisorio [38].

3.3 Impianto discontinuo

L'impianto discontinuo per la produzione di conglomerato bituminoso, è certamente il più diffuso in Europa, consente una maggior flessibilità di utilizzo, ma anche una miglior qualità del prodotto finito; si riesce ad avere anche un controllo superiore dell'emissione dei fumi, grazie alla presenza del filtro.

Di contro, è un impianto molto costoso, a causa della presenza della torre di mescolazione, del vaglio vibrante, degli elevatori a caldo per il filler e per gli aggregati; inoltre, a parità di condizioni iniziali, è caratterizzato da una produttività inferiore.

Anche la modalità di introduzione del fresato nella miscela può essere eseguita sia a caldo che a freddo.

Vediamo a grandi linee come è fatto un impianto e in cosa consiste il processo produttivo.

Le materie prime da immettere nel ciclo produttivo non sono confezionate in loco, ma vengono generalmente comprate da ditte esterne e stoccate in apposite aree ai margini dell'impianto stesso. Da qui vengono dosati i quantitativi per le singole pezzature, destinate alla miscelazione con il bitume, trasportate mediante pale meccaniche e successivamente caricate in apposite tramogge, detti predosatori, che alimentano con nastri trasportatori un essiccatore, ovvero un forno a tamburo.

Negli impianti a mescolamento discontinuo la dosatura degli inerti viene effettuata solitamente a peso: il dosatore è costituito da una tramoggia a bilico.

Il forno essiccatore, si presenta come un cilindro d'acciaio rotante, inclinato nel senso di avanzamento del materiale, con apposita palettatura interna che solleva il materiale stesso e lo fa cadere attraverso la fiamma del bruciatore, riscaldandolo e liberandolo dall'umidità. Esso rappresenta il cuore del sistema di produzione: infatti dall'efficienza dell'essiccatore dipende interamente la capacità produttiva dell'impianto [38].

La funzione principale dei forni è quella di eliminare l'umidità contenuta negli inerti, in una prima fase, e di portarli, in seguito, alla temperatura di mescolazione voluta.

I forni a tamburo rotante, sono costituiti da un cilindro rotante e da un bruciatore, e sono in grado di operare sia in "equicorrente" che in "controcorrente"; generalmente gli equicorrente vengono utilizzati per impianti di asfalto di tipo "continuo", mentre i controcorrente vengono utilizzati negli impianti tradizionali o di tipo "discontinuo", come nel nostro caso.

Un forno a tamburo rotante che operi in controcorrente può essere schematicamente diviso in tre zone:

- nella prima, gli inerti vengono riscaldati fino a raggiungere la temperatura di ebollizione dell'acqua, ma non perdono umidità;
- nella seconda, gli inerti perdono tutta l'umidità contenuta, essiccandosi: in questa zona la temperatura non aumenta, ma rimane costante;
- nella terza, la temperatura degli inerti, oramai completamente essiccati, aumenta fino a che il materiale non esce dal cilindro [54].

Durante la fase di lavorazione, all'interno del tamburo, si forma una considerevole quantità di gas contenenti aria, polveri e prodotti della combustione, che vengono espulsi in atmosfera, previa purificazione, attraverso un condotto collegato alla ciminiera.

Quando gli aggregati caldi (150-160°C) lasciano l'essiccatore, cadono in un elevatore a tazze che li trasporta nella parte più alta della torre di mescolazione contenente il vaglio vibrante, a seguito del quale è collocato il mescolatore.

Il bitume viene invece trasportato in stato semisolido da autocisterne, ed è stoccato in serbatoi metallici, coibentati con lana di roccia ad alta densità e rivestiti con un mantello di alluminio, posti in aree ben delimitate; inoltre sono predisposte con lo scarico di fondo, per un eventuale collegamento in serie di più cisterne tra loro.

Il bitume viene riscaldato a 130-150°C dalla caldaia oleotermica alimentata con olio combustibile B.T.Z. (olio denso a Basso Tenore di Zolfo) e successivamente mantenuto a temperatura costante con olio diatermico per omogeneizzarne la composizione. Tramite una pompa volumetrica viene poi inviato e dosato nel mescolatore.

Una volta ottenuti i giusti quantitativi di bitume e di aggregati vergini, si passa alla miscelazione vera e propria del materiale: un recipiente ospita un doppio albero a palette controrotanti, che agitano la miscela di pietrischi, bitume e filler per un tempo variabile da 35 a 50 secondi, in base alla potenzialità della macchina e all'umidità residua; i miscelatori sono in genere costituiti da vasche con il fondo apribile per lo scarico del materiale impastato, che mediante un apposito convogliatore, può essere trasportato alle tramogge di carico e quindi direttamente agli automezzi, oppure inviato ad un silos per lo stoccaggio provvisorio [38].

3.4 Modifica per il riciclaggio

È evidente come gli impianti discontinui sopra descritti, possano essere facilmente modificati nel caso di riciclaggio a caldo; ciò che si deve evitare in questo caso è il

passaggio del materiale fresato contenente bitume attraverso la fiamma del bruciatore del cilindro essiccatore (si rischia di crackizzare il bitume e di immettere in atmosfera sostanze nocive).

Le percentuali di materiale riciclabile nella miscela variano in relazione all'impianto utilizzato e agli equipaggiamenti di cui lo stesso dispone, alla natura del materiale fresato (anche detto RAP, Reclaimed Asphalt Pavement) e alle sue condizioni operative (temperatura, umidità), ed infine alla modalità di immissione nella miscela, a freddo o a caldo, a seconda che sia previsto o meno, il riutilizzo del fresato mediante riscaldamento.

Ricordiamo che per fresatura si intende quella tecnica che permette di asportare una profondità determinata della sovrastruttura, mediante appositi macchinari, detti generalmente frese: mediamente la larghezza massima di fresatura è di 4,20 mt, mentre lo spessore massimo è di 30 cm.

Le soluzioni di riciclaggio utilizzate più largamente sono le seguenti:

- introduzione del **riciclato freddo al piede dell'elevatore caldo**, normalmente impiegato per percentuali fino al 15-20%. Sono sufficienti un dosatore volumetrico o ponderale ed un nastro trasportatore. Il vaglio riselezionatore dell'impianto viene escluso;

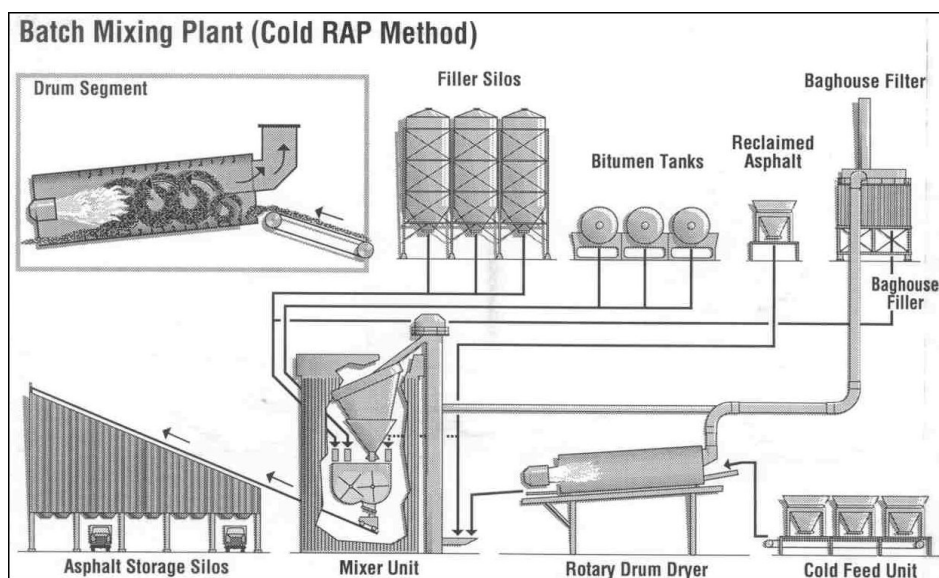


Fig. 3.1: Impianto di riciclaggio a caldo con introduzione del RAP al piede dell'elevatore

- introduzione del **riciclato nel cilindro essiccatore**, attraverso un apposito anello di riciclaggio, che consente di raggiungere percentuali fino al 35%. L'alimentazione viene effettuata mediante un dosatore ed un nastro trasportatore

ed è possibile garantire le esatte proporzioni di materiale vergine e riciclato, inserendo sui rispettivi nastri alimentatori stazioni di pesatura interconnesse. Anche in questo caso è interdetto l'utilizzo del vaglio;

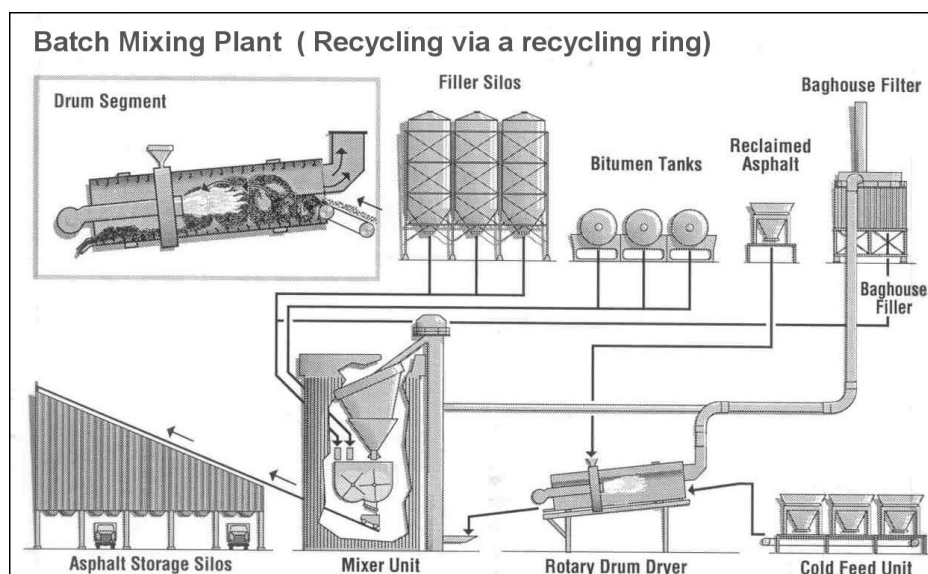


Fig. 3.2: Impianto di riciclaggio a caldo con introduzione del RAP attraverso un apposito anello

- introduzione del **riciclato a freddo**, ossia a T ambiente, **nella vasca di miscelazione**, attraverso una tramoggia tampone installata sulla torre (di mescolazione). La tramoggia tampone viene alimentata mediante un dosatore, un nastro trasportatore ed un elevatore a tazze. Nel miscelatore, al fresato vengono aggiunti gli aggregati vergini surriscaldati; qui avviene lo scambio termico tra i due materiali, con diminuzione della T del prodotto finale, in funzione del tasso di materiale riciclato utilizzato, della sua umidità e della stessa T ambiente. Il metodo è utilizzato per percentuali di fresato fino al 10-20%. È consentito l'utilizzo del vaglio;
- **combinazione ed utilizzo contemporaneo dei due metodi suddetti** (RAP nell'anello del cilindro essiccatore e RAP freddo nel miscelatore) per raggiungere percentuali di riciclato fino al 40% complessivi;
- **essiccazione e riscaldamento del riciclato**, fino a 110/130°C, **in uno speciale essiccatore in equicorrente**, provvisto di camera di combustione esterna per salvaguardare al meglio le caratteristiche del bitume nella fase di scambio termico. Il materiale scaricato dall'essiccatore viene immesso in una tramoggia tampone riscaldata e coibentata, e di qui dosato nella tramoggia di pesatura degli inerti vergini. Viene successivamente immesso nella vasca di miscelazione insieme agli aggregati nuovi, leggermente surriscaldati, affinché il prodotto finale

raggiunga una temperatura di circa 160°C. Si ottengono percentuali di riciclaggio attorno al 50%, sempre in relazione alla qualità del fresato. Rimane consentito l'utilizzo del vaglio.

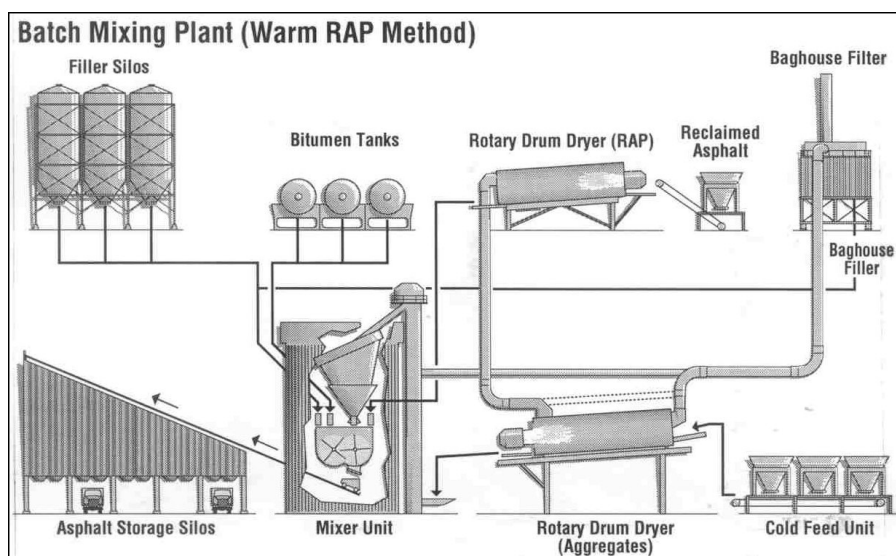


Fig. 3.3: Impianto di riciclaggio a caldo con speciale essiccatore in equicorrente per il RAP

Risulta chiaro dagli esempi sopracitati, come, nel caso in cui il fresato sia stato preventivamente riscaldato all'interno di un forno separato, a fronte del maggior costo per la fase produttiva, si potranno raggiungere percentuali di RAP maggiori rispetto al peso totale; nel caso di aggiunta a freddo invece, il calore proviene dal riscaldamento degli inerti di primo impiego a circa 250°C, e pertanto la quantità di materiale riciclato sarà più limitata. In quest'ultimo caso però si ha il vantaggio di poter avere un maggior controllo sulla granulometria degli inerti, mediante vagliatura e selezione del fresato di dimensioni minori, al fine di produrre conglomerati bituminosi adatti anche alla realizzazione di strati di usura, per i quali le prestazioni richieste sono molto più elevate. Il RAP può essere introdotto all'interno del conglomerato caldo senza alcuna prescrizione, fino ad un massimo del 10% per lo strato di usura, e del 20% per strati di collegamento e di base: in caso contrario si effettuerà un'analisi granulometrica sugli aggregati, una valutazione della percentuale di legante invecchiato presente, nonché della sua natura, affinché la miscela finale venga progettata in maniera corretta [38].

3.5 Impianto continuo, tipo Drum Mixer

Nell'impianto continuo per la produzione di conglomerato bituminoso, diversamente dal discontinuo, la miscelazione del materiale avviene all'interno del tamburo essiccatore, che per ovvi motivi è assai più lungo, dovendo essere contemporaneamente

essiccatore e mescolatore.

Anche in questo tipo di impianto, il processo produttivo consiste nel riscaldare ed asciugare gli aggregati che vengono mescolati in continuo all'interno del tamburo, assieme a bitume e filler.

Non essendoci però la torre di miscelazione, né il vaglio vibrante per la selezione degli aggregati, i costi dell'impianto sono notevolmente ridotti, e la sua produttività è maggiore rispetto al caso discontinuo.

Tra gli svantaggi abbiamo però una qualità del prodotto finito inferiore, a causa dei minori controlli effettuati in fase di produzione, ed inoltre inconvenienti legati all'inquinamento: infatti, la presenza del bitume in prossimità di zone ad elevata temperatura provoca la formazione di vapori volatili ed oleosi difficilmente filtrabili.

Vediamo nel dettaglio com'è composto un impianto continuo, di tipo "drum mixer".

Questi impianti sono enormemente semplificati rispetto ad un impianto a ciclo discontinuo: gli aggregati vergini entrano dal lato del bruciatore e nella parte iniziale del cilindro avviene il loro riscaldamento, mentre nella rimanente parte viene spruzzato il bitume (già reso fluido) ed immesso il filler, in modo da poter consentire il mescolamento del conglomerato.

Il ciclo produttivo ha inizio dalle tramogge-alimentatori degli inerti; è necessario proporzionare la miscela in funzione della capacità del tamburo. Si può avere un controllo totale degli alimentatori, regolando la velocità dei nastri trasportatori e mantenendo le proporzioni desiderate: in questo modo la portata complessiva degli inerti che va nel tamburo miscelatore/essiccatore può essere facilmente aumentata o diminuita.

A questo punto del ciclo produttivo si rende necessario un controllo sulla qualità degli inerti, che devono essere stati preventivamente separati, per evitare una possibile miscelazione, con conseguente confusione delle granulometrie.

Dall'alimentatore, gli inerti vengono portati, mediante nastro trasportatore, al sistema di pesatura, che fornisce istante per istante il peso degli inerti, permettendo così di poter regolare al meglio il rapporto inerti/bitume: gli stessi sistemi di pesatura degli inerti e del bitume sono interconnessi tra loro, affinché il conglomerato prodotto sia uniforme e i rapporti tra i due materiali rimangano costanti. Si ricorda che il sistema di pesatura degli inerti, ne misura la loro massa totale, per cui anche l'umidità in essi contenuta; questa massa deve perciò essere sottratta dal sistema di pesatura, per evitare possibili discrepanze tra la miscela di progettazione e il conglomerato finale.

La percentuale di umidità effettivamente contenuta negli inerti, viene valutata mediante estrazioni periodiche di prova.

Gli aggregati a questo punto entrano nel tamburo di miscelazione alla fine del bruciatore, affinché possano muoversi al suo interno nella stessa direzione dei gas (essiccatore in equicorrente); con questo principio i gas più caldi si sviluppano nella fase finale del tamburo di miscelazione e pertanto il bitume risulta protetto dagli effetti nocivi che deriverebbero dalla sua ossidazione e dal contatto diretto con la fiamma di combustione. Una delle principali differenze tra il sistema di miscelazione tradizionale, e quello di miscelazione nel tamburo, consiste nella diversa modalità di rivestimento dell'inerte. Più dettagliatamente le fasi che accompagnano questo processo sono:

Fase 1- Gli inerti entrano nel tamburo di miscelazione. Nella fase iniziale del riscaldamento l'umidità superficiale inizia a essere rilasciata dagli inerti con l'aumentare della temperatura.

Fase 2- Proprio in questa fase avviene il maggior incremento di temperatura, in quanto gli inerti raggiungono temperature attorno ai 170-180°F (77-82°C); in questo modo la maggior parte dell'umidità viene eliminata ed il tasso di aumento della temperatura della miscela, si stabilizza.

Fase 3- Quando la temperatura della miscela raggiunge i 180-200°F (82-93°C), viene introdotto anche il legante. L'umidità rilasciata in questa fase, produce un'espansione molto rapida del bitume, che provoca una significativa dilatazione superficiale del legante stesso, che "intrappola" le polveri e le particelle più grandi, provocando un rapido rivestimento degli inerti: risulta chiaro, quindi, come il rivestimento del materiale lapideo, non dipenda dalla miscelatura forzata con il bitume.

Fase 4- La maggior parte dell'umidità degli aggregati, è stata eliminata. L'inerte è stato ricoperto, e la temperatura del conglomerato continuerà a salire fino al valore desiderato (di progetto); quando questa sarà raggiunta, il conglomerato verrà scaricato tramite un nastro trasportatore inclinato, portato in un silo o in un serbatoio di stoccaggio, e mantenuto ad una temperatura costante fino al momento dell'uso.

3.6 Modifica per il riciclaggio

Questa tipologia di impianto (continuo), è quella che si presta maggiormente ad essere modificata, nel caso in cui si debbano produrre conglomerati con notevoli percentuali di materiali di recupero (fino al 70%).

In questo caso, però, bisogna necessariamente impedire che il bitume residuo ed il

bitume nuovo di aggiunta vengano a diretto contatto con la fiamma del bruciatore, evitando così qualsiasi rischio di ossidazione del legante stesso.

Per scongiurare questo pericolo sono stati studiati diversi sistemi:

- sistema a doppia alimentazione (dual-feed): il materiale vergine viene immesso all'altezza del bruciatore ed inizia il suo riscaldamento. Il materiale di recupero viene invece introdotto a metà cilindro, dove la fiamma del bruciatore non può più danneggiarlo; il riscaldamento del fresato avviene dunque per contatto, grazie al mescolamento con gli inerti vergini, nella seconda metà del cilindro;
- sistema del cilindro nel cilindro (drum-in-drum): il materiale vergine viene immesso all'altezza del bruciatore in uno speciale cilindro, interno al principale, ma più piccolo; il materiale di recupero, invece, viene introdotto poco dopo tra i due cilindri ed inizia a riscaldarsi, rimanendo tuttavia protetto dalla fiamma, grazie al cilindro interno che si interponendone tra i due ed evita loro qualsiasi possibile contatto. Ad una certa distanza di sicurezza dalla fiamma, il cilindro interno termina e i due materiali (vergine e di recupero) si mescolano nella rimanente parte del cilindro principale;
- sistema Pyrocone (o a diffusione di fiamma): è un sistema di controllo della combustione e quindi della temperatura. La fiamma è completamente schermata da un cono taglia-fiamma costituito da materiale altamente refrattario, dotato di speciali fori;
- sistema “*shield*” (a schermo): uno schermo metallico è sistemato di fronte alla fiamma ed il materiale di recupero è immesso dalla parte opposta;
- in un quinto sistema il materiale di recupero è inserito nel tamburo dalla parte opposta a quella del bruciatore ed ivi mantenuto per mezzo di speciali nervature.

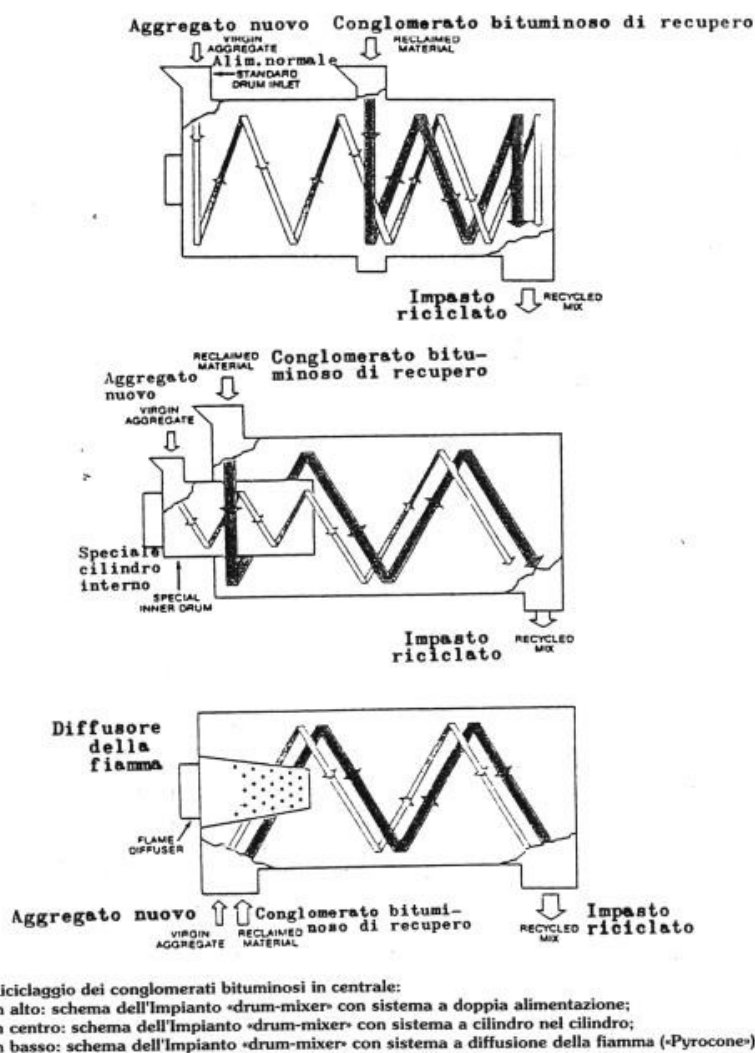


Fig. 3.4: Diverse modalità di introduzione del RAP nel Drum Mixer

I drum-mixer tradizionali lavorano in equicorrente in quanto si è sempre cercato di allontanare i materiali di recupero dalla fiamma del bruciatore per evitare l'ulteriore ossidazione del bitume [56].

CAPITOLO 4 - RICICLAGGIO A FREDDO, IN IMPIANTO

4.1 Considerazioni generali, descrizione di un impianto di riciclaggio e del processo produttivo

Per riciclaggio a freddo intendiamo qualsiasi tecnica che permette il riutilizzo del conglomerato bituminoso, in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento, non è preventivamente riscaldato, ma aggiunto a T ambiente.

Il RAP, ottenuto dalla fresatura della vecchia pavimentazione, viene miscelato con emulsioni bituminose o bitume schiumato, agenti rigeneranti ed eventualmente con inerti vergini, per l'eventuale correzione della curva granulometrica; questi due tipi di legante lavorano in modo diverso, e, pur presentando tempi di maturazione differenti, raggiungono tuttavia risultati molto simili.

Il riciclaggio a freddo in impianto fisso, può essere effettuato sia con macchine ed attrezzature specifiche installate in modo permanente, sia con particolari impianti semoventi posti nei cantieri; possono anche essere utilizzati impianti per la produzione di misto cementato opportunamente modificati.

Negli impianti fissi, nati esplicitamente per questa tipologia di riciclaggio, i dosaggi del RAP, del bitume nuovo e degli aggregati, possono essere effettuati con maggior precisione, ed anche in base alle caratteristiche del fresato, possono essere variate le componenti della miscela; la produttività è di circa 100-150 tonn/ora.

La scelta di riciclare a freddo, si effettua soprattutto quando si ha la necessità di utilizzare del materiale fresato, precedentemente accumulato in cantieri o depositi temporanei.

La *fresatura a caldo* richiede infatti l'immediato reimpiego del conglomerato bituminoso recuperato che, con il raffreddamento, non sarebbe più lavorabile, e può essere quindi utilizzato solo nei processi di riciclaggio in sito; la *fresatura a freddo*, invece, fornisce un conglomerato di recupero che resta sciolto e lavorabile e può, quindi, essere riutilizzato sia nei processi di riciclaggio in sito sia in quelli in centrale.

Inoltre uno dei vantaggi del riciclaggio a freddo, consiste nel non dover ricorrere ad energia termica nei processi di produzione: ciò comporta notevoli vantaggi dal punto di vista economico, energetico ed ambientale.

Un altro importante vantaggio che deriva da questo tipo di impianti, consiste nella facilità di smobilitazione, che ne permette il posizionamento vicino alla zona di intervento, riducendo i costi ed il dispendio energetico derivanti dai trasporti.

Anche in questo caso esistono due tipologie di impianto:

1. discontinuo;
2. continuo.

La differenza fondamentale è rappresentata dalla modalità di dosaggio degli inerti e del legante; nel primo caso il ciclo sarà, per l'appunto, discontinuo, poiché il materiale verrà pesato, e raggiunto un determinato quantitativo, verrà inviato nel ciclo produttivo: la produzione oraria risulterà nettamente inferiore, ma a vantaggio della precisione del dosaggio stesso.

Nel secondo caso, invece, l'alimentazione dell'impianto avverrà in maniera continua, tramite l'immissione su nastri trasportatori degli inerti, in base a volumi prestabiliti: in questo caso la produzione oraria sarà sicuramente maggiore, ma con una minor precisione del dosaggio dei materiali.

Nel riciclaggio a freddo le miscele sono composte da:

- materiale di recupero, proveniente dalla fresatura o scarifica di una pavimentazione;
- legante bituminoso, sotto forma di emulsione bituminosa o schiuma di bitume;
- filler (additivi);
- acqua di aggiunta, per un miglioramento della lavorabilità;
- aggregati vergini di integrazione, per correggere la curva granulometrica degli inerti provenienti dal materiale di recupero [17].

Va posta particolare attenzione alla determinazione delle caratteristiche del fresato, che permetterà conseguentemente di regolare la quantità/qualità degli altri componenti della miscela, con lo scopo di ottenere il miglior prodotto finale possibile.

L'impianto fisso è solitamente composto da:

- un sistema di frantumazione e rifelezionatura del fresato;
- due o più predosatori per il fresato e per gli aggregati di integrazione;
- un silos per il cemento con abbinata una coclea a velocità variabile;
- un serbatoio di stoccaggio dell'emulsione bituminosa e/o bitume per schiumatura;
- un serbatoio per l'acqua con misuratore di portata;
- un mescolatore di tipo continuo a due alberi;
- rampe di spruzzatura per l'acqua con misuratore di portata;
- rampa per l'emulsione;
- attrezzature e strumenti di controllo e pesatura, al fine di garantire un costante

controllo di processo;

- un nastro di carico del prodotto finito sull'autocarro, o apparecchiatura di scarico dal mescolatore.



Fig. 4.1: Impianto per la produzione di conglomerato a freddo

Dopo una preventiva frantumazione e riselezionatura del fresato, quest'ultimo e gli aggregati vergini di apporto necessari per la correzione della curva granulometrica, vengono convogliati al mescolatore, per mezzo di nastri trasportatori; qui avviene la miscelazione, assieme al legante, che può essere sotto forma di emulsione bituminosa o bitume schiumato, in percentuali che vanno dal 3 al 6%, assieme all'acqua di aggiunta, utile per migliorare la lavorabilità della miscela, e assieme al filler; i possibili additivi possono essere calcarei o silicei, ma indubbiamente il più utilizzato è il cemento, aggiunto in percentuali che vanno dall'1 al 3%; la sua funzione è quella di migliorare le caratteristiche del conglomerato in termini di resistenza, e di essere un catalizzatore per favorire la rottura nel caso dell'emulsione.

Di solito non è presente il silo di stoccaggio del prodotto finito, in quanto il conglomerato riciclato a freddo, viene direttamente scaricato sugli automezzi di trasporto. Bisogna inoltre porre molta attenzione alla preparazione del fresato, prima del suo ingresso nell'impianto, al fine di valutarne correttamente le pezzature, le impurità e l'umidità.

Una volta pronta la miscela, il conglomerato bituminoso viene caricato sui mezzi e portato in cantiere, per essere successivamente posto in opera e compattato, ricostituendo così la pavimentazione originaria.

4.2 Le emulsioni bituminose

Il bitume, a temperatura ambiente, è un liquido estremamente viscoso, per cui difficilmente lavorabile; tuttavia una modalità, oltre al riscaldamento, che permette di ovviare a questo inconveniente, consiste nell'emulsione con acqua. I vantaggi di questa tecnica sono notevoli, perché oltre a non dover riscaldare preventivamente il bitume, l'emulsione può essere utilizzata con inerti freddi o umidi: da ciò ne deriva un notevole risparmio in termini economici, energetici ed ambientali.

Un'emulsione è composta da due liquidi immiscibili, uno disperdente (l'acqua) e l'altro disperso (il bitume) sottoforma di goccioline [52].

La presenza di una sostanza attiva in superficie, un emulsionante, impedisce alle particelle di bitume di raggrupparsi, formando attorno a loro un film protettivo; si creano quindi delle forze repulsive che mantengono le particelle di bitume disperse nella fase acquosa continua; in genere la quantità di bitume nell'emulsione, si aggira attorno al 60% del volume totale, mentre il rimanente 40% è costituito da acqua.

Successivamente alla miscelazione con il materiale, l'acqua viene eliminata e le particelle di bitume si aggregano, formando una pellicola ininterrotta che, depositandosi sulla superficie dell'inerte, lo riveste. Si parla in questo caso di "rottura" (dell'emulsione).

È importante, inoltre, che l'emulsione stessa sia "tagliata su misura", cioè adeguata ai materiali e alle modalità operative del singolo caso. Infatti quando si verifica la "rottura" ed il bitume si separa dalla sospensione acquosa, la viscosità del liquido aumenta in modo significativo; la sottile pellicola di legante, che ora riveste le singole particelle del materiale, rende però più difficoltosa la fase di costipamento, proprio a causa della sua viscosità e della sua bassa temperatura [7]. Perciò, per una buona riuscita del trattamento, sono necessarie emulsioni la cui rottura dovrebbe avvenire solo dopo o durante la fase di compattazione.

Il fenomeno della "rottura" si articola in tre stadi:

- *decantazione*: le goccioline di bitume sedimentano;
- *flocculazione*: le particelle di bitume si avvicinano;
- *coagulazione*: le particelle di bitume fondono tra di loro.

Successivamente alla rottura si verifica la presa, ossia la fase in cui il bitume perde l'acqua rimasta al suo interno, e si stringe sempre più intorno all'inerte [52]. Quando il bitume, totalmente anidro, disperde le componenti più volatili in esso contenute,

L'adesione è completa, ed il legante che rimane è costituito solamente da idrocarburi non volatili.

Questo fenomeno può avvenire per diversi motivi:

- perdita di acqua per evaporazione o per assorbimento da parte degli aggregati;
- coagulazione chimica dovuta ad un processo di reazione tra l'emulsione e l'aggregato;
- disturbi meccanici provocati da elevate pressioni di pompaggio, processi di miscelazione e sforzi di costipamento;
- composizione chimica dell'emulsione.

La stessa velocità di rottura è influenzata da molti fattori, come ad esempio la temperatura dell'emulsione, quella dell'ambiente, la natura degli inerti, le dimensioni delle particelle di bitume disperse, le modalità di esecuzione del lavoro [52].

Si distinguono a riguardo emulsioni:

- a rottura super rapida (RR);
- a rottura rapida (ER);
- a rottura media (EM);
- a rottura lenta (EL);
- a rottura sovrastabilizzata (LL).

Dal punto di vista chimico invece, esistono emulsioni di due tipi, quelle anioniche (o basiche) e quelle cationiche (o acide), la cui differenza fondamentale è relativa alla carica polare che si fissa sulla superficie del globulo di bitume: in un'emulsione anionica gli ioni assumono una carica negativa in una fase alcalina, mentre in un'emulsione cationica assumono una carica positiva in una fase acida [17].

Un'emulsione anionica si rompe solo se l'acqua contenuta nell'emulsione evapora, o viene assorbita dall'aggregato o dal cemento; le emulsioni cationiche invece si rompono chimicamente, necessitano quindi di particolari prodotti chimici, che provocano la separazione del bitume dall'acqua dopo un certo intervallo di tempo.

Nel caso di emulsione anionica e aggregato acido (silice, quarziti, porfido, basalto), non si verifica spontaneamente la rottura dell'emulsione, e di conseguenza non sussiste adesione tra legante e aggregato; proprio per questo motivo l'uso di emulsioni basiche è sempre minore, seppur queste ultime siano più economiche e di più facile produzione; le emulsioni acide inoltre rispondono molto meglio alle esigenze tecniche (del caso).

Seppur le miscele a freddo si caratterizzano per i ridotti consumi energetici e per i bassi

livelli di emissioni, le emulsioni bituminose, che hanno lo scopo di veicolare il bitume tra gli inerti, presentano anche i seguenti svantaggi:

- il rivestimento degli inerti ha inizio solo dopo la rottura dell'emulsione (che tuttavia può richiedere anche dei mesi), affinché vengano raggiunte le necessarie caratteristiche meccaniche nel periodo di maturazione della miscela stessa;
- l'emulsione bituminosa può rivestire solo parzialmente le pezzature più grandi.

Per questo motivo si faranno strada sempre di più le miscele tiepide, di cui analizzeremo i notevoli vantaggi in seguito [17].

4.3 Il bitume schiumato

Il procedimento alla base della tecnologia del bitume schiumato è molto semplice. Si inietta acqua fredda (generalmente il 2÷3%) nel bitume riscaldato a circa 180°C in un'apposita camera di espansione. Quando l'acqua entra in contatto con il bitume caldo, per effetto della conduzione del calore, si riscalda fino a diventare vapore, passando così dallo stato liquido allo stato gassoso mediante una reazione di espansione; difatti, le bolle di vapore coperte da una pellicola di bitume fanno assumere al legante una consistenza schiumosa (tipo "mousse"), con un aumento di volume, rispetto a quello allo stato fluido, di circa 15/20 volte, in funzione della percentuale d'acqua e del tipo di bitume utilizzato [33]. Quando le bolle scoppiano, a causa dell'instabilità della massa schiumosa, i frammenti di bitume si disperdono tra gli aggregati lapidei e aderiscono alla frazione fine, creando una malta che lega gli elementi più grossolani [25].

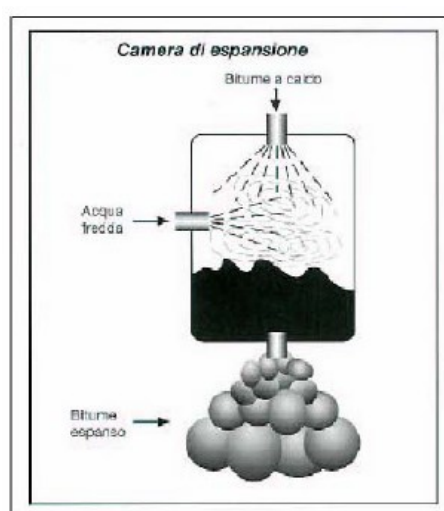


Fig. 4.2: Camera di espansione

A seguito del processo di espansione, che può essere agevolato dall'eventuale insufflazione di aria, la viscosità del legante viene sensibilmente ridotta, per cui il

bitume risulta, a questo punto, adatto ad essere distribuito uniformemente nella mescola di materiali da costruzioni (fresato e aggregati vergini) [33].

I notevoli vantaggi che il bitume schiumato offre rispetto alle emulsioni bituminose, sono:

- diminuzioni dei costi sostenuti per il legante e il suo trasporto, ed in generale del processo produttivo;
- garanzia di un buon ricoprimento degli aggregati;
- buone prestazioni meccaniche;
- dopo la miscelazione con bitume espanso, il materiale ottenuto può essere immediatamente steso e compattato;
- il materiale trattato con il legante schiumato, risulta lavorabile per lunghi periodi.

Il bitume espanso viene caratterizzato attraverso due parametri: il *rapporto di espansione* (expansion ratio), ossia il rapporto tra il volume massimo del bitume allo stato espanso e quello allo stato originario, e il *tempo di semitrasformazione* (half life), inteso come il tempo, misurato in secondi, che occorre affinché la schiuma si depositi, fino a raggiungere la metà del volume massimo ottenuto [30], [24].

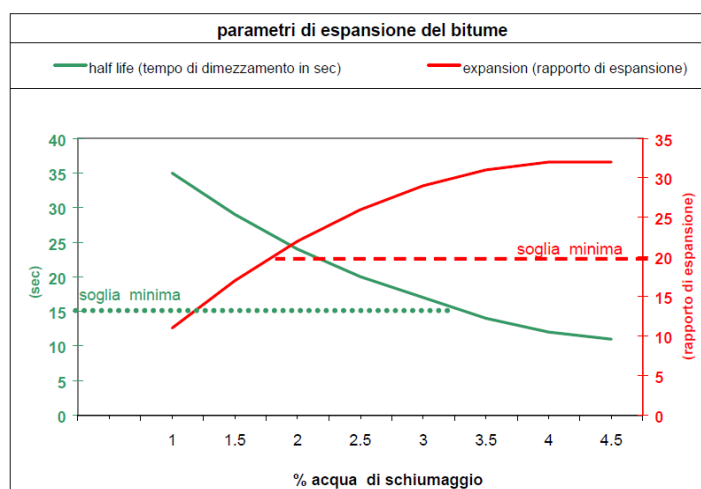


Fig. 4.3: Rapporto di espansione e tempo di semitrasformazione

Entrambe le caratteristiche dipendono dalla temperatura del bitume, dalla quantità di acqua addizionata, dalla pressione di iniezione del legante nella camera di espansione, dalla presenza di sostanze antischiuma, come depositi di silicio; le schiume migliori sono in genere quelle che riescono ad ottimizzare sia l'espansione che il tempo di semitrasformazione; inoltre i bitumi più morbidi possiedono in genere caratteristiche schiumogene migliori, mentre quelli più duri si utilizzano preferibilmente in condizioni climatiche con elevate temperature [33]. Relativamente alla qualità del legante, i bitumi

con alti valori di viscosità, si espandono più facilmente, e hanno rapporti di espansione e tempi di semitrasformazione maggiori, rispetto a quelli di bitumi meno consistenti.

Inoltre il bitume schiumato, interagendo con il filler, forma una vera e propria matrice, che sostiene la struttura degli aggregati lapidei, e conferisce ottime caratteristiche prestazionali alla miscela finale [25].

CAPITOLO 5 - RICICLAGGIO A CALDO, IN SITU

5.1 Considerazioni generali, vantaggi e svantaggi della tecnica

La rigenerazione in sito delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso, era stata molto sfruttata in passato, quasi esclusivamente per ricostituire strati di base, ottenendo risultati prestazionali veramente elevati; tuttavia questa tecnica fu presto abbandonata a causa delle notevoli emissioni in atmosfera, che non riuscivano ad essere fronteggiate dai dispositivi di abbattimento dell'epoca.

Nel caso di fresatura a caldo, inoltre, la termorigenerazione consente di non alterare la granulometria degli aggregati, danneggiando però le caratteristiche del legante, particolarmente sensibile alle alte temperature, soprattutto se modificato. Proprio per questo motivo i macchinari tradizionali, opportunamente integrati e/o modificati, utilizzano propano o altri gas, per riscaldare la pavimentazione; appositi pannelli (anche detti preriscaldatori) permettono di far raggiungere alla superficie una temperatura di circa 110°C, per agevolare le operazioni di scarifica; il materiale fresato raggiungerà successivamente una temperatura indicativa di 170°C, alla quale potrà essere lavorato senza però danneggiare il legante. In questa fase operativa la composizione granulometrica non viene alterata ed il bitume (anche se modificato) non viene rovinato; inoltre anche lo sviluppo di fumi dovuti all'umidità presente nella pavimentazione, e di gas prodotti dal bitume stesso alle alte temperature, è sensibilmente ridotto, e ciò comporta una maggior sicurezza anche dal punto di vista lavorativo, per gli operai del settore [9].

Questa tipologia di intervento è però limitata ai soli strati superficiali, potendo agire su una profondità di 5 o 6 cm, per cui non può essere utilizzata per pavimentazioni che presentino anche danni strutturali negli strati più profondi; potendo intervenire solo su spessori ridotti, quali ad esempio i tappeti di usura, eliminano alcune forme di ammaloramento, come le fessurazioni superficiali, e ripristinano la rugosità, quindi l'aderenza, con conseguente risvolto positivo sulla sicurezza stradale.

A differenza degli impianti fissi, questa tecnica è realizzata mediante impianti mobili, semoventi, anche detti "treni di riciclaggio", costituiti da macchine che riscaldano e scarificano la pavimentazione esistente, e che successivamente aggiungono al materiale recuperato, bitume nuovo, agenti attivanti per rigenerare il bitume invecchiato, eventuali inerti vergini per la correzione granulometrica della miscela: il materiale è ora pronto per essere steso e compattato.

Il riciclaggio in sito a caldo presenta notevoli vantaggi, tra cui ricordiamo:

- risparmio in relazione al trasporto del materiale. Questi impianti, seppur comportino un notevole impatto ambientale, permettono di ridurre al contempo i percorsi ed il numero di mezzi di trasporto che, producendo gas di scarico, prodotti volatili e danni acustici, hanno ripercussioni negative sull'ambiente;
- risparmio in combustibile; il materiale appena fresato presenta infatti un'umidità molto ridotta rispetto a quello presente nei sili di stoccaggio, pertanto i materiali trattati in sito, saranno sottoposti ad un preriscaldamento minore;
- risparmio relativo alle spese di stoccaggio del materiale fresato, e la conseguente copertura dei cumuli per proteggerli dalle intemperie;
- minor disturbo al traffico veicolare, in quanto i trasporti necessari sono relativi solo a pochi materiali d'apporto, quali inerti vergini di aggiunta, bitume nuovo ed eventuali ringiovanenti;
- risparmio relativo alla quantità di bitume nuovo, potendo utilizzare maggiori percentuali di conglomerato bituminoso (anche il 100%), rispetto ad una tecnologia in impianto fisso [28].

Di contro possono presentarsi anche i seguenti svantaggi:

- eccessivo inquinamento causato dall'impossibilità pratica di portare su strada depuratori efficaci, a causa dell'enorme ingombro che essi rappresenterebbero: proprio per questo motivo, ad esempio, la tecnologia non è utilizzabile nelle gallerie;
- enorme difficoltà di ottenere una correzione granulometrica esatta: gli aggregati vergini devono essere preventivamente stesi sulla pavimentazione per mezzo di uno spandigraniglia, ed in seguito al passaggio della fresatrice, devono rimanere, assieme al fresato, in forma di cordonella davanti all'impianto in movimento, sulla strada stessa. Per questo motivo il riciclaggio in sito diventa antieconomico e tecnicamente non consigliabile, nel caso in cui debba essere effettuata una correzione granulometrica superiore al 30%.

Ormai il riciclaggio a caldo in situ, è stato da molti anni abbandonato, soprattutto per motivi di ordine ambientale, legati principalmente all'emissione dei fumi di bitume.

Fa eccezione tuttavia il processo di riciclaggio a caldo in situ dei conglomerati drenanti [28].

5.2 I treni di riciclaggio

Il riciclaggio a caldo si effettua in sito mediante appositi “treni di riciclaggio”, che, come già accennato prima, prevedono una serie di attrezzature che hanno lo scopo di svolgere le seguenti operazioni:

- scarifica della pavimentazione, preriscaldata o meno, fino alla profondità voluta;
- riscaldamento del materiale fresato, all’interno del tamburo essiccatore;
- aggiunta di materiali vergini (bitume e inerti lapidei);
- miscelazione del conglomerato riciclato;
- stesa del conglomerato riciclato per mezzo di barra finitrice e compattazione con rullo tradizionale.

Tuttavia i treni che tratteremo in questa sede, si differenziano tra loro per il tipo di fresatura che viene effettuata, per il tipo di pavimentazione che si va a scarificare e per il tipo di pavimentazione che si vuole ottenere.

5.3 Riciclaggio in situ a caldo: primi risultati

Negli ultimi decenni il ricorso alle pavimentazioni drenanti, ha trovato sempre maggiore diffusione, non solo sulle autostrade, ma anche lungo tutto il sistema viario italiano.

Questo tipo di pavimentazione, è apparsa in ambito autostradale alla fine degli anni '80 e ha subito una crescita non indifferente nel corso degli anni, proprio grazie ai notevoli vantaggi che questo tipo di pavimentazione offriva.

Si è quindi vista un’opportunità di sviluppo tecnologico ed il perfezionamento di una tecnica di riciclaggio che sarebbe servita per le future opere di manutenzione. Una società italiana, la Pavimental, era da anni indirizzata ad individuare una tecnologia che permettesse il riutilizzo di tutto il materiale fresato, che presenta un notevole valore residuo, seppur questo fattore non sia stato considerato in passato.

Dopo che nel 2002 era finita la fase strettamente sperimentale, i tecnici della Pavimental, insieme alla società Autostrade per l’Italia, sfruttarono la tecnica del riciclaggio a caldo delle pavimentazioni drenanti, favorendo la tecnica Martec per le attività associate alla fresatura, e quella della Marini per la rigenerazione vera e propria del conglomerato bituminoso drenante: entrambe le tecnologie eseguono il riciclaggio in sito a caldo, ma si differenziano per gli spessori di intervento, che per la Martec si limitano a 4-5 cm, mentre per la Marini non vi sono particolari limitazioni, se non quelle derivanti dalle potenzialità delle frese, in quanto la rigenerazione avveniva in un

tamburo dalla capacità produttiva di 120 tonn/h.

L'occasione quindi di concretizzare questa unione, si presentò nel 2003 con i lavori di rigenerazione lungo tutta l'autostrada A12 Livorno-Rosignano dello stato d'usura drenante realizzato nel 1993 con bitume modificato mediante l'impiego dell'EVA (polimero), che non solo presentava problemi di sgranatura con riduzione degli spessori, ma anche una capacità drenante sensibilmente diminuita.

La ricerca di efficienti strumenti tecnologici, ha riguardato le seguenti operazioni fondamentali:

- fresatura a caldo della pavimentazione;
- rigenerazione a caldo del materiale fresato, incluso eventuale materiale vergine d'apporto.

Il risultato è stato infatti ottenuto con la combinazione e l'integrazione delle tecnologie delle due società [9].

5.3.1 Tecnologia Marini

Nel campo delle tecnologia di riciclaggio a caldo in sito di pavimentazioni flessibili, la Marini, in collaborazione con la Pavimental, ha sviluppato tecnologie innovative, che agli inizi degli anni '80, si sono concretizzate sui cantieri di manutenzione stradale, attraverso il treno di riciclaggio Marini ART 220 [3].

Relativamente al macchinario, preceduto dai mezzi di fresatura a freddo, non c'erano limitazioni sulla profondità dell'intervento, se non quelli derivanti dalla potenzialità delle frese (come accennato prima), visto che la rigenerazione del conglomerato bituminoso avveniva in un tamburo con una produttività di 120 tonn/h.

L'ART 220 è composto da:

- un trattore semovente attrezzato per raccogliere il materiale fresato da terra, e trasferirlo al rimorchio. Sul trattore sono anche installati il deposito del bitume modificato e la caldaia oleotermica per il riscaldamento del legante e dei relativi circuiti;
- un rimorchio attrezzato con:
 - dosatore ponderale in continuo, del materiale fresato;
 - dosatore ponderale in continuo del bitume modificato;
 - tamburo riscaldatore-mescolatore, utilizzato per surriscaldare il materiale fresato, fino alla temperatura ottimale per la miscelazione con il nuovo

legante;

- un gruppo elettrogeno per l'alimentazione elettrica generale.

Il processo di riciclaggio ha inizio con una fresa a freddo, che scarifica la pavimentazione. Successivamente il materiale fresato insieme agli inerti per la correzione granulometrica, precedentemente disposti sulla pavimentazione mediante uno spandigraniglia, entrano nel drum mixer, tamburo essiccatore-mescolatore, precedentemente visto negli impianti fissi di tipo continuo. Nel tamburo il materiale fresato si unisce al bitume nuovo, miscelandosi per un tempo complessivo di circa sei minuti; alla fine di questa fase il conglomerato prodotto, ad una temperatura di circa 135°C, viene steso sulla pavimentazione e successivamente rullato [9], [3].

5.3.2 Tecnologia Martec

Il treno AR 2000 Martec è nato all'inizio degli anni '90, per la realizzazione di interventi superficiali di riciclaggio di pavimentazioni in conglomerato di bitume non modificato, previa fresatura a caldo.

Nella sua configurazione complessiva il treno Martec si compone di quattro unità:

- due Preriscaldatori;
- un Preriscaldatore/Fresa;
- un Preriscaldatore/Essiccatore/Mescolatore.

Nell'ambito delle tecnologie di riciclaggio in sito a caldo, quella della Martec si è dimostrata la più compatibile, oltre che la più efficiente, per interventi superficiali, grazie ad un preriscaldamento della pavimentazione, con l'utilizzo di aria forzata riciclata, preventivamente riscaldata a 700°C con gasolio, e non propano o altri gas; ciò implicava una maggior sicurezza sul lavoro, e allo stesso tempo un minor impatto ambientale, grazie all'eliminazione di emissioni nocive.

La tecnologia di riscaldamento brevettata, comune a tutti i macchinari componenti il treno, combina aria calda forzata ad alta velocità, con basso calore da infrarossi, e garantisce un'efficace penetrazione del calore stesso per evitare che gli aggregati si fratturino durante la fresatura.

Il sistema è composto da:

- un bruciatore diesel;
- un soffiatore a turbina dell'aria di combustione;
- un soffiatore per l'aria calda di circolazione;

- un plenum di riscaldamento in acciaio inossidabile.

Il bruciatore riscalda un notevole quantitativo d'aria all'interno della camera di combustione, in acciaio inossidabile, termosaldato; da qui l'aria calda viene forzata all'interno dei tubi di riscaldamento collocati nel plenum, anch'esso isolato termicamente.

Sul fondo dei tubi sono presenti migliaia di piccoli fori, attraverso i quali l'aria calda viene soffiata, ad alta velocità, sulla superficie stradale.

La maggior parte dell'ossigeno dell'aria fresca viene usata per la combustione, per cui l'aria calda usata per il riscaldamento ha un basso contenuto di ossigeno, e ciò evita l'ossidazione del legante bituminoso.

L'aria calda viene a questo punto aspirata dalla superficie stradale e soffiata all'interno della camera di combustione, per essere nuovamente riscaldata; durante questo processo il 10% dell'aria viene scaricato per far spazio ad aria fresca, necessaria alla combustione, e ciò viene garantito dal soffiatore a turbina.

Per regolare la posizione del plenum di riscaldamento, vengono usati quattro cilindri di sollevamento e due cilindri di inclinazione.

Il sistema di gestione della fiamma è completamente computerizzato, e combinato ad un sistema avanzato di controllo del combustibile, che garantisce così l'affidabilità della fase operativa stessa, per un funzionamento sicuro e continuo.

L'operatore può monitorare ed eventualmente regolare la temperatura dell'aria calda, dal posto di guida.

La combinazione tra combustibile diesel e sistema di riscaldamento ad aria calda, permette di realizzare consistenti economie, ambiti lavorativi molto più sicuri e più sani, nonché un risparmio energetico e di risorse naturali.

Il sistema di riscaldamento brevettato, comune a tutte le unità componenti il treno di riciclaggio, garantisce un'efficace penetrazione del calore, che prepara la pavimentazione per gli ulteriori trattamenti.

Il Preriscaldatore/Fresa, è stato progettato per scaldare e ammorbidire la pavimentazione stradale, e fresarla fino alla profondità stabilita. Sulla stessa unità è installato un sistema per aggiungere, direttamente sul materiale da fresare, additivi e rigeneranti, mediante controllo computerizzato.

La macchina comprende tre tamburi fresanti, ed i suoi componenti sono assemblati e saldati su una struttura rigida e robusta. I due tamburi laterali anteriori e quello centrale posteriore, possono essere facilmente regolati, per ottenere larghezze di fresatura

differenti. I rulli della fresa sono dotati di un meccanismo idraulico flessibile, per controllarne i movimenti.

La profondità è regolata con precisione grazie ad un sistema automatico di controllo. L'ultima parte del treno di riciclaggio è costituita dal Preriscaldatore/Essiccatore/Miscelatore.

Eventuale materiale vergine può essere aggiunto per soddisfare le prescrizioni tecniche del prodotto finale.

L'umidità, sempre presente nella pavimentazioni deteriorate, viene così eliminata. La miscela viene successivamente sollevata da un nastro convogliatore e trasferita al miscelatore a doppio albero per il confezionamento finale prima della stesa e della compattazione, ed il prodotto che ne deriva è di qualità paragonabile ad un conglomerato confezionato a caldo in impianto fisso.

Il Preriscaldatore/Essiccatore/Miscelatore, è dotato di una tramoggia per gli inerti aggiuntivi, la cui quantità viene regolata da un dispositivo di misurazione controllato dall'operatore, in funzione del tipo di intervento e della sua formulazione di progetto.

Il materiale fresato viene movimentato da due sistemi di coclee: quelle anteriori miscelano e spandono il cumulo sotto il plenum di riscaldamento, mentre quelle posteriori predispongono la miscela riscaldata affinché sia raccolta dal nastro convogliatore per alimentare il gruppo miscelatore.

La velocità del nastro convogliatore può essere regolata per renderla compatibile con la velocità di avanzamento dei lavori.

Il mescolatore a doppio albero ha una capacità di 300 tonn/h e può miscelare perfettamente il materiale riciclato, nell'arco di tempo di 15/30 secondi [9].

5.3.3 Uso combinato delle due tecnologie

Le due tecnologie considerate sono nate per effettuare il riciclaggio di conglomerati di natura e qualità diverse da quelle relative ad una pavimentazione drenante con bitume modificato: la sua presenza sia come legante della miscela originale, sia come legante d'apporto, ha evidenziato i limiti delle tecnologie di base.

La tecnologia Martec, impiegata integralmente per riciclare pavimentazioni drenanti, era condizionata dal fatto che la temperatura della miscela scaricata nella finitrice non superava i 130°C, insufficienti sia per la lavorabilità che per il costipamento di un conglomerato con bitume modificato. Risultavano però evidenti l'efficienza ed elasticità del sistema di riscaldamento, soprattutto di una miscela ad alto contenuto di vuoti

intercomunicanti, come quella drenante. Pertanto si prefigurò ben presto l'impiego di parte del macchinario Martec, preriscaldatori e preriscaldatore/fresa davanti al treno Marini, limitatamente alle operazioni di fresatura a caldo; ciò non ha determinato interventi di adeguamento, ma solo una calibratura tra energia calorica emessa, velocità di avanzamento, distanza tra preriscaldatori, e tra il gruppo riscaldante ed il treno ART. Anche il treno Marini non fu inizialmente concepito per trattare conglomerati con bitume modificato, e ciò ha comportato doverosi aggiustamenti, specie nel tamburo, al fine di renderlo adatto a trattare il materiale fresato a caldo, caricato alla temperatura di 110-115°C.

L'ART 220, rispetto alla sua versione originale, ha riportato i seguenti cambiamenti:

- il tamburo è stato attrezzato con utensili che potessero rompere eventuali agglomerati di materiale;
- i tappeti dei nastri trasportatori, sono stati modificati, per evitare che aderissero al materiale fresato;
- il sistema di riscaldamento del legante e delle relative linee di trasporto, è stato potenziato, considerando la necessità di temperature più elevate, per la presenza di bitume modificato;
- la potenzialità del bruciatore del tamburo riscaldatore-mescolatore, è stata invece ridimensionata, in quanto il materiale viene alimentato preriscaldato (fresatura a caldo) e privo di umidità;
- la palettatura interna del tamburo è stata completamente modificata, per ottimizzare il rendimento di scambio termico, riducendo allo stesso tempo al minimo le emissioni di polveri e di sostanze organiche volatili.



Fig. 5.1: Tutti i macchinari in movimento

Fig. 5.2: Preriscaldamento e fresatura a caldo

Fig. 5.3: Sollevamento del Rap con l'Art 220



Fig. 5.4: Scarico della miscela calda

Fig. 5.5: Sollevamento della miscela calda sulla finitrice

Fig. 5.6: Tutti i macchinari a lavoro

L'uso combinato delle due tecnologie si articola nelle seguenti attività principali e considerazioni:

- sulla superficie dello strato di usura drenante da rigenerare, viene steso un sottile strato di aggregati vergini, secondo le indicazioni del fuso di progetto, per aumentare la capacità drenante della miscela originaria e controbilanciare l'aumento dei fini, inevitabilmente prodotto dalla fresatura;
- gli aggregati vergini hanno anche la funzione di scudo termico, proteggendo la superficie durante la fase di preriscaldamento ed impedendo così al vecchio bitume di danneggiarsi;
- i preriscaldatori riscaldano la superficie drenante originaria, ed avviene la fresatura a caldo mediante un apposito veicolo preriscaldatore/fresa. La temperatura del materiale fresato dovrà raggiungere in media di 110-115°C;
- con le modalità sopracitate, la fresatura non frantuma l'inerte, ma lo scalza, riducendo il più possibile la produzione di fini; ad una certa distanza dalla fresa segue il treno di riciclaggio vero e proprio, che esegue le seguenti operazioni:
 - carica il materiale fresato;
 - dosa in continuo e a peso il materiale fresato, valutandone la portata secca, introducendo preventivamente l'informazione relativa al contenuto di umidità;
 - surriscalda il materiale fresato fino alla temperatura più adatta alla miscelazione col nuovo bitume, modificato e additivato, riscaldato in cisterna;

- realizza la miscelazione del materiale fresato con il bitume, in ciclo continuo, scaricando il conglomerato rigenerato a terra, pronto per la successiva operazione da parte del caricatore della finitrice [9].

5.3.4 Conclusioni

I lavori di riciclaggio a caldo in situ sul manto drenante d'usura nel 2003, hanno messo in evidenza la validità e potenzialità delle scelte tecnologiche adottate, che hanno migliorato lo standard qualitativo della pavimentazione stessa: si ricorda ad esempio che la capacità drenante originaria della pavimentazione di 14 litri/minuto, fu innalzata a 18 litri/minuto.

La tecnologia combinata ha evidenziato più successi che anomalie, seppur su uno spessore ridotto di 4-5 cm. Le difficoltà principali si sono verificate a causa della presenza del modificante EVA, che rispetto ai polimeri più recenti, è senza dubbio molto più rigido.

Tuttavia ogni situazione è a sé stante, e va condotto uno studio specifico e puntuale, basato su analisi di laboratorio, in base a prelievi (carotaggi) effettuati sulla pavimentazione da risanare, e tenendo conto della variabilità di tutti i parametri in gioco, che possono influenzare il risultato finale.

Sulla base dell'esperienza maturata nel 2003, è stato necessario apportare modifiche e cambiamenti sia per la qualità della produzione che per la sicurezza degli operai: per i macchinari Martec una revisione completa, nonché alcune modifiche strutturali per la fresatura, mentre per l'ART miglioramenti sulle parti marginali e la regolazione della fiamma del bruciatore [9].

5.4 Tecnologia Hit

5.4.1 Cenno alla pavimentazione drenante in Italia

Gran parte della rete stradale Italiana, presenta uno strato d'usura tradizionale, che diversamente dalle pavimentazioni drenanti e fonoassorbenti di cui abbiamo parlato poco fa, hanno una percentuale di vuoti di gran lunga inferiore, tra il 4 e il 6%: questa tipologia di pavimentazione è comunemente detta "chiusa".

Abbiamo già visto come i treni Martec/Marini possano dare nuova vita alle vecchie pavimentazioni drenanti, con l'aggiunta di leganti, additivi, acqua, ed eventualmente inerti per la correzione granulometrica; tuttavia il fuso di progettazione della vecchia superficie, era pressoché simile a quello della futura pavimentazione, proprio perché

entrambe gli strati erano di tipo drenante.

Il “conglomerato bituminoso drenante fonoassorbente” è per definizione una miscela realizzata con pietrischi frantumanti e sabbie di granulometria appropriata, impastati a caldo con bitume modificato tipo hard e tale da produrre un conglomerato che messo in opera risulti “aperto”, ossia con vuoti intergranulari >16%.

L'utilizzazione di questa tipologia di pavimentazione per il manto di usura, ne migliora le caratteristiche di sicurezza in relazione alla circolazione veicolare, infatti in caso di pioggia:

- vi è un miglioramento dell'aderenza e dell'antisdruciolevolezza;
- la porosità del rivestimento evita il ristagno d'acqua, eliminando il rischio di acquaplaning;
- vi è un miglioramento della visibilità notturna dei veicoli grazie all'eliminazione dell'effetto di riflessione dei raggi luminosi sulla superficie bagnata;
- vi è un miglioramento della visibilità in caso di pioggia grazie alla eliminazione degli spruzzi e della nebbia d'acqua causati dal transito veicolare che può provocare vere barriere alla visibilità per i mezzi che seguono;
- la porosità inoltre favorisce l'abbattimento dei rumori generati dal rotolamento dei pneumatici.

La società Autostrade per l'Italia proprio per questi motivi ha incrementato la copertura di asfalto drenante antipioggia, portandola a fine 2009 all'81,6% della propria rete, rispetto al 16% del 1999.

Il programma di estensione è effettivamente ultimato: se consideriamo infatti le gallerie, le strade di montagna, dove il drenante non è adatto, o i tratti coperti con pavimentazioni ad alta aderenza, o quelli soggetti a lavori di ampliamento, l'intera rete autostradale è ricoperta da usura drenante.

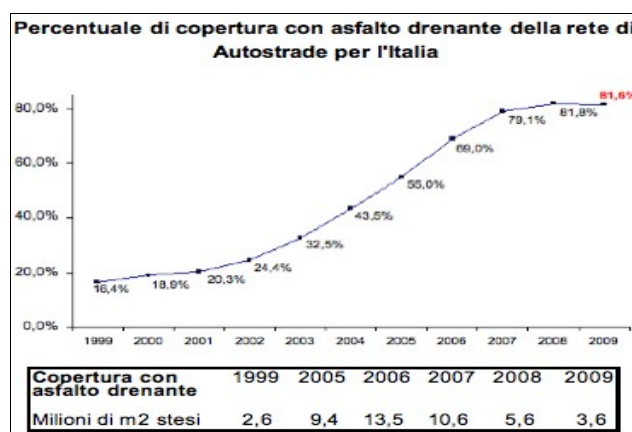


Fig. 5.7: Trend di incremento della copertura con asfalto drenante

5.4.2 Progettazione e produzione delle pavimentazioni stradali porose

La progettazione di questa tipologia di pavimentazione, necessita di alcuni accorgimenti particolari, soprattutto se paragonata a manti tradizionali chiusi, ossia:

- una particolare attenzione nella definizione della curva granulometrica, di tipo discontinuo, che farà sì che ci sia un'alta percentuale di vuoti nella pavimentazione finita: a tal fine si elimineranno completamente le frazioni intermedie e si ridurrà il tenore di quelle più fini;
- gli inerti devono essere di ottima qualità e derivanti esclusivamente da processi di frantumazione: i più utilizzati sono i basalti e i porfidi;
- il legante bituminoso dovrà avere eccellenti proprietà coesive ed adesive: lo scheletro litico infatti, è particolarmente debole a causa della notevole percentuale di vuoti, quindi con minori punti di contatto rispetto ad un conglomerato tradizionale, e dovrà essere proprio il legante quindi, a rafforzare questi legami, conferendo le adeguate proprietà meccaniche al conglomerato finale;
- la granulometria più fine ed il filler, vanno dosati con criterio, in quanto influenzano direttamente il comportamento reologico del legante, durante le varie fasi produttive.

Per quanto concerne la produzione, invece, ci si avvale dei macchinari tradizionalmente usati per le pavimentazioni di tipo chiuso.

I leganti bituminosi utilizzati devono essere particolarmente tenaci, come accennato prima, e possedere un'elevata viscosità allo stato fuso, mentre le temperature di impasto, stesa, e compattazione saranno più elevate rispetto alle tecniche tradizionali, ma non dovranno mai superare i 200°C, per evitare la loro degradazione; se poi durante la fase di confezionamento del conglomerato, si dovesse riscontrare un rivestimento non uniforme degli inerti, verranno allungati i tempi di mescolamento piuttosto che innalzare la temperatura di esercizio.

Il piano di posa dovrà poi avere un profilo trasversale con pendenza adeguate a convogliare le acqua ai lati della strada, e dovrà essere perfettamente impermeabile per evitare qualsiasi infiltrazione nella parte della pavimentazione sottostante, con conseguente danneggiamento della stessa.

Lo smaltimento delle acqua sarà pertanto possibile sfruttando sia la porosità della struttura, che la pendenza della strada.

L'impermeabilizzazione del piano di posa può ottenersi, ad esempio, spruzzando e

distribuendo sul piano stesso il legante bituminoso utilizzato per il confezionamento del conglomerato, per uno spessore uniforme di circa 1÷2 mm, che svolge anche la funzione di “mano di attacco”, garantendo il perfetto ancoraggio della pavimentazione agli strati di base.

I mezzi di trasporto inoltre sono la principale fonte di inquinamento acustico, ed il traffico stradale è la sorgente di rumore più diffusa nei paesi industrializzati; proprio per questo motivo sono stati imposti dei limiti di pressione sonora, per proteggere i cittadini dall'inquinamento acustico.

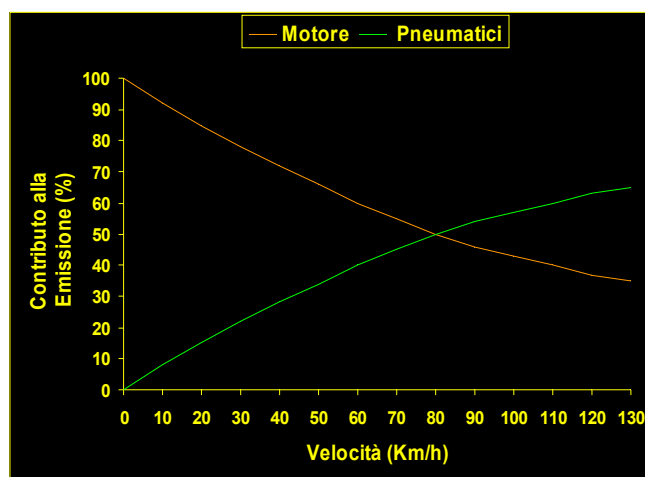


Fig. 5.8: Emissione sonora di motore e pneumatici in funzione della velocità del veicolo

Il veicolo in movimento, ad esempio, provoca rumore che può essere associato sia al funzionamento del motore, che all'interazione tra pneumatici e superficie stradale; se poi le velocità sono elevate, si creano flussi d'aria attorno al corpo dell'autoveicolo, proporzionali alla velocità stessa, che contribuiscono ad aumentare il livello di rumore totale.

Alle basse velocità invece, il motore è la sorgente più importante di rumore, come ad esempio nelle condizioni di traffico urbano; man mano che la velocità aumenta, il rumore provocato dal contatto pneumatici-strada prende il sopravvento, come invece accade nel traffico autostradale.

5.4.3 Descrizione della tecnologia Hit

Nel caso che stiamo trattando, abbiamo a disposizione una pavimentazione di tipo chiuso, il cui fuso granulometrico è ben diverso da quello che vogliamo ottenere in fase finale (molto più discontinuo), per cui si pongono delle nuove problematiche rispetto ai treni di riciclaggio precedentemente visti: separare la granulometria del conglomerato

fresato, e integrarlo per soddisfare le specifiche tecniche richieste dal capitolato.

Si parla quindi di un processo per il riciclaggio in sito dello strato chiuso tradizionale, in uno nuovo drenante.

Lo studio di questa nuova tecnologia di riciclaggio, è stata portata a termine dalla giapponese Hitachi Construction Machinery e Green Asphalt Machinery, e presenta molte similarità col processo di riciclaggio dell'usura drenante visto prima.

Anch'esso è infatti basato sulla tecnica di irradiazione di aria calda sulla superficie, con temperature comprese tra 400÷600°C, evitando così la fresatura a freddo che inevitabilmente produrrebbe molto aggregato fine, assolutamente sconsigliato per il fuso granulometrico richiesto.

Una successione di macchinari, ognuno con una specifica funzione, si susseguono a formare un treno, che opera direttamente in sito; i vantaggi di questa tecnologia (come la maggior parte delle tecnologie di riciclaggio in sito) sono molteplici:

- diminuzione del tempo di confezionamento e posa;
- riduzione dell'uso di nuovo materiali;
- diminuzione dei costi di trasporto del materiale fresato dai silos di deposito all'impianto, e dall'impianto fisso al cantiere di produzione;
- conseguente diminuzione dei consumi energetici legata ai minori trasporti di materiali;
- riduzione delle emissioni cancerogene nell'ambiente;
- riapertura più veloce dei tratti stradali interessati dalla rigenerazione.

I vantaggi sopra descritti fanno sì che la nuova tecnologia, denominata HIT (Hot In place Transforming), produca benefici non solo economici, ma anche ambientali: basti pensare che rispetto ad una tecnologia tradizionale in impianto, il consumo di energia si riduce del 34%, mentre in numero di camion impiegati del ben 72% [56].

La tipologia di pavimentazione ottenuta, è composta da due strati: uno poroso e permeabile nella parte superficiale, ed uno formato dal materiale recuperato dalla vecchia pavimentazione, nella parte inferiore.

Il processo di riciclaggio si avvale dei seguenti macchinari:

- preriscaldatore;
- riscaldatore;
- separatore;
- mixer paver.

La tecnologia HIT ha inizio con il riscaldamento della pavimentazione mediante *preriscaldatore*: come nel treno AR 2000, viene soffiata aria calda ad alta velocità, mediante un piano metallico su cui sono presenti un notevole numero di fori, attraverso i quali passa per riscaldare ed ammorbidire la pavimentazione; l'aria calda così soffiata, viene successivamente recuperata e riutilizzata grazie ad un complesso sistema di ricircolo, minimizzando le perdite, e riducendo il consumo energetico del macchinario. Il preriscaldatore è alimentato a gasolio, non propano o altri gas, limitando la contaminazione ambientale e riducendo i rischi per gli operai addetti ai lavori [56].

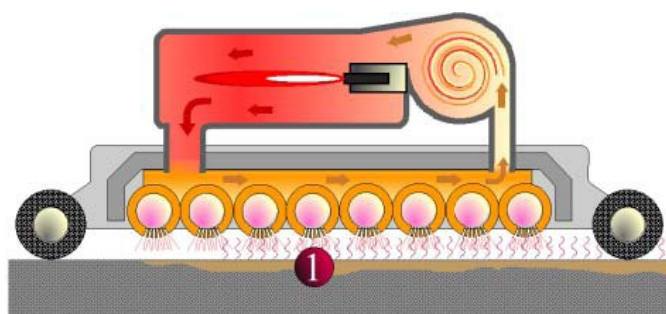


Fig. 5.9: Preriscaldatore

1) La pavimentazione si riscalda e si ammorbidisce

Segue un *riscaldatore-fresatrice*; la pavimentazione precedentemente riscaldata, è pronta per essere fresata dal macchinario successivo, con particolare attenzione a non rompere gli inerti più grandi, che rappresentano la granulometria più importante in uno strato drenante.

Nella parte anteriore del macchinario è presente un nastro trasportatore, per convogliare il giusto quantitativo di aggregati vergini, che verrà aggiunto insieme al fresato, per essere trattato nel passo successivo.

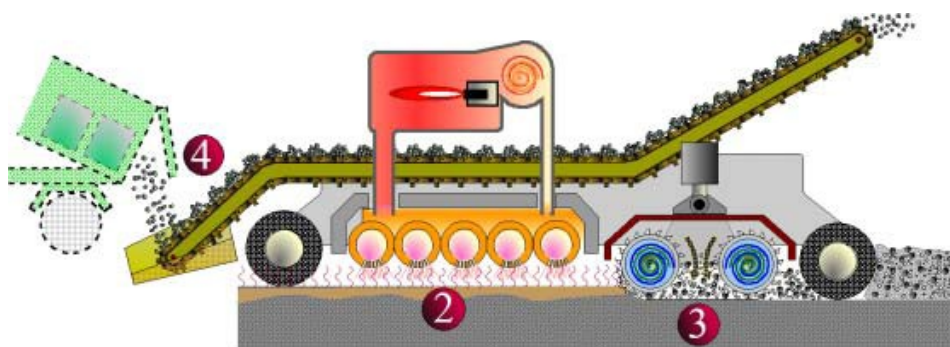


Fig. 5.10: Riscaldatore-Fresatrice

2) La pavimentazione si riscalda e si ammorbidisce

3) Fresatura del conglomerato esistente

4) Apporto della nuova miscela di aggregati

Segue poi un *separator*, forse la parte più importante del treno, che rappresenta il punto chiave di questa nuova tecnologia. Il vecchio conglomerato viene classificato (vagliato) secondo una predeterminata granulometria e spostato per un successivo passaggio. Una serie di vagli riscaldati seleziona le frazioni fini e quelle di dimensione non idonee, che formeranno lo strato più inferiore, rigettandole direttamente sulla superficie fresata, e separandole così dal materiale che andrà invece a costituire lo strato superiore drenante: a quest'ultimo verranno aggiunti inerti vergini di apporto per la correzione della curva granulometrica di progetto, tipicamente discontinua per garantire un'alta percentuale di vuoti, e nuovo bitume: il tutto verrà miscelato per la successiva fase di stesa [56].

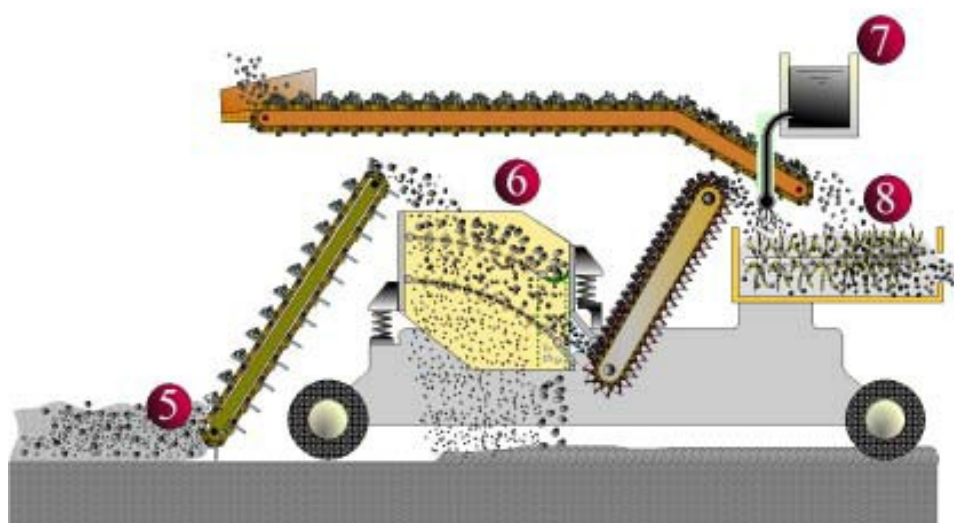


Fig. 5.11: Separatore

- 5) Raccolta del materiale fresato dalla superficie della pavimentazione
- 6) Classificazione granulometrica del materiale riciclato
- 7) Serbatoio del bitume nuovo e/o agenti ringiovananti
- 8) Miscelatore del materiale di recupero selezionato per lo strato superficiale, con gli aggregati vergini di apporto, il bitume e gli agenti ringiovananti

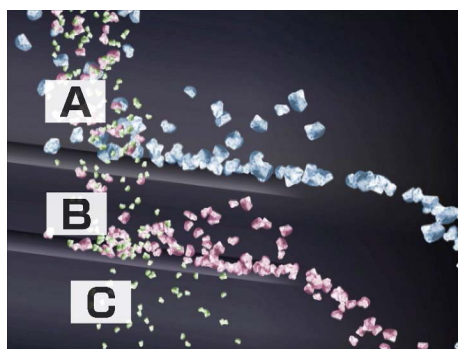


Fig. 5.12: Particolare della fase di vagliatura

Il treno termina con il *mixer paver*, che raccoglie il materiale dalla pavimentazione, destinato allo strato inferiore, e proveniente dallo scarto della vagliatura degli inerti dello strato superiore drenante, e lo miscela con il bitume nuovo di apporto.

Si è giunti ora alla fase finale, dove viene preventivamente stesa la miscela per lo strato inferiore, e successivamente quella per lo strato superiore drenante; il tutto viene compattato con un rullo vibrante meccanico.

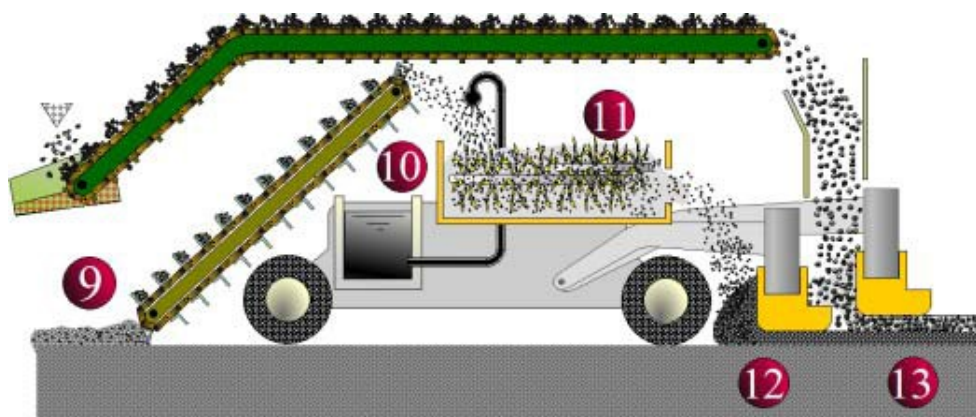


Fig. 5.13: Mixer-Paver

- 9) Raccolta del materiale fresato per lo strato inferiore
- 10) Serbatoio del bitume nuovo e/o agenti ringiovanenti
- 11) Miscelatore del materiale di recupero selezionato per lo strato inferiore, con il bitume e gli agenti ringiovanenti
- 12) Stesa della miscela riciclata per lo strato inferiore
- 13) Stesa della miscela riciclata per lo strato superiore

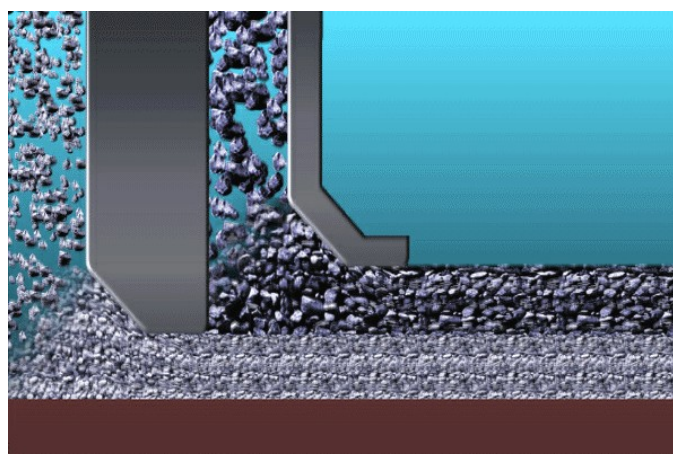


Fig. 5.14: Particolare della fase di stesa

Questo tipo di tecnica è meno adatto nei mesi invernali, o comunque particolarmente rigidi, che limitano l'effetto di preriscaldamento della pavimentazione; per ovviare a questo inconveniente basta però aggiungere un preriscaldatore aggiuntivo, per

amplificare il risultato finale.



Fig. 5.15 - 5.16: Aspetto dello strato superficiale, prima e dopo il trattamento

CAPITOLO 6 - RICICLAGGIO A FREDDO, IN SITU

6.1 Vantaggi e svantaggi della tecnica

Abbiamo già visto quali siano i notevoli vantaggi del riciclaggio in generale, e del riciclaggio a freddo in particolare; tuttavia quest'ultima tipologia, sviluppata in situ, rappresenta la tecnologia che favorisce il maggior vantaggio economico ed ambientale in assoluto, garantendo anche l'affidabilità tecnica del risultato finale, e che per tali motivi risulta sempre più diffusa.

Sintetizzando quali siano i vantaggi del riciclaggio a freddo in situ, potremmo citare:

Vantaggi ambientali: il materiale recuperato dalla pavimentazione preesistente, si aggira attorno al 100%, con conseguente azzeramento di aree destinate a discarica e minimo apporto possibile di materiali vergini. Sono limitate al massimo le aperture di nuove cave, favorendo la stessa salvaguardia ambientale; le emissioni nocive prodotte dal riscaldamento del bitume, sono quasi totalmente annullate, in quanto non vi sono operazioni di preriscaldamento della pavimentazione da fresare. Inoltre vi è anche un notevole risparmio energetico, grazie alla riduzione delle operazioni di trasporto.

Buone caratteristiche prestazionali dello strato riciclato: le modalità di realizzazione ed il controllo delle varie fasi di miscelazione, nonché della stessa e della posa in opera del materiale riciclato, ne garantiscono prestazioni elevate.

Tempi brevi di costruzione: i moderni treni di riciclaggio, hanno una produttività elevata, riducendo notevolmente i tempi di costruzione della pavimentazione rispetto a quelli tradizionali, e di conseguenza minimizzando tutti i fastidi che derivano dalla presenza di un cantiere, soprattutto in termini di circolazione.

Sicurezza della circolazione: grazie alla collocazione in una sola corsia stradale del treno di riciclaggio, le fasi esecutive risultano più agevoli e sicure [17].

Il riciclaggio a freddo viene realizzato in situ mediante l'utilizzo, anche in questo caso, di apposite apparecchiature, che permettono la miscelazione in continuo del fresato/materiale in situ, con emulsione bituminosa o bitume schiumato, sostanze stabilizzanti cementizie (calce, cemento, e sostanze simili, considerando però che la più utilizzata è proprio il cemento), acqua e aggregati vergini di integrazione per la correzione del fuso granulometrico, in caso di necessità.

Le possibili miscele utilizzate sono rappresentate dalle seguenti combinazioni: emulsione e cemento, bitume schiumato e cemento, solo emulsione, solo bitume schiumato o solo cemento.

Tuttavia le modalità di riciclaggio a freddo principalmente utilizzate, in relazione alla

manutenzione stradale, sono:

- con bitume schiumato e cemento;
- con emulsione bituminosa e cemento.

Macchinari appositamente progettati, fresano la vecchia pavimentazione.

Nel primo caso, come negli impianti fissi di riciclaggio a freddo, il bitume caldo, portato a $160^{\circ}\div 180^{\circ}$, viene messo a contatto con acqua a temperatura ambiente (2% circa), in una specifica camera di espansione; si genera così vapore, che causa un'immediato aumento di volume del legante, con formazione di schiuma di bitume, che ne incrementa la superficie specifica e conferisce maggior lavorabilità a contatto con inerti gli freddi e umidi; successivamente al materiale fresato viene incorporato il bitume espanso (che rappresenta il 3-5% della massa dell'inerte), cemento e acqua, e si effettua una miscelazione molto energica ed estremamente rapida, che tiene certamente conto del tempo di decadimento della schiuma di bitume; la miscela riciclata viene immediatamente posta in opera e compattata [18].

I vantaggi di questa tipologia di riciclaggio, con bitume schiumato, possono riassumersi in:

- ✓ minimo inquinamento atmosferico;
- ✓ possibilità di applicazione del legante con inerti freddi e umidi;
- ✓ ridotto contenuto ottimale di bitume;
- ✓ minor invecchiamento del legante, grazie alle minori temperature degli inerti con cui viene a contatto;
- ✓ minori problemi di compattazione e di umidità con la schiuma;
- ✓ posa in opera anche con condizioni climatiche non ottimali.

Di contro, gli svantaggi possono essere:

- ✓ scarsa esperienza sul confezionamento della miscela;
- ✓ l'aggiunta di antischiumanti durante il processo di raffinazione, ne impedisce l'utilizzo nell'eventuale fase di schiumatura; devono pertanto essere utilizzati bitumi idonei;
- ✓ necessità di disporre di bitume caldo, a circa 180° .

Nel secondo caso, invece, si additiva al fresato stradale, una miscela di bitume, acqua, emulsionanti (un'emulsione per l'appunto), che assicura coesione, stabilità e flessibilità al nuovo conglomerato.

Le emulsioni sono mediamente costituite dal 60% di bitume e dal 40% di acqua, e sono presenti nel conglomerato con una percentuale del 5% circa rispetto alla massa degli

inerti.

I vantaggi di questa seconda tipologia di riciclaggio, sono:

- ✓ facile reperibilità delle emulsioni;
- ✓ facilità di applicazione;
- ✓ possibilità di applicazione del legante con inerti freddi e umidi;
- ✓ ridotte fessurazioni (lo strato è molto flessibile e resistente a fatica);
- ✓ conglomerato resistente all'aggressione dell'umidità;

Gli svantaggi invece sono:

- ✓ trattamento più costoso rispetto all'utilizzo di bitume schiumato e cemento;
- ✓ formulazione dell'emulsione compatibile con il materiale riciclato, quindi con un opportuno tempo di rottura;
- ✓ trattamento problematico se in sito è presente un tasso elevato di umidità, con possibilità di rigonfiamento dello strato riciclato;
- ✓ temperatura di stesa $>10^{\circ}\text{C}$;
- ✓ necessità di una bassa umidità atmosferica.

La tecnica del riciclaggio a freddo esclusivamente con cemento, invece, presenta sicuramente una maggiore facilità di applicazione, è molto meno costosa rispetto all'emulsione o al bitume schiumato e in presenza di umidità migliora la resistenza del conglomerato; di contro la formazione delle fessure può rappresentare un problema, ed è inoltre richiesta una maturazione adeguata [18].

6.2 Categorie di riciclaggio a freddo

Il riciclaggio a freddo è classificabile secondo tre diverse tipologie:

- riciclaggio in profondità;
- riciclaggio superficiale;
- miglioramento di strade inghiaiate non asfaltate [18].

Riciclaggio in profondità

Il riciclaggio in profondità è la tecnica più utilizzata nel caso in cui si debba effettuare un intervento strutturale, ossia di consolidamento di pavimentazioni preesistenti e deteriorate, con strati sovrastanti sia spessi che sottili.

La profondità dell'intervento è generalmente superiore ai 15 cm.

Terminato il riciclaggio, è necessario stendere un nuovo manto, che nel caso di strade a traffico leggero sarà rappresentato da uno slurry seal o da un trattamento superficiale con emulsione bituminosa e graniglia, affinché vengano garantite le necessarie

caratteristiche di aderenza [18].

Nel caso invece di strade a traffico maggiore, sarà necessario anche realizzare una nuova base, oltre al manto superficiale.

Questa tipologia di riciclaggio, si colloca tra i progetti di risanamento delle pavimentazioni stradali; si rende pertanto necessaria un'analisi completa di informazioni, tra cui la vita utile della pavimentazione stessa, l'analisi del traffico, la valutazione della tipologia di dissesti presenti (ormae, fessurazioni,...) mediante strumenti d'indagine ad alto rendimento [17], [18].

Riciclaggio superficiale

Si ricorre a questo tipo di tecnica nei casi in cui la sottofondazione sia solida, tranne per alcuni punti deboli in corrispondenza della pavimentazione superficiale, ma in generale la portanza dell'intero pacchetto stradale non sia ancora compromessa; vengono così eliminate gravi fenditure degli strati, e contemporaneamente migliorata la transitabilità dei piani viabili.

Il riciclaggio superficiale si svolge a profondità variabili tra 8÷15 cm [17], [18].

Miglioramento di strade inghiaiate non asfaltate

È possibile migliorare le strade inghiaiate non asfaltate, mediante bitumatura, riciclando la ghiaia preesistente e addizionandola ad emulsione bituminosa o a bitume schiumato; si applica in fase finale un manto sottile, per esempio con l'impermeabilizzazione con emulsione modificata e graniglia o lo "slurry seal".

I vantaggi derivanti da questo tipo di riciclaggio, sono notevoli, seppur sia meno impegnativo dal punto di vista progettuale:

- i piani viabili sono conseguentemente privi di polvere con tempo asciutto;
- i piani stradali sono più sicuri e stabili in caso di tempo piovoso;
- viene assicurato un impiego più razionale delle risorse di materiale, in quanto la ghiaia non deve più essere regolarmente sostituita: le strade non asfaltate infatti perdono in genere 20÷30 mm di ghiaia all'anno, a causa dell'azione di usura del traffico e degli effetti provocati dalle condizioni atmosferiche; in questo modo la vita utile della ghiaia stessa sarà molto più lunga, e non ci sarà bisogno di sostituirla con della nuova [18].

Le profondità di questa tipologia di intervento, vanno dai 10 ai 15 cm. Tuttavia si possono riciclare le stesse strade inghiaiate prive di rivestimento, con l'utilizzo di cemento o calce: in questo caso però lo strato che sarà interessato dall'intervento, dovrà avere uno spessore maggiore, di circa 20 cm, per cui parleremo ancora una volta di

riciclaggio in profondità [17], [18].

6.3 Treno di riciclaggio: composizione e modalità esecutive

Un treno di riciclaggio è costituito da un insieme di macchine operatrici semoventi, che possono differenziarsi in base al tipo di macchinari utilizzati, in funzione delle modalità previste per l'intervento; per esempio nel caso di riciclaggio con bitume schiumato, sarà composto da:

- fresatrice-riciclatrice;
- mescolatrice (cisterna per l'acqua, dosatore e mescolatore, eventuali silos del cemento e spandimento);
- autocisterna contenente bitume a caldo;
- autocisterna per il rifornimento di acqua (di solito posta davanti alla riciclatrice);
- rullo vibrante per la compattazione [17].

Generalmente la cisterna d'acqua è presente quando si effettua il riciclaggio con bitume schiumato, e in tutti i casi in cui ci sia anche o solo la presenza di una sostanza stabilizzante cementizia: bitume schiumato e cemento/calce, emulsione bituminosa e cemento/calce, solo cemento [30]; tuttavia può anche essere presente in tutti quei casi che richiedano acqua di aggiunta per migliorare la lavorabilità della miscela.

La cisterna del bitume e dell'emulsione, sono specifiche invece del riciclaggio con sostanze stabilizzanti bituminose, con o senza cemento.

La prima macchina è generalmente una fresa, che lavora alla profondità prevista dall'intervento; il fresato viene quindi caricato dalla macchina che segue, impastato con emulsione o schiuma di bitume, acqua e additivi, per poi essere steso e compattato.

Nel corso degli anni si è poi passati dalle frese e dalle stabilizzatrici alle attuali riciclatrici specializzate: si parla in questo caso di sistema *single unit*, nel quale la miscelazione del nuovo conglomerato riciclato avviene nella stessa unità nella quale avviene la fresatura, che si differenzia dal sistema *multi train*, nel quale invece la fresatrice e la mescolatrice sono due unità distinte [38]. In particolare in quest'ultima tipologia, la pavimentazione viene prima demolita e successivamente accumulata sotto il treno di riciclaggio, sottoforma di cordolo continuo lungo l'asse stradale, che verrà raccolto dalla mescolatrice che segue: questa macchina è provvista nella parte anteriore di un nastro trasportatore, che permette di convogliare il materiale per una ulteriore frantumazione ed una successiva vagliatura, arrivando infine al mescolatore insieme al

legante e agli additivi [50].



Fig. 6.1: Riciclatrice

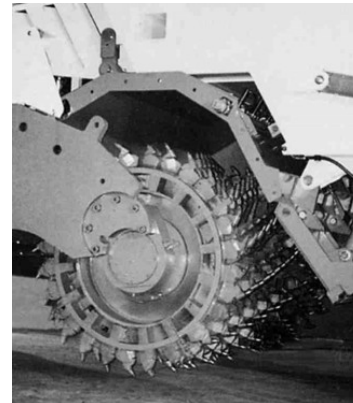


Fig. 6.2: Tamburo di fresatura

Le moderne riciclatrici sono progettate per il trattamento di uno strato notevole della pavimentazione, mediante un'unica passata, e pertanto sono macchine di grandi dimensioni, ma anche elevate prestazioni, che possono essere montate su cingoli o su pneumatici: si possono addirittura stabilizzare strati della profondità di 30 cm [17].

La parte più importante di queste macchine, è costituita da un tamburo di fresatura/miscelatura, dotato di un notevole numero di utensili da taglio in acciaio temprato, che ruotando fresano la pavimentazione stradale ammalorata: la rotazione avviene in senso antiorario rispetto alla direzione di trattamento della pavimentazione.

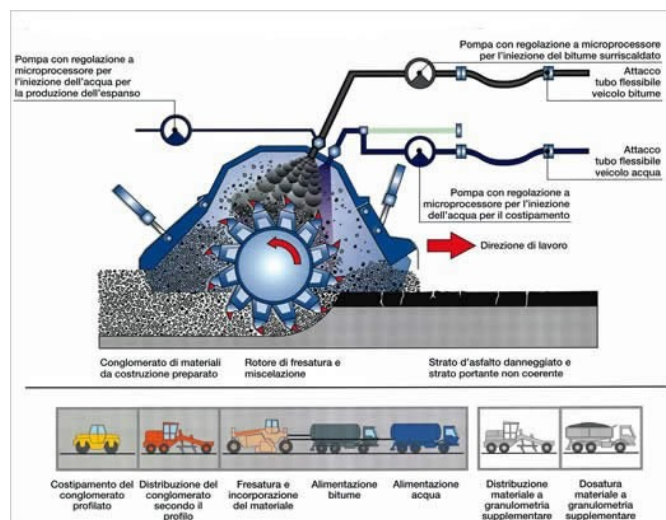


Fig. : 6.3: Riciclaggio a freddo con bitume schiumato: schema a treno

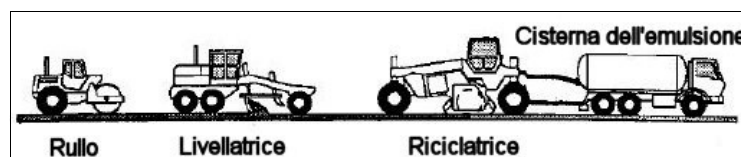


Fig. 6.4: Tipici treni di riciclaggio con emulsione bituminosa

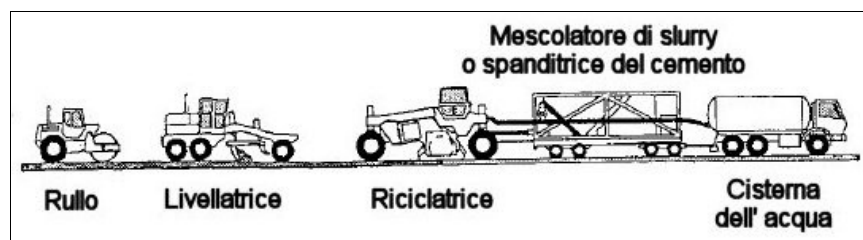


Fig. 6.5: Tipici treni di riciclaggio con cemento

Durante la fresatura, l'acqua contenuta in una cisterna collegata alla riciclatrice, viene dosata con precisione tramite un impianto di iniezione controllato da un microprocessore, spruzzata all'interno della camera di fresatura e attentamente miscelata al materiale di recupero, affinché esso raggiunga il grado di umidità ottimale per il successivo costipamento.

Le sostanze stabilizzanti fluide, come l'impasto di acqua e cemento (anche detto "slurry") e l'emulsione bituminosa, possono anch'essi essere introdotti, in modo analogo, nella camera di miscelatura; inoltre il bitume schiumato può essere iniettato nella stessa camera, mediante una separata barra spruzzatrice [50].

Ogni treno di riciclaggio può quindi essere diverso, a seconda dell'applicazione e del tipo di stabilizzante impiegato; tuttavia un aspetto comune è rappresentato dal fatto che la riciclatrice funga da locomotiva e spinga o tiri l'attrezzatura ad essa collegata attraverso barre di spinta o di traino [17].

Relativamente al riciclaggio con cemento ed emulsione, si ricorda che il cemento e l'acqua vengono miscelati insieme in quantità prestabilite, e la boiaccia così ottenuta viene trasferita mediante un tubo flessibile e iniettata contemporaneamente all'emulsione, nella camera di miscelatura della riciclatrice; l'emulsione viene collocata entro un'autobotte, posta anteriormente rispetto alla macchina riciclatrice stessa.

Il cemento, che può variare dal 2÷4% rispetto alla massa della miscela, può inoltre essere aggiunto al materiale riciclato in due modi diversi: o mescolato insieme all'acqua a formare un impasto che verrà poi introdotto nella camera di miscelazione, come visto in precedenza, o come legante sparso sopra la superficie stradale, davanti alla riciclatrice.

Dopo essere stato stabilizzato, il materiale viene fatto fuoriuscire dalla parte posteriore della riciclatrice; successivamente sarà soggetto ad una prima passata con un rullo vibrante ai fini del costipamento/compattazione, ad una successiva profilatura da parte di una moto livellatrice, e ad una finale costipazione con rullo statico o gommato.

Nel caso in cui sia necessario riciclare anche parte del pietrisco sottostante per aumentare lo spessore del manto bitumato totale, è conveniente sostituire l'emulsione bituminosa, con bitume schiumato, a causa della necessità di apportare una percentuale maggiore di legante [17], [50].

CAPITOLO 7 - TECNOLOGIE INNOVATIVE A TIEPIDO

7.1 Salvaguardia ambientale: dal protocollo di Kyoto alle innovative tecniche WMA

Il Protocollo di Kyoto sui cambiamenti climatici, redatto durante la conferenza delle nazioni Unite dell'11 Dicembre 1997, è un accordo internazionale che stabilisce precisi obiettivi per i tagli delle emissioni di gas responsabili dell'effetto serra e del riscaldamento del pianeta, da parte dei paesi industrializzati, stabilendo tempi e procedure per realizzare gli obiettivi del trattato: è previsto che tra il 2008 e il 2012 ci sarà una riduzione collettiva dell'8% delle emissioni inquinanti, da parte degli Stati Membri dell'Unione Europea, rispetto ai valori di riferimento del 1990: in particolar modo l'Italia si è proposta una riduzione del 6,5% [51], [49].

Anche la crisi petrolifera dei nostri tempi, ha conseguenze sulle tecniche tradizionali, basate su cospicui investimenti di energia termica, e anche per questo si ricercano processi mirati ad una drastica riduzione delle temperature operative.

Per raggiungere questi obiettivi, il protocollo ha suggerito l'istituzione o un rafforzamento di politiche nazionali che puntino alla riduzione delle emissioni dei gas serra, mediante l'adozione di tecnologie innovative, indirizzate non solo verso la riduzione dei consumi energetici, ma anche di risorse naturali non rinnovabili.

Tutto ciò si ripercuote in particolar modo sull'industria delle costruzioni stradali, che conseguentemente si rivolge a tecnologie che sfruttano una minor temperatura, quindi energia, con un risultante riscontro positivo in termini di maggior tutela ambientale; non si deve però dimenticare l'efficienza e le prestazioni che queste stesse pavimentazioni devono garantire, non inferiori a quelle ottenute con le tradizionali tecniche a caldo [58].

Una riduzione delle temperature operative di soli 10°C, permette ad esempio di dimezzare le emissioni di fumi, ottenendo, oltre alla salvaguardia ambientale, anche condizioni lavorative molto più sicure.

Le miscele a caldo si confezionano in impianti, fissi o mobili, come visto prima, raggiungendo temperature attorno ai 150-180°C, ma richiedono un notevole dispendio energetico, producendo oltretutto fumi di bitume, dannosi a livello ambientale.

Le miscele a freddo, al contrario, determinano bassissimi consumi energetici e scarse emissioni nocive nell'ambiente, grazie all'impiego del legante sotto forma di schiuma o di emulsione, che favorisce il ricoprimento degli aggregati senza un loro preventivo riscaldamento.

Viene dunque da chiedersi come mai, avendo a disposizione una tecnica così

vantaggiosa, ci si sia comunque orientati verso soluzioni a tiepido che riducano solo di poche decine di gradi la temperatura nelle varie fasi operative.

Nelle tecnologie a freddo, difatti, manca la verifica del “fattore tempo”, ossia dell’effettiva durata di queste miscele, che è di contro ampiamente conosciuta nel caso di conglomerati a caldo: proprio a causa di una forte esperienza consolidata nel tempo delle tecniche HMA, e per una sorta di conservatorismo tecnologico, le miscele a freddo tardano a farsi strada nel settore [49].

Un punto di criticità è rappresentato dal ricoprimento degli inerti: difatti nel caso dell’emulsione, ha inizio solo dopo la sua “rottura”, la quale può verificarsi dopo molto tempo, addirittura mesi, ed inoltre difficilmente può essere “completa”: spesso infatti le pezzature più grossolane non sono totalmente ricoperte.

Anche il processo di schiumatura, che presenta tutti i vantaggi del riciclaggio a freddo, risulta particolarmente efficace solo sulle frazioni fini, ed esclude alcune tipologie di bitume che si sono avvalse di antischiumanti durante il processo di raffinazione.

La soluzione al problema arriva con la “nascita” delle tecnologie a tiepido.

Con WMA (Warm Mix Asphalt, ossia Miscela Bituminosa Tiepida), definiamo il conglomerato bituminoso ottenuto, per l’appunto, da processi produttivi in cui le temperature operative risultano inferiori di decine di gradi rispetto a quelle usuali delle produzioni a caldo (HMA, Hot Mix Asphalt), ma che utilizzano la stessa tipologia di macchinari [58].



Fig. 7.1: Diverse temperature di trasporto nel caso di conglomerati HMA e WMA

Le tecniche WMA in quest’ottica, rappresentano i risultati di una lunga ricerca, volta a gestire le caratteristiche chimico-fisiche dei bitumi, ottenendo un legante che presenti

un'ottima lavorabilità durante la fase produttiva, ma che possa rapidamente assumere le caratteristiche meccaniche necessarie a sopportare gli sforzi dovuti al carico veicolare, a cui una pavimentazione stradale è sottoposta.

Seppur i risultati siano notevolmente soddisfacenti, l'ottimizzazione totale della nuova tecnica si avrà solo quando sarà possibile metterla in pratica in sito con l'utilizzo dei treni di riciclaggio, grazie ai quali sarà possibile un reimpiego totale del materiale fresato, e un abbattimento dei costi di trasporto [58], [49].

I vantaggi delle tecniche eco-sostenibili WMA sono quindi:

- risparmio energetico e conseguente riduzione del consumo di combustibile, risorsa non rinnovabile;
- riduzione delle emissioni dovute alla combustione di carburanti, di fumi e di odori sia in fase di produzione che in fase di stesa: la riduzione delle temperature influisce non solo sulla quantità di fumi, ma anche sulla loro qualità;
- miglioramento delle condizioni di lavoro per gli operatori del settore;
- riduzione dell'invecchiamento del bitume causato dalle alte temperature;
- minor usura dei mezzi utilizzati nell'ambito del processo produttivo, derivante dall'abbattimento delle temperature;
- riduzione dei tempi di attesa per la riapertura al traffico di tratti di pavimentazione appena messi in opera;
- ampliamento dell'intervallo stagionale di messa in opera (si può stendere anche in pieno inverno).
- possibilità di aumentare la distanza di trasporto, a parità di temperatura finale.

Un vantaggio altrettanto importante delle tecniche WMA, consiste nella produzione di miscele con una più alta percentuale di RAP, rispetto alle tecniche a caldo, che possiedono però lo stesso grado di lavorabilità; vedremo in seguito come ci si avvalga di additivi chimici, organici, o tecnologie schiumanti, che abbassino la viscosità del bitume e lo rendono lavorabile a temperature operative inferiori [24], [49]. Un altro aspetto importante, consiste nel fatto che le temperature di produzione più basse, compensano la maggior quantità di materiale di recupero utilizzato, quindi "invecchiato", rispetto ad un conglomerato con una minor quantità di RAP, prodotto con tecniche a caldo [59].

7.2 Descrizione delle tecniche WMA

Esistono diverse modalità per poter classificare le tecnologie WMA, ed una di queste

consiste nel valutare l'entità della diminuzione della temperatura, durante il processo produttivo.

La figura seguente mostra una classificazione, in base alle diverse temperature delle miscele bituminose, di tutte le tecniche attualmente presenti sul mercato; possiamo distinguere:

- miscele fredde (Cold Mix Asphalt); prodotte con aggregati non riscaldati ed emulsione bituminosa o bitume schiumato;
- miscele semi-tiepide (Half Warm Mix Asphalt); prodotte e miscelate con aggregati riscaldati, a temperature inferiori ai 100°C (212°F), ma superiori a quelle relative ai CMA;
- miscele tiepide (Warm Mix Asphalt); prodotte e miscelate a temperature superiori ai 100°C (212°F), ma inferiori a quella relativa agli HMA;
- miscele calde (Hot Mix Asphalt); prodotte e miscelate a temperature comprese tra i 140 e i 190°C. Le temperature di produzione degli HMA dipendono dal bitume utilizzato [24], [59].

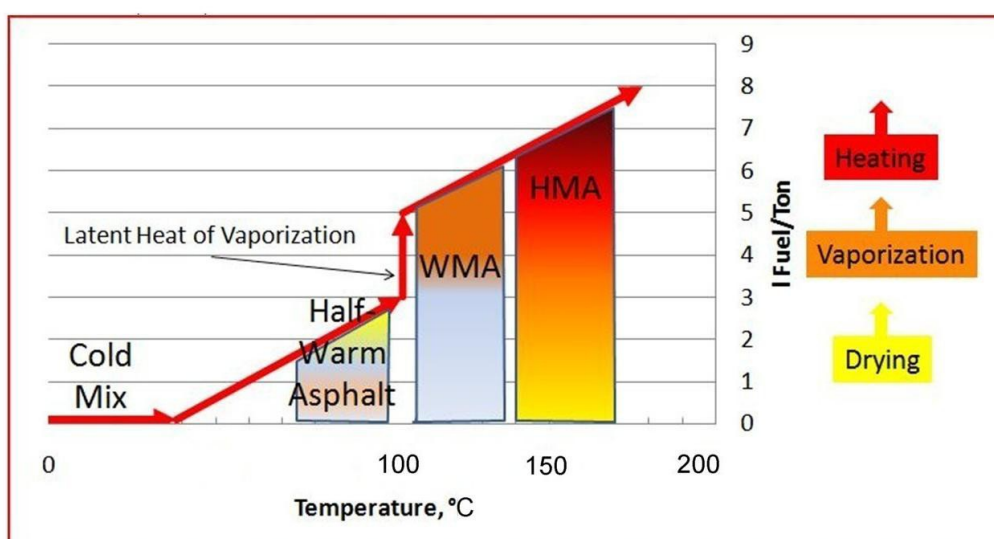


Fig. 7.2: Temperature operative per le diverse tecniche di riciclaggio

Un'altra modalità per classificare i conglomerati WMA e HWMA, si effettua sulla base della tecnologia utilizzata, attualmente presente sul mercato: ciò comporta una discussione più descrittiva dei vari processi.

Le tipologie più significative sono le seguenti:

- tecniche che prevedono l'aggiunta di additivi fluidificanti del bitume, che a loro volta possono distinguersi in:
 - organici (o cere);

➤ chimici;

- tecniche schiumanti, di una parte o della totalità del legante stesso;
- tecniche a base di emulsioni bituminose.

Il risultato comune che si ottiene è l'abbattimento della temperatura della miscela bituminosa, in fase produttiva, pervenendo alla viscosità ottimale di mescolazione anche con temperature più basse rispetto a quelle tradizionali [49].

Nel seguente elenco sono riportate le tecniche WMA più diffuse sul mercato, con brevi e concise descrizioni di ciascun processo. A seguire verranno descritte singolarmente e più dettagliatamente.

WMA process	Company	Description	Use Reported in	Additive	Production temperature [or reduction ranges]
Organic (wax) Additives-added to binder or mix					
Sasobit	Sasol	Fischer-Tropsch wax	Germany and 20 other countries worldwide	Yes, in Germany added on average at 2.5% by weight of binder; lower doses, 1.0-1.5%, used in U.S.	Varies, 20-30 C° (36-54 F°) drop from HMA. German guideline recommends 130-170 °C (266 to 338 °F), depending on binder stiffness
3E LT or Ecoflex (proprietary)	Colas	Water based Binder foaming + hydrophilic filler	France	Yes	Varies, 30-40 C° (54-72 F°) drop from HMA
Asphaltan-B (Montan wax)	Romonta	Proprietary	Germany	Yes, in Germany added on average at 2.5% by weight of binder	Varies, 20-30 C° (36-54 F°) drop from HMA. German guideline recommends 130-170 °C (266-338 °F), depending on binder stiffness
Licomont BS 100 (additive) or Sübit (binder) (fatty acid amides)	Clariant	Fatty acid amide	Switzerland	Yes, about 3% by weight of binder	Varies, 20-30 C° (36-54 F°) drop from HMA. German guideline recommends 130-170 °C (266-38 °F), depending on binder stiffness

Tab. 7.1: Tecnologie WMA con additivi organici

WMA process	Company	Description	Use Reported in	Additive	Production temperature [or reduction ranges]
Chemical					
Interlow T	Interchimica Srl	Surfactants	Italy	0,3-1,0 % of bitumen weight	120°C
Rediset WMX	Akzo Nobel	Cationic surfactants and organic additive	Netherlands U.S., Norway	1.5-2% of bitumen weight	≥30°C
REVIX	Mathy-Ergon	Surface-active agents, waxes, processing aids, polymers	Netherlands U.S.	Not specified	[15-26°C]
CECABASE RT	CECA Arkema group	Chemical package	U.S., France	0.2-0.4% by mixture weight	120°C
Evotherm ET	Mead-Westvaco	Chemical bitumen emulsion	U.S., France, worldwide	Delivered in form of bitumen emulsion	[50-75°C]
Evotherm DAT	Mead-Westvaco	Chemical package plus water	U.S., France, worldwide	30% by weight of binder	[45-55°C]
Evotherm 3G	Mead-Westvaco	Water free chemical package	U.S.	Not Specified	[33-45°C]

Tab. 7.2: Tecnologie WMA con additivi chimici

WMA process	Company	Description	Use Reported in	Additive	Production temperature [or reduction ranges]
Water related techniques (foaming and emulsions)					
Aspha-Min	Eurovia	Water containing Zeolite	U.S.; France, Germany	Yes, about 0.3% by total weight of mix	Varies, 20-30 C° (36-54 F°) drop from HMA. German guideline recommends 130-170 °C (266-338 °F), depending on binder stiffness
Advera	PQ Corporation	Water containing Zeolite	U.S.	0.25% by mixture weight	Varies, 20-30 C° (36-54 F°) drop from HMA. German guideline recommends 130-170 °C (266-338 °F), depending on binder stiffness
WAM-Foam	Shell and Kolo-Veidekke	Foaming process using two binder grades	U.S, Norway	Antistripping agents could be added to soften binder could be added to soften binder	110-120 °C (230-248 °F)
LEA, also EBE and EBT	LEACO	Water based Hot coarse aggregate mixed with wet sand	France, Spain, Italy, and U.S.	Yes, ±0.5% of bitumen weight of coating and adhesion additive	100 °C (212 °F)
LEAB	BAM	Water based Mixing of aggregates below water boiling point	Netherlands	Yes, added at 0.1% by weight of binder to stabilize foam, aid in coating, and promote adhesion	90 °C (194 °F)
LT Asphalt	Nynas	Water based Binder foaming + hydrophilic filler	Italy, Netherlands	Yes, added 0.5-1.0% of a hygroscopic filler	90 °C (194 °F)
Double-Barrel Green	Astec	Water based foaming process	U.S.	Not necessary; an antistripping agent may be added similar to normal HMA	116-135 °C (240-275 °F)
Aquablack WMA	MAXAM equipment	Water based foaming process	U.S.	Not necessary	Not specified
Warm Mix Asphalt System	Terex Roadbuilding	Water based foaming process	U.S.	Not necessary	[<32°C]
Ultrafoam GX	Gencor Industries	Water based foaming process	U.S.	Not necessary	Not specified
ECOMAC	Screg	cold mix warmed before laying	France	Yes (unknown type/quantity)	Placed at about 45 °C (113 °F)

Tab. 7.3: Tecnologie WMA correlate all'utilizzo di acqua: schiumatura ed emulsione

Generalmente per le tecniche WMA sono utilizzati gli stessi impianti, continui o discontinui, delle tecniche HMA; per l'adeguamento alle nuove tecnologie possono però essere necessarie alcune modifiche, come ad esempio una strumentazione supplementare, l'installazione di sistemi di schiumatura del bitume, un sistema di aggiunta degli additivi, la messa a punto del bruciatore dell'impianto per un funzionamento a temperature più basse.

Questi cambiamenti non sono, generalmente, necessari nel caso di additivi chimici o organici, in quanto possono essere addizionati al legante o direttamente nella camera di miscelazione, grazie alla loro consistenza molto fine, assimilabile a quella di un filler.

Tutte le tecnologie invece che prevedono la schiumatura del bitume, implicano necessariamente delle modifiche agli impianti, seppur di modesta entità; le case produttrici tuttavia offrono spesso dei kit per l'adeguamento, facili da installare, i cui costi sono di gran lunga inferiori rispetto ai vantaggi che queste tecniche offrono.

7.3 Additivazione con fluidificanti del bitume

7.3.1 Additivi organici

Gli additivi organici o le cere sono utilizzati per produrre miscele bituminose tiepide: queste sostanze favoriscono infatti una diminuzione della viscosità del legante, che si verifica al di sopra del loro punto di fusione, facilitando così una riduzione delle temperature operative (di miscelazione e stesa).

Il tipo di additivo deve essere scelto con cura per ridurre al minimo l'infragilimento dell'asfalto alle basse temperature, ed in modo che il suo punto di fusione sia superiore alle temperature di servizio previste (in caso contrario si potrebbero verificare deformazioni permanenti); inoltre, in base ad una ricerca condotta, i benefici e gli effetti negativi che hanno le cere sulle proprietà del bitume, dipendono soprattutto dalla loro struttura chimica: vengono valutate le tipologie con punti di fusione più elevati, come abbiamo già visto, e con una natura cristallina maggiormente fine (quindi con maggior capacità di mescolarsi con il bitume).

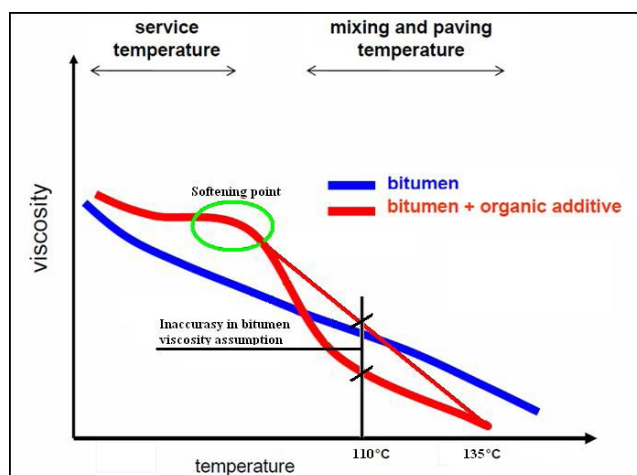


Fig. 7.3: Valutazione grafica della minor viscosità del bitume a 110°C

Gli additivi organici sono generalmente costituiti da una catena flessibile di atomi di carbonio, la cui lunghezza è legata al peso molecolare: essa viene spesso indicata con C_x , intendendo con C l'atomo di carbonio, e con il pedice x la lunghezza della catena principale; vengono però utilizzati solamente gli additivi che hanno dimensioni molecolari superiori a C_{45} e punto di fusione superiore a 70°C (158°F); catene più lunghe di carbonio infatti, portano a punti di fusione più alti.

Generalmente gli additivi organici consentono una riduzione delle temperature operative tra 20 e 30°C, migliorando anche la resistenza alla deformazione del legante così modificato: essi possono essere aggiunti o alla miscela o al bitume [24].

Le più importanti tipologie includono la cera Fischer-Tropsch (Sasobit), cera di lignite (Montan), ammidi di acidi grassi (Licomont BS 100), e miscele di cera di lignite e ammidi di acidi grassi (Asphaltan-B).

In Germania gli additivi organici sono generalmente aggiunti con un tasso del 2,5% del peso totale di legante, inclusa la parte contenuta nel materiale di recupero (RAP) che viene addizionato alla miscela.

7.3.1.1 Le paraffine F-T (Sasobit-Sasol Wax GmbH, Germany)

7.3.1.1.1 Breve storia delle paraffine F-T

La sigla F-T evoca il nome di Fischer e Tropsch, i due geniali chimici tedeschi del Kaiser Wilhelm Institute che, negli anni '20, misero a punto il processo industriale per la liquefazione del carbone, materia prima di cui la Germania era ricca, rendendolo così utilizzabile come carburante liquido.

Il carbone veniva surriscaldato con vapore acqueo a temperatura altissima, al fine di ottenere una miscela di ossido di carbonio e idrogeno (CO , H_2); il composto ottenuto

veniva poi trattato con catalizzatori di basso costo (ferro e cobalto invece della spugna di platino) e trasformato in idrocarburi: l'ultimo passaggio del processo era la raffinazione, che permetteva di ottenere prodotti simili alla benzina o al gasolio.

È la leggendaria “benzina sintetica” con cui funzionarono i mezzi aerei, navali e terrestri del Terzo Reich, la cui scoperta fu proprio incentivata da Hitler che, salito al potere nel 1933, diede un energico impulso alla chimica tedesca dell'epoca: ciò venne fatto per rendere il più possibile autonoma la Germania dalla necessità di importazione di materie prime strategiche, sia per ragioni economiche, sia in vista della guerra che si apprestava a preparare [45]. Con la sconfitta della guerra però gli Alleati imposero alla Germania la cessazione della produzione di benzina sintetica, e di ogni attività secondaria che la riguardasse, smantellarono tutti gli stabilimenti e si impadronirono dei brevetti e di ogni documento tecnico potessero reperire: migliaia di scienziati tedeschi furono arrestati e condotti a lavorare negli Stati Uniti. Seppur la storia della benzina sintetica sembrava volgere al termine, la sua produzione fu ripresa molti anni dopo in Sud Africa, dove gli impianti, della compagnia Sasol, per alcuni decenni hanno prodotto la maggior parte del fabbisogno di prodotti petroliferi [45].

7.3.1.1.2 Descrizione

Le paraffine sono sostanze organiche solubili nel bitume: esse esplicano la loro azione attraverso il meccanismo reversibile del cambiamento di stato fisico (fusione-cristallizzazione), ottenendo due importanti vantaggi:

- alle temperature superiori a quella di fusione (80°C) riducono la viscosità del legante, favorendone la lavorabilità;
- al di sotto della temperatura di fusione (80°C), conferiscono rigidità al conglomerato.

Apparentemente può sembrare un controsenso aggiungere paraffine al bitume per variarne la viscosità, in quanto la normativa a riguardo ne prevede contenutisticamente (in molti paesi) un limite percentuale, in genere intorno al 2%, 2.5% (CNR B.U. 66/78).

L'additivo Sasobit in particolare, è una miscela di idrocarburi a catena lunga, ed è un prodotto secondario del processo Fisher-Tropsch, il cui obiettivo principale consiste nella produzione di idrocarburi liquidi per sintesi di carbone o gas naturale: è anche conosciuto come cera paraffinica F-T, dall'omonimo processo produttivo [55].

Queste paraffine presentano il vantaggio sì di ridurre la viscosità del legante, ma di farlo solamente a temperature maggiori di quelle di utilizzo, conferendo invece fluidità a

quelle di confezionamento e di stesa: ne deriva generalmente una diminuzione delle temperature di lavorazione del conglomerato, ossia di miscelazione con gli inerti, di alcune decine di gradi rispetto alle tecniche tradizionali.



Fig. 7.4: Granuli di cera



Fig. 7.5: Additivo Sasobit

Le paraffine sintetiche F-T, tra gli additivi fluidificanti più promettenti sul mercato, contengono idrocarburi alifatici con catene molecolari più lunghe delle paraffine da petrolio (cere microcristalline), composte indicativamente da 40÷100 atomi di carbonio, hanno alto peso molecolare (circa 1600 g/mol), sono solubili nel bitume, e si formano in particolari impianti per la produzione di carburanti e combustibili liquidi, durante la fase di gassificazione del carbone; il loro punto di fusione è compreso tra 70 e 120°C; esse quindi mantengono la loro consistenza fino a circa 100°C per poi fondere, con il risultato di ridurre la viscosità del bitume proprio nel campo delle temperature di applicazione e non di uso (se aggiungessimo invece cere paraffine del bitume, ci sarebbero molti problemi di perdita di consistenza del legante stesso anche alle medie temperature, perché diminuirebbe il punto di rammollimento).

La paraffina sintetica F-T a temperature inferiori a quelle di fusione, forma una struttura simile al lattice, caratterizzata da un valore di penetrazione molto basso (≤ 1 dmm a 25°C), che favorisce un miglioramento della resistenza alle deformazioni permanenti e all'ormaiamento (accentuato anche dalla maggior temperatura di rammollimento raggiunta), grazie all'aumento di viscosità conferito e alla diminuzione di penetrazione stessa; rimane invece quasi invariato il punto di rottura Fraas, per contributi di additivo inferiori al 4%.

Mediamente viene utilizzata una quantità di paraffina tra lo 0,8 e il 3% sul peso del bitume, ma non bisogna mai superare il 4% per evitare effetti negativi sulla suscettività a temperature elevate; essa viene preferibilmente aggiunta come modificante del bitume, per ottenere una maggior omogeneità della miscela, ma può anche avvenire in fase di confezionamento del conglomerato [35].



Fig. 7.6: Aggiunta dell'additivo Sasobit nel ciclo produttivo

Le paraffine F-T si configurano quindi più come modificanti che come additivi.

Inoltre le importanti caratteristiche possedute di riduzione della viscosità, con conseguente diminuzione delle temperature operative, nonché gli effetti di lubrificazione interna che ne derivano, permettono una miscelazione molto più facile con eventuale materiale di recupero (RAP), che può aumentare fino al 35-45% e a volte anche di più: anche con alte percentuali di RAP infatti si può ottenere un composto denso con temperature più basse della pavimentazione, riducendo anche eventuali problemi di resistenza a compattazione della miscela riciclata.

Naturalmente la quantità di additivo aggiunta in questo caso, varia in funzione della quantità di RAP utilizzato, secondo una formula ben precisa [35].

7.3.1.2 Tecnologia 3E (Colas, France)

Le miscele 3E sono una gamma di conglomerati ecologici, ad alta efficienza energetica, che hanno gli stessi campi d'impiego dei conglomerati tradizionali della stessa categoria, indipendentemente dal livello di traffico; esse sono prodotte ed applicate a temperature più basse di 40÷45°C rispetto alle miscele tradizionali.

Il nome “**3E**” deriva dalle prime iniziali degli aggettivi che, per l'appunto, competono a queste miscele, ossia:

- **Environmentally-friendly** (eco-compatibili);
- **Economical-saving** (risparmio economico);
- **Energy-saving** (risparmio energetico).

Le minori temperature di produzione, oltre a favorire una considerevole diminuzione di consumo di carburante, permettono una riduzione del 15÷25% di emissioni nocive di gas che provocano l'effetto serra, ma anche meno fumi durante la fase applicativa, con maggior sicurezza per i lavoratori e i residenti nei posti adiacenti: tutto ciò senza compromettere la lavorabilità e le proprietà della miscela stessa, anzi talvolta

migliorandole.

Le miscele 3E sono fondamentalmente di tre tipi:

- 3E LT: miscelazione di aggregati riscaldati con un bitume speciale, additivato;
- 3E DM: miscelazione di aggregati riscaldati prima con bitume soft, poi con bitume hard, espanso;
- 3E DB; miscelazione di aggregati riscaldati prima con bitume soft, poi con bitume hard.

La temperatura di produzione della miscela 3E LT è di 125°C, mentre la T di compattazione va dagli 80 ai 110°C.

Un'ultima tipologia che si avvale di moderne tecnologie di riciclaggio, per incorporare materiale di recupero nella pavimentazione, è la 3E+R, sperimentata nel 2009 su un tratto di 1,2 Km della A75, in Francia, e ancora in fase di esecuzione su un secondo tratto di ben 9,5 Km, che si concluderà presumibilmente nel 2011 [37].

7.3.1.3 Ecoflex (Screg, France)

La tecnologia Ecoflex, sviluppata da Screg (gruppo Colas), è prodotta alla temperatura di 130°C ed applicata a 110-120°C. Il processo produttivo è simile a quello standard dei conglomerati HMA: gli aggregati, precedentemente riscaldati, sono miscelati con un legante a bassa temperatura. Questo legante bituminoso brevettato, costituito da bitume puro, denominato LT e realizzato in impianto, non in loco, è spruzzato con additivi pronti per l'uso.

Con Ecoflex si riesce ad ottenere una riduzione dei gas che provocano l'effetto serra fino al 60% ed un risparmio energetico fino al 40%; inoltre l'abbassamento della temperatura di produzione e applicazione della miscela, accompagnato da una riduzione dei fumi e del calore, migliorano il comfort e la sicurezza sia dei lavoratori che dei residenti.

È possibile utilizzare materiale di recupero, da un minimo del 20% ad addirittura il 100%. La tecnologia è inoltre adatta a tutti i tipi di traffico, anche il più intenso.

7.3.1.4 La cera Montan (Asphaltan B-Romonta GmbH, Germany)

L'acido montanico è l'acido grasso saturo C₂₈: esso è il costituente principale della cera montana, una vera e propria cera minerale (costituita essenzialmente da esteri), dura e di colore bruno-scuro se greggia, di colore chiaro-giallastro se raffinata, con aspetto quasi cristallino; può contenere anche qualche paraffina.

La cera Montan è indicativamente composta dal 53% di esteri cerosi (di acidi da C₂₂ a C₃₂), dal 17% di acidi liberi, dall'1-2% di alcoli liberi, dal 3-6% di chetoni (Cerotone e Montanone), dal 20-23% di resine e da circa il 3% di sostanze alifatiche. Il suo punto di fusione è di 82-95°C (180-200°F) [49].

Conosciuta anche come *cera di lignite* o *cera OP*, la cera Montan si ottiene tramite estrazione a caldo con solventi misti, da certi tipi di lignite (bituminose); è detta anche Brown Coal, carbone marrone, ed è un carbone molto giovane, i cui depositi sono concentrati in aree geografiche come la Germania, la Cina o alcune aree degli Usa; questi depositi si sono formati nel corso di tempi geologici, dalla fossilizzazione di materiale organico di origine vegetale, che a differenza del carbone non si è completata e non si completerà mai.

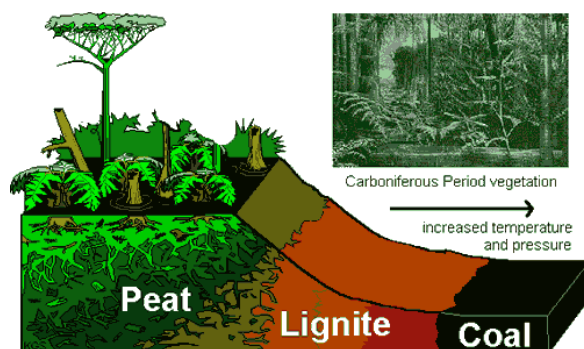


Fig. 7.7: Processo Torba → Lignite → Carbone, all'aumentare di temperatura a pressione

Asphaltan B si ottiene miscelando componenti della cera di lignite e idrocarburi a più alto peso molecolare, come le ammidi degli acidi grassi.

L'additivo può essere aggiunto nell'impianto di miscelazione o nella fase di produzione del legante, in percentuali che vanno dal 2 al 4%, ottenendo gli stessi effetti sul conglomerato delle cere F-T: permette di ridurre la temperatura di produzione di 20-30°C, modificando la viscosità del bitume, acquista rigidità col raffreddamento, migliora l'adesione tra legante e aggregati grazie alla resistenza all'umidità delle miscele che ne derivano, e sotto la temperatura di fusione presenta un'ottima resistenza al calore [55].

7.3.1.5 Amidi di acidi grassi (Licomont BS 100-Clariant, Switzerland)

Gli amidi di acidi grassi si ottengono facendo reagire le ammine con gli acidi grassi. Questi additivi sono stati molto usati per manti di asfalto dalla fine degli anni '70-inizi degli anni '80.

In particolare Licomont BS 100 è un additivo a basso peso molecolare, costituito da derivati di acidi grassi, che può aumentare considerevolmente la vita utile di una pavimentazione, in particolare in ambienti ad alte temperature; si presenta come polvere o in forma granulare.

Il loro punto di fusione è generalmente compreso tra 141 e 146°C (286-295°F): aggiungendone indicativamente il 3% in peso sul legante, hanno il vantaggio principale di diminuire la viscosità del bitume, riuscendo ad ottenere una diminuzione delle temperature di produzione di 20-30°C.

Inoltre migliorano moltissimo l'adesione tra legante e aggregati, comportano una notevole diminuzione della temperatura, una minor quantità di vapori prodotti, un alto grado di compattazione ed un'ottima resistenza alle deformazioni permanenti e all'ormaiamento (con alte temperature).

7.3.2 Gli additivi chimici

Sebbene sul mercato esistano un certo numero di additivi organici, e l'additivo Sasobit sia uno dei migliori e dei più utilizzati, si cerca tuttavia un'alternativa più economica: gli additivi chimici, infatti, offrono un pacchetto attraente per un imprenditore che si voglia avvalere delle moderne tecniche WMA, senza avere, inoltre, la necessità di apportare numerose e costose modifiche all'impianto di produzione.

Gli additivi chimici non modificano la viscosità del bitume. Come tensioattivi essi lavorano sull'interfaccia microscopica compresa tra gli aggregati e il legante, regolando e riducendo le forze di attrito presenti, in un intervallo di temperature compreso tra gli 85 e i 140°C; risulta così notevolmente migliorata la capacità di rivestimento del legante stesso rispetto agli aggregati, con temperature di miscelazione e compattazione di 20-30°C inferiori rispetto alle tecniche tradizionali [24].

I sistemi WMA che utilizzano questo approccio, sono relativamente nuovi ed il loro sviluppo è promettente. Alcune sostanze chimiche vengono aggiunte al legante in modo simile agli agenti anti-stripping, con una concentrazione del solo 0,3% rispetto alla massa del bitume.

7.3.2.1 L'Interlow-T (Interchimica Srl, Italy)

Le tecnologie denominate Interlow-T rispetto alle tecniche tradizionali a caldo per la produzione di conglomerati bituminosi, permettono di ridurre fino a 40°C le temperature operative, sfruttando le caratteristiche chimico-fisiche del bitume, per

ottenere una miscela molto lavorabile, dalla produzione alla compattazione, e acquisire rapidamente le caratteristiche meccaniche necessarie a sopportare le sollecitazioni indotte dal traffico veicolare [43], [44].

L'Interlow-T è un composto liquido che viene additivato al bitume, direttamente nei serbatoi di stoccaggio o durante la fase produttiva; la percentuale utilizzata va dallo 0,3 all'1,0 % in peso sul bitume stesso.



Fig. 7.8: Interlow T

La sua resistenza alle alte temperature permette stoccaggi a medio-lungo periodo; inoltre l'additivo reagisce sulla struttura del legante, mediante un'azione chimica, che si riflette immediatamente sulle caratteristiche fisiche del conglomerato e ne permette il confezionamento a 120°C e la stesa a 90°C circa [43].

La più innovativa caratteristica dell'Interlow-T non modifica le proprietà fisico-chimiche del bitume, ma anzi lascia inalterati la penetrazione, la viscosità ed il punto di rammollimento: tali proprietà vengono trasferite secondo una sorta di proprietà transitiva al conglomerato prodotto, che avrà le stesse qualità tipiche delle miscele tradizionali a caldo [44].

Riassumendo alcuni dei vantaggi ottenibili da questo tipo di tecnica, potremmo citare:

- minor consumo energetico, grazie al riscaldamento degli inerti a 120°C;
- aumento della produttività oraria dell'impianto, fino al 15%;
- diminuzione delle emissioni in atmosfera;
- possibilità di trasporto dei conglomerati a distanze maggiori;
- possibilità di utilizzare il fresato alle normali temperature di produzione;
- garanzia della posa in opera anche in presenza di temperature rigide;
- facilitazione delle operazioni di posa a mano;
- flessibilità di utilizzo, non richiedendo modifiche agli impianti tradizionali.

Relativamente ai punti sopraelencati, l'Interlow-T permette di ridurre la temperatura dell'inerte, ossia il 95% circa rispetto al totale della massa del conglomerato

bituminoso, pur non agendo direttamente sulla temperatura di utilizzo del bitume: tutto ciò perché essa rappresenta la temperatura minima che ne garantisce la viscosità e fluidità, ma anche perché è la temperatura di fornitura del legante stesso; l'azione tensioattiva dell'additivo permette di diminuire l'attrito interno della miscela di aggregati, facilitandone la lavorabilità e favorendo lo spostamento relativo tra gli inerti durante la fase di compattazione, anche alle normali temperature di esercizio; è possibile anche il trasporto a distanze maggiori rispetto ad una miscela tradizionale [43], [44].

Relativamente alla perdita di temperatura dei conglomerati, i tempi di raffreddamento aumentano indicativamente del 50%, rispetto ai conglomerati prodotti a caldo, e ciò è un punto favorevole, se si è in presenza di climi molto rigidi, e/o di distanze di trasporto molto più lunghe.

Rispetto alle emissioni in atmosfera, si verifica una riduzione compresa tra il 50 e il 90%.

Inoltre si riscontra una sensibile diminuzione dell'indice dei vuoti, con conseguente aumento della resistenza a trazione indiretta.

L'utilizzazione del materiale fresato poi, in percentuali indicative del 35%, permette l'utilizzazione degli inerti alla normale temperatura di produzione di 160°C: il materiale di recupero viene aggiunto nel mescolatore a T ambiente, secondo le Normative del Capitolato del Ministero delle Infrastrutture; l'impasto risultante presenta una temperatura di 135°C e buone caratteristiche meccaniche, grazie anche all'umidità del materiale di recupero, che favorisce un effetto di schiumatura, con un conseguente miglioramento anche della lavorabilità, sia in fase di stesa che di compattazione; tuttavia questa umidità residua rischia di spogliare gli inerti del film di bitume che li ricopre, e bisogna fronteggiare seriamente questa situazione, eventualmente anche con attivanti di adesione.

Grazie ai soli costi aggiuntivi di additivazione e al miglior prodotto ottenuto rispetto ad un conglomerato tradizionale, è stata favorita una fattibilità sempre maggiore della tecnica ed una sua rapida diffusione sul mercato [43].

7.3.2.2 Rediset (Akzo Nobel, Netherland)

Rediset WMX è un additivo chimico, che si ottiene dalla combinazione di tensioattivi cationici e di additivi organici, ed è stato sviluppato appositamente per risolvere i problemi che potrebbero nascere a causa dell'umidità degli aggregati, ma anche per

fornire resistenza senza effettuare ulteriori trattamenti (per esempio antistripping).

L'aggiunta di un attivatore di adesione, che modifica chimicamente il bitume, migliora il ricoprimento degli aggregati da parte del legante: l'attivatore realizza un'adesione di tipo "attivo" (la tecnologia permette di allontanare l'acqua dalla superficie bagnata dell'aggregato), risolvendo i problemi di umidità legati alla miscelazione a più bassa temperatura, ma anche un'adesione di tipo "passivo", che possa resistere ad eventuali infiltrazioni di acqua nella pavimentazione, compromettendo il legame aggregato-bitume: l'aspettativa di vita della pavimentazione risulta così notevolmente estesa.



Fig. 7.9: Additivo Rediset in forma di granuli

Fig. 7.10: Additivo Rediset in forma di pastiglie

Rediset WMX si presenta sotto forma di granuli o pastiglie, che possono essere aggiunte al legante o direttamente nell'unità di miscelazione (senza aggiungere acqua), quindi comporta solo piccole modifiche agli impianti. Con aggiunta di 1,5-2,0% in peso di bitume, si riduce notevolmente la viscosità del legante, favorendo una riduzione della temperatura di produzione da 22°C a 33°C (da 40°F a 60°F) e di stesa da 39°C a 78°C (da 70° a 140°F), rispetto alle tecniche tradizionali a caldo. Il PG (Performance Grade) del legante non cambia [55].

7.3.2.3 Revix (Mathy construction-Ergon, US)

Revix è un additivo chimico che per ridurre le temperature di miscelazione e compattazione si basa sulla riduzione dell'attrito interno sia tra il bitume e gli aggregati, (in fase di miscelazione) e sia successivamente tra gli inerti ricoperti (in fase di compattazione).

Una vasta gamma di tensioattivi, come cere, polimeri e altre sostanze, sono utilizzati per questa tecnologia; essa permette una riduzione delle temperature operative di circa 15-27°C (60÷80°F) rispetto alle tecniche tradizionali a caldo.

Revix può essere addizionato al legante, o direttamente nel miscelatore, senza apportare nessuna modifica sostanziale all'impianto.

Tra le tecnologie emergenti, inoltre, la Mathy Construction Company ha sviluppato un processo innovativo WMA in cui un tensioattivo diluito viene iniettato sul condotto del legante, in concomitanza ad una camera di espansione, per generare schiuma e favorire la lavorabilità della miscela.

Il tensioattivo riduce l'instabilità del processo di schiumatura e aumenta il tempo di semi-vita, o il tempo di lavorabilità, della schiuma stessa.

Le temperature del processo produttivo sono tipicamente di 110°C (230°F).

7.3.2.4 Cecabase Rt (CECA Archema Group, France)

L'additivo Cecabase è un prodotto della Ceca, filiale del gruppo Arkema, e gruppo leader Europeo nel campo degli emulsionanti e degli additivi di adesione per asfalto.

Il team del centro di ricerca CRRA (Arkema Rhône-Alpes Research Centre) ha sviluppato un additivo contenente agenti tensioattivi, composto da almeno il 50% di materie prime rinnovabili.

L'additivo Cecabase Rt viene utilizzato nelle tecniche a tiepido, in quanto riesce a ridurre la temperatura di stesa di circa 50°C (122°F), senza alcun effetto negativo o peggiorativo sulle prestazioni del conglomerato bituminoso; esso viene aggiunto indicativamente in percentuali dello 0,2-0,4% in peso rispetto al legante, quindi in quantità veramente molto piccole rispetto ai vantaggi che esso comporta [55].



Fig. 7.11: Cecabase Rt

La riduzione delle temperature ha un effetto benefico anche dal punto di vista lavorativo, e soprattutto in estate: gli operai infatti, a fronte delle già alte temperature, si affaticano molto meno, grazie anche ad un maggior comfort operativo: diminuiscono così i rischi sul lavoro e riescono a svolgere più speditamente le proprie mansioni; inoltre la riduzione della temperatura, come in tutte le tecniche WMA, ossida meno il

bitume, riducendo l'invecchiamento del legante stesso, e aumenta la durata della vita utile della strada.

Non è necessaria alcuna modifica agli impianti, e la produttività in caso di processi continui, viene aumentata del 10-20%; inoltre anche il raggio d'azione in caso di trasporto, si amplifica di ben quattro volte, grazie alla lavorabilità del conglomerato, fino a 100°C (rispetto ai 160°C circa delle tecniche HMA).

Rispetto alle tradizionali tecniche a caldo, Ceca evidenzia come l'uso di questi additivi chimici, permetta di ridurre il consumo energetico e le emissioni di gas dal 20 al 50% (anidride carbonica, monossido di carbonio, protossido di azoto), e di diminuire le emissioni di polveri del 90%, con un maggior rispetto dell'ambiente stesso: ciò comporta un ulteriore miglioramento delle condizioni lavorative degli operai, anche grazie alle ridotte radiazioni termiche provenienti dalla pavimentazione, nonché un atteggiamento molto più tollerante dei residenti locali, vicino ai quali sono presenti i cantieri che utilizzano questo tipo di additivo.

Obiettivo della suddetta tecnologia, è anche quello di cercare di compensare il costo aggiuntivo dovuto all'additivo, con il risparmio energetico ottenuto.

7.3.2.5 Evotherm (Mead-Westvaco, US)

Le tecnologie Evotherm, sviluppatesi negli Stati Uniti, sono tre: *Evotherm ET* (spesso indicato solo come Evotherm) che è poi stata sostituita da *Evotherm DAT* e *Evotherm 3G*.

Evotherm ET (Emulsion Technology) utilizza un insieme di agenti chimici emulsionanti, con effetto anti-stripping, per migliorare il rivestimento degli aggregati, la lavorabilità della miscela e la compattazione del conglomerato.

Si presenta sotto forma di emulsione, è mediamente composta dal 70% in peso di bitume, con una percentuale di additivi dello 0,5% in peso dell'emulsione, e una temperatura di stoccaggio di circa 80°C.

Durante il processo produttivo il legante viene unito agli aggregati riscaldati, al fine di ottenere una miscela con temperatura risultante tra gli 85°C e i 115°C (185-240°F), quindi con una diminuzione delle temperature operative di 55°C (100°F) circa: Evotherm, infatti, diminuisce la viscosità del legante, permettendo così la miscelazione a temperature inferiori. Sono disponibili varie combinazioni di sostanze chimiche additivanti (tutte sotto forma di emulsioni bituminose), a seconda dell'agente di adesione presente, in funzione della tipologia degli aggregati che costituiscono la

miscela.

La maggior parte dell'acqua di emulsione, si trasforma in vapore nel momento della mescola tra aggregati ed emulsione stessa, ottenendo un conglomerato finale completamente rivestito e di colore nero, proprio come gli HMA, e differentemente dalle miscele confezionate a freddo.

Per questi tipi di tecnologia, non deve essere apportata alcuna modifica all'impianto di produzione, e l'emulsione può essere pompata dal serbatoio dedicato. Evotherm può essere utilizzato con o senza polimeri modificanti.

Evotherm Dat (Dispersed Asphalt Technology) è costituita dalla stessa combinazione chimica di Evotherm, immagazzinata in un serbatoio a 80°C, ma diluita con una piccola quantità di acqua che viene iniettata poco prima della camera di miscelazione, mediante una o due valvole riscaldate, collegate col sistema di iniezione del bitume: si riduce così la viscosità del legante, ottenendo temperature più basse di miscelazione, anche in questo caso di 45-55°C, e facendo sì che gli aggregati siano completamente rivestiti.



Fig. 7.12: Pompa volumetrica per controllare l'aggiunta del DAT

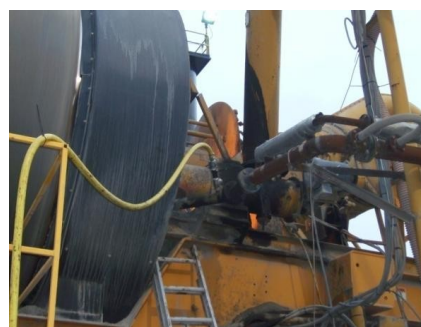


Fig. 7.13: Punto di iniezione

Uno dei principali vantaggi del processo DAT rispetto all'Evotherm, è la riduzione dei costi di spedizione (trasporto/spesa) rispetto all'emulsione, che consente ad un impianto di passare rapidamente da una tecnica HMA ad una WMA.

Evotherm 3G (Third Generation) invece, è un prodotto relativamente nuovo della serie di additivi Evotherm: questa forma "senz'acqua" è adatta per essere introdotta presso l'impianto di miscelazione o il serbatoio di stoccaggio del bitume, riuscendo ad abbassare la temperatura stessa di miscelazione di 33-45°C (60-85°F).

Tutte e tre le tecnologie sfruttano la stessa tipologia di additivi (Evotherm), ottimizzata di volta in volta, a seconda dei casi. Inoltre i fumi e gli odori provenienti dalle lavorazioni, in particolar modo durante la fase di stesa, vengono considerevolmente ridotti, in percentuali che vanno dall'80 al 97%; anche le emissioni nocive (causa dell'effetto serra) diminuiscono, migliorando la qualità dell'aria e l'impatto ambientale:

ad esempio si riscontra una riduzione di CO₂ del 40-60%. Il raggio d'azione dell'impianto risulta anche in questo caso più esteso, e grazie alla diminuzione delle temperature operative, aumenta sia la vita utile dell'impianto stesso che la sua produttività.

Come nelle altre tecnologie a tiepido, anche in questo caso il legante dopo 7-10 anni dalla stesa, risulta meno ossidato, e rispetto ai conglomerati bituminosi HMA, i conglomerati WMA possono avere una qualità anche maggiore; inoltre, proprio grazie al minor indurimento e alla minor ossidazione del bitume, è possibile aggiungere nel processo produttivo una quantità maggiore di materiale di recupero (RAP).

7.4 Trasformazione del bitume in schiuma

Come già visto nel Capitolo 4, il processo di schiumatura consiste nell'aggiungere al bitume caldo o direttamente nella camera di miscelazione, una piccola quantità di acqua (circa il 2% in massa rispetto al legante), che si trasforma rapidamente in vapore, espandendosi in termini volumetrici anche di 15/20 volte; le stesse bolle di vapore sono rapidamente ricoperte da un film sottile di bitume: il nuovo stato del legante prende il nome di "bitume schiumato".

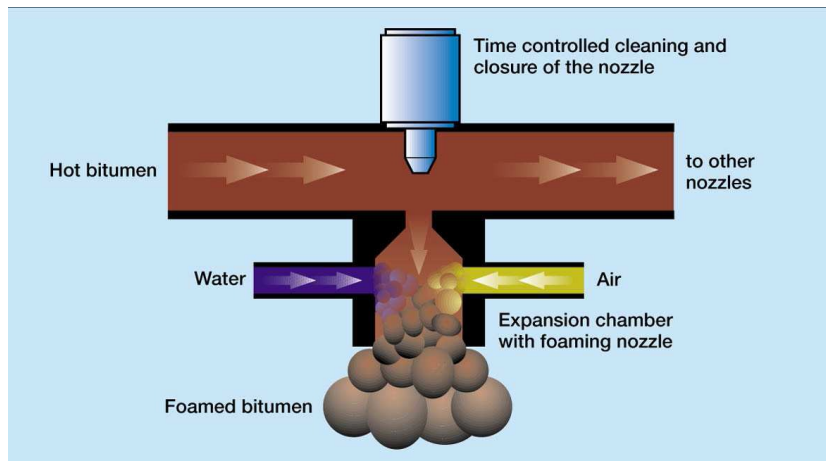


Fig. 7.14: Processo di schiumatura

In questa fase temporanea, la viscosità del bitume è notevolmente ridotta, consentendo un più facile rivestimento degli aggregati, a temperature di miscelazione molto più basse.

L'acqua che viene aggiunta deve essere sufficiente per dare vita al processo di espansione, ma non deve essere eccessiva, per evitare che si possano creare problemi di adesione; in questo caso vengono addizionati degli agenti anti-stripping direttamente nel legante, nella quantità dello 0,5% in peso del bitume, poco prima della fase di

miscelazione con gli aggregati [24], [30].

Le caratteristiche del bitume schiumato sono descritte in termini di *rapporto di espansione* (è il rapporto tra il massimo volume raggiunto in fase di espansione ed il volume finale che si ottiene una volta che la schiuma si è dissipata) e di *tempo di semi-vita* (è il tempo espresso in secondi in cui il massimo volume raggiunto dalla schiuma si riduce della metà), che forniscono una descrizione della stabilità della schiuma stessa nel tempo: queste caratteristiche dipendono soprattutto dal tipo di legante che si utilizza, e dal processo di espansione seguito.

Le tecniche WMA che applicano il processo di schiumatura, risultano semplici e a basso costo, e si differenziano l'una dall'altra in base al modo in cui l'acqua si colloca nel legante: se viene aggiunta o se è già incorporata all'interno di particolari sostanze, come ad esempio le zeoliti.

7.4.1 Zeoliti sintetiche (Aspha Min-Eurovia Services GmbH, Germany)

Una tecnologia messa a punto dall'industria tedesca, per la riduzione della temperatura di confezionamento e stesa del conglomerato bituminoso, consiste nell'aggiunta delle zeoliti, sostanze esistenti in natura, ma che possono essere anche di origine sintetica [49].



Fig. 7.15: Zeoliti sintetiche e naturali

Nel primo caso le zeoliti sono minerali di origine vulcanica o sedimentaria, generalmente alluminosilicati con struttura cristallina, a base di tetraedri, regolare e microporosa; Aspha Min, invece, è una zeolite di origine sintetica, prodotta da Eurovia, “programmata” al fine di conoscere con esattezza sia la quantità d'acqua contenuta al suo interno, che l'intervallo termico di efficacia.

In ogni caso, entrambe le tipologie di zeoliti, sono contraddistinte da una notevole quantità di vuoti, all'interno dei quali riescono a trattenere acqua, fino al 21% del

proprio peso [55], [31]. Le zeoliti scaldandosi ad una temperatura tra gli 85 e i 180°C, grazie al contatto con la miscela, liberano vapore acqueo, attraverso la formazione di micro-pori, e attivano così un processo di schiumatura controllata e graduale del bitume; esse vengono aggiunte direttamente nel miscelatore, nella misura dello 0,28% sul peso degli aggregati [31].

Il risultato ottenuto grazie a questo processo di tipo espansivo, consiste in una diminuzione della viscosità del legante, una miglior lavorabilità della miscela a temperature inferiori, nonché un ottimo ricoprimento degli inerti rispetto ad una tecnica tradizionale a caldo: la diminuzione della temperatura è di almeno 30°C, con un risparmio energetico del 20% e una riduzione delle emissioni in atmosfera (SO₂, NO₂ e CO₂) tra il 18 ed il 25% [49].

Grazie all'aggiunta di zeoliti si verificherà anche una riduzione degli odori, una minor alterazione ossidativa del bitume e di conseguenza una maggiore resistenza all'invecchiamento.

La pavimentazione, grazie ad un riscaldamento a temperature inferiori del legante, che risulta più ricco della sua frazione leggera, gli aromatici, avrà sempre un livello di ossidazione minore, a parità di condizioni; una superficie così realizzata risulterà più elastica e meno fragile di una che venga stesa a normale temperatura.

Relativamente alle caratteristiche meccaniche del conglomerato con aggiunta di zeoliti, non si riscontra un miglioramento della resistenza all'ormaiamento, né del modulo resiliente (rapporto tra tensione applicata e deformazione recuperabile che si ha una volta che è stata rimossa la tensione), mentre la sua resistenza a trazione non è influenzata dal tempo di maturazione della miscela.

Bisogna invece valutare la possibilità di aggiungere additivi come calce idrata per ridurre la suscettività dell'acqua, in quanto le temperature inferiori potrebbero non eliminare completamente l'umidità degli aggregati [49].

7.4.2 Advera WMA (PQ Corporation, US)

Il sistema Advera, a base di alluminosilicati cristallini e porosi, è molto simile ad Aspha Min, in quanto anch'esso è basato sull'utilizzo di zeoliti sintetiche, contenenti una notevole percentuale di acqua, tra il 18 ed il 21%, necessaria per dare vita ad una schiumatura prolungata del legante nel composto. Anche in questo caso, infatti, le zeoliti a contatto con la miscela riscaldata, liberano vapore acqueo, formando una micro-schiuma, che migliora la lavorabilità del composto stesso e il ricoprimento degli

aggregati, senza alterare la composizione chimica del bitume, né apportare cambiamenti al mix design: proprio per questo consideriamo la forza rotatoria come una misura preferenziale della lavorabilità, quest'ultima inversamente proporzionale alla viscosità del legante [2].

La consistenza granulometrica di Advera è talmente fine, da passare totalmente al setaccio 0,75 mm.



Fig. 7.16 – 7.17: Advera

L'additivo in polvere è introdotto nel tamburo rotante mediante un dispositivo pneumatico, attraverso un ingresso in fibra nel condotto del bitume, ad un tasso dello 0,25% in peso della miscela.

L'alimentatore può funzionare manualmente o essere regolato da un dispositivo computerizzato, collegato al sistema di controllo dell'impianto. Inoltre la misurazione viene fatta a peso, in modo che sia possibile regolare la velocità di alimentazione, in base alla velocità dell'impianto di produzione, riuscendo così ad ottenere una precisione ottimale [2].

Le temperature sono ridotte, ma lo sono anche le emissioni nocive e i consumi energetici; questi ultimi dipendono, oltre che dalle temperature operative, che generalmente sono da 28 a 39°C (50 a 70°F) inferiori rispetto alle tecniche HMA, anche dalla dimensione degli aggregati e dalla loro umidità; con Advera si riesce ad avere un risparmio energetico fino al 30% [55].

Inoltre la miglior lavorabilità della miscela finale, permette più ampie possibilità di posizionamento, con tempi di trasporto maggiori ed estensione del periodo stagionale di stesa; durante tale periodo migliorano anche le condizioni lavorative, grazie alle minori emissioni di fumi e ai ridotti rischi di ustioni; anche la riapertura al traffico è molto più rapida [2].

7.4.3 Il metodo Wam-Foam (Shell, UK-Kolo Veidekke, Norway)

Un altro sistema proposto per la riduzione della temperatura è la tecnologia WAM-FOAM, nata dall'unione tra la Shell e Kolo Veidekke, che utilizza in due fasi successive, bitumi con diversi gradi di penetrazione [55].

Il processo produttivo ha inizio con il riscaldamento degli aggregati a circa 120°C; il materiale lapideo viene successivamente miscelato con legante bituminoso soft (ad alta penetrazione), che rappresenta quantitativamente il 30% del legante totale da immettere nel miscelatore, portato a 100°C: a questa temperatura il bitume deve avere una viscosità contenuta, per permettere il completo ricoprimento degli aggregati; sempre nella stessa fase è preferibile aggiungere additivi anti-stripping, per evitare che in seguito, a causa dell'aggiunta di acqua necessaria per la schiumatura, si vada a compromettere l'adesione finale tra gli elementi della miscela, potendo l'acqua stessa penetrare all'interno degli aggregati (se non completamente ricoperti dal bitume soft), a causa della loro microporosità [49].

In un secondo tempo viene aggiunto, per il restante 70%, un componente "più duro", ossia un bitume con basso valore di penetrazione (tra 1 e 50 dmm a 25°C), riscaldato a 80°C, sotto forma di schiuma o più raramente di emulsione: sarà proprio l'aggiunta del bitume hard a conferire le necessarie caratteristiche meccaniche al conglomerato finale, che col solo bitume soft avrebbe posseduto una scarsa resistenza, con la conseguente formazione di ormaie sotto traffico.

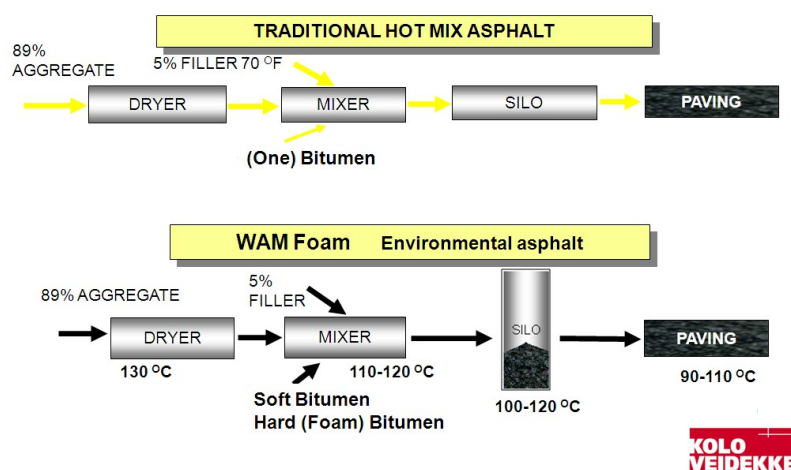


Fig. 7.18: Il processo Wam-Foam

Il dosaggio totale del legante è del 6% circa. Come in tutte le tecniche a tiepido, la miscela ottenuta presenta una bassa viscosità e un'ottima lavorabilità.

La tecnica utilizza comunque impianti standard, continui e discontinui, modificati con appositi dispositivi per la schiumatura del bitume hard [49].

Gli studi del processo WAM hanno avuto inizio nel 1995, con l'introduzione di un'emulsione di legante a bassa penetrazione, che fu però sostituita ben presto dalla più vantaggiosa schiuma di bitume.

I risultati della sperimentazioni furono lodevoli: la resistenza a fatica, all'ormaiamento, alla rottura a basse temperature, e l'adesione agli aggregati, non erano inferiori ai conglomerati tradizionali a caldo; inoltre la tecnica permetteva un risparmio del 30% in carburante, utilizzato per il riscaldamento dei materiali, una riduzione del 30% delle emissioni di CO₂, del 25% di CO, del 60% di NO_x e del 50-60% della produzione di polveri.

Quando il RAP viene utilizzato in percentuali del 15-25% in fase di miscelazione, la quantità di acqua proveniente dal materiale riciclato, è circa tre volte superiore alla quantità proveniente dalla schiuma; pertanto la temperatura del tamburo deve essere innalzata per ottenere l'asciugatura necessaria della miscela; tuttavia ciò sarebbe stato necessario anche per una tradizionale produzione di conglomerati a caldo.

7.4.4 Conglomerati bituminosi a bassa energia LEA (Lea-Co, France)

Lea-Co France e, contestualmente, Lea-Co International, si sono poste l'obiettivo di promuovere e gestire lo sviluppo dei due processi di confezionamento dei conglomerati brevettati EBE[®] (Enrobé à Basse Énergie) ed EBT[®] (Enrobé à Basse Temperature), confezionati a circa 95°C e stesi a 70-90°C, ovvero una nuova generazione di conglomerati che riescono a coniugare al tempo stesso il carattere ecologico del conglomerato a freddo, la diminuzione dell'impatto ambientale lungo tutta la filiera produttiva, e le prestazioni del conglomerato a caldo [46], [4].

I due processi, anche conosciuti come LEA (Low Energy Asphalt), consistono nell'essicare "parzialmente" lo scheletro granulare, eliminando l'umidità di una parte degli aggregati; successivamente sfruttano l'acqua contenuta in una seconda parte di aggregati, per schiumare il bitume.

Durante il processo LEA, gli aggregati grossolani sono riscaldati approssimativamente fino a 150°C (302°F) e sono successivamente uniti con tutta la quantità di bitume richiesta, alla temperatura di circa 170°C, appropriata per il caso [55].

Viene aggiunta (al bitume) una quantità di additivo indicativa dello 0,5% in peso sul legante, poco prima della fase di miscelazione, che favorisce il rivestimento e la schiumatura. Dopo che gli aggregati grossolani sono stati ricoperti, vengono miscelati con aggregati finissimi, umidi e freddi. Idealmente gli aggregati fini dovrebbero

contenere il 3-4% di umidità. Questa umidità si trasforma in vapore e fa in modo che il legante presente sopra gli aggregati si schiumi, aumentando così il suo volume: la durata di questo “stato” è relativamente breve, ma sufficiente ad inglobare anche gli aggregati fini.

Questa fase di vaporizzazione fa sì che la temperatura della miscela finale (in equilibrio) sia inferiore ai 100°C (212°F): l’acqua diventa nuovamente liquida (fase di condensazione), sottoforma di piccole goccioline, e favorisce la lavorabilità della miscela.

La percentuale di sabbia umida può arrivare anche fino al 40% in peso rispetto alla miscela totale e contenere dallo 0 al 100% di RAP [49].



Fig. 7.19: Umidificazione dell’aggregato fine

Fig. 7.20: Elevatore freddo della sabbia bagnata

Se l’aggregato fino è troppo secco, può essere addizionata dell’acqua, mentre se è troppo umido, una parte viene convogliata al tamburo essiccatore per essere asciugata insieme agli aggregati grossolani. Il trasporto, come per i conglomerati a caldo, avviene con dei teloni che evitano un abbassamento della temperatura, a causa dell’evaporazione per ventilazione, che ne provocherebbe una diminuzione di lavorabilità. La temperatura di stesa e compattazione è di circa 77°C (170°F), e può essere effettuata con gli stessi macchinari delle tecniche HMA, eccetto per una maggior energia impiegata, che consiste semplicemente in qualche passata supplementare col compattatore. Inoltre, essendo la temperatura di partenza più bassa, il raffreddamento avviene più velocemente, e altrettanto velocemente sono raggiunte le caratteristiche nominali [49].

Gli impianti tradizionali, continui o discontinui, non prevedono particolari modifiche all’impianto, fuorché per un apposito “kit”: sono compresi una tramoggia che permette di misurare la quantità di sabbia umida da introdurre nel miscelatore, un dispositivo per l’aggiunta di acqua alla sabbia (se necessario), ed un sistema di misurazione del bitume

per l'eventuale aggiunta di un tensioattivo.

Negli impianti continui, è anche possibile aggiungere gli aggregati fini attraverso l'anello previsto per l'aggiunta del RAP.

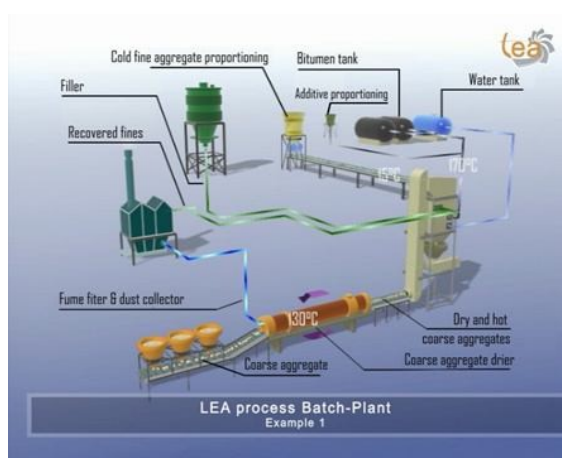


Fig. 7.21: Processo produttivo LEA in impianto

LEA può diminuire le emissioni che provocano l'effetto serra (CO_2 , N_2O , e CH_4) fino al 50%.

Seppur questo sistema sia stato usato e perfezionato molto negli ultimi anni, l'idoneità per i paesi nordici è ancora da verificare, essendo stata finora impiegata in località con temperature più elevate.

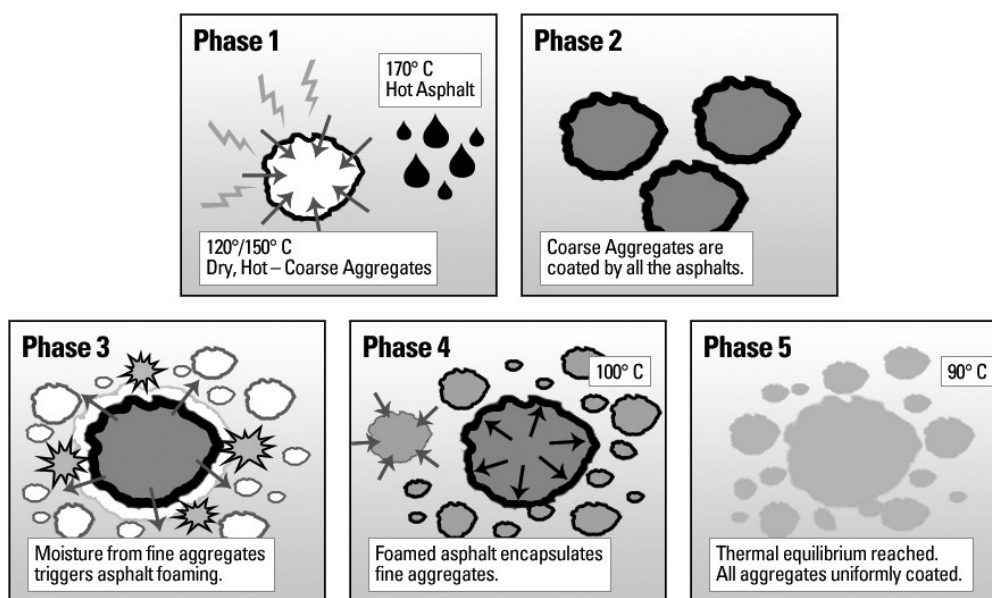


Fig. 7.22: Il processo LEA

Il processo, schematicamente mostrato nella figura precedente, è il seguente:

- I. L'aggregato di progetto viene diviso in due frazioni, una più grossolana e una più fine. La parte più grossolana viene riscaldata fino a 120-150°C circa (20°C

in meno rispetto alle tecniche HMA.

- II. Gli aggregati grossolani vengono uniti al legante riscaldato alla temperatura di miscelazione standard, di circa 170°C, finché non si ottiene il totale ricoprimento degli stessi. Poco prima dell'introduzione nell'impianto, un additivo appositamente formulato, è aggiunto al bitume, per mezzo di una pompa volumetrica ad un tasso dello 0,5% in peso sul legante: l'additivo ha lo scopo di regolare la schiumatura del bitume, ma ha anche un effetto antistripping, in funzione della tipologia di aggregati presenti.
- III. Gli aggregati, asciugati e riscaldati, sono ricoperti con la quantità totale di legante che deve essere aggiunta alla miscela. La parte grossolana dovrà essere indicativamente del 60% in peso sul totale degli inerti.
- IV. Il rimanente 40% degli inerti, costituito da particelle fini e umide a temperatura ambiente, viene introdotto mediante il sistema di alimentazione separato, o l'anello di riciclaggio del RAP, per poi essere successivamente mescolato con gli aggregati grossolani. I fumi vengono allontanati grazie ad un particolare processo brevettato.
- V. Quando gli aggregati caldi, ricoperti di bitume, vengono a contatto con i fini umidi, il legante aumenta il suo volume assumendo la consistenza di una schiuma, e inglobando le particelle più piccole; queste ultime si riscaldano a contatto con gli aggregati rivestiti, fino al completamento dell'equilibrio, che avviene ad una temperatura di circa 100°C.
- VI. L'umidità residua della miscela, presente sotto forma di piccole goccioline, favorisce la lavorabilità della miscela a basse temperature.

Va sottolineato che il risparmio energetico consentito dal processo, che può arrivare fino al 50%, deriva dal fatto che solo per il rivestimento di una frazione degli aggregati (quella grossolana), sono richieste temperature superiori ai 100°C [49].

L'aspetto superficiale, la macrotessitura e le prestazioni raggiunte dal conglomerato sopra descritto, sono paragonabili a quelle di un conglomerato tradizionale a caldo.

7.4.5 LEAB (Bam, Netherland)

Nelle tecnologie LEA e LEAB il risparmio di combustibile è elevato (anche più del 50%), in quanto gli aggregati o parte di essi, non sono riscaldati sopra il punto di ebollizione dell'acqua (100°C).

Il processo LEAB è stato sviluppato dalla BAM, nei Paesi Bassi: si tratta della

commercializzazione di un lavoro di ricerca condotto da Kim Jenkins, relativamente alle miscele schiumate semitiepide. A oggi questa tecnologia viene solamente usata in impianto. Gli aggregati vergini sono riscaldati alla temperatura indicativa di 95°C (203°F).

Tipicamente, nei Paesi Bassi si utilizza una percentuale media del 50% di RAP: il materiale di recupero viene però asciugato in un essiccatore separato da quello degli aggregati, a 110-115°C (230-239°F).

Durante gli studi condotti per valutare l'umidità degli inerti, è stato notato che la percentuale di acqua dei fini/filler che andava nella Baghouse era alta, indicativamente del 2,2%. Quindi, l'impresa che ha sviluppato questa miscela, la Bam, ha dovuto installare un bruciatore aggiuntivo, dopo il tamburo essiccatore-mescolatore, per riscaldare l'aria prima che entrasse nel collettore. Nel processo LEAB non viene aggiunta acqua agli aggregati; la schiumatura del legante avviene in un'apposita camera di espansione, dalla quale fuoriesce attraverso un erogatore spray (ugello).

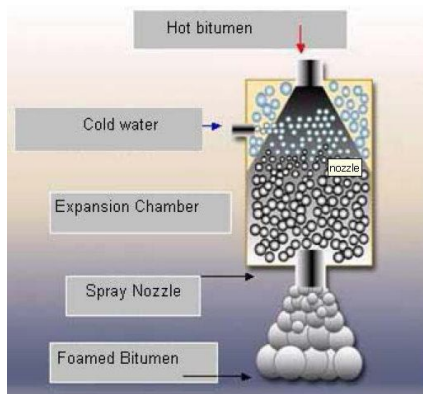


Fig. 7.23: Ugello singolo



Fig. 7.24: Serie di 6 ugelli in un processo Leab

Una serie di sei ugelli a scomparsa (nel caso in cui ci si avvalga di produzione tradizionale HMA), è installata lungo il condotto di alimentazione del legante.

Un additivo a base di ammina è aggiunto al tasso dello 0,1% in peso di legante, poco prima della fase di schiumatura, per migliorare il rivestimento degli aggregati e l'adesione. Questo additivo tende anche ad allungare la durata della schiuma, aumentandone la lavorabilità.

7.4.6 LT Asphalt (Nynas, Netherland)

Anche in questa tecnologia, le temperature operative sono inferiori ai 100°C.

Le due fasi del processo produttivo consistono innanzitutto nella formazione del bitume

schiumato, mediante speciali ugelli, al fine di aumentare il volume e diminuire la viscosità del legante: l'espansione avviene poco prima della camera di miscelazione. Successivamente la schiuma viene unita agli aggregati riscaldati, ad una temperatura di circa 90°C (194°F), quindi inferiore a quella di ebollizione dell'acqua.

Il sistema LT utilizza:

- uno specifico sistema di iniezione della schiuma;
- un legante specifico (Nyfoam, disponibile con diversi gradi di penetrazione), riscaldato a 170-180°C;
- un mix design appositamente studiato (sostenuto da Nynas).

Attualmente sul mercato sono presenti sistemi di miscelazione del bitume, che utilizzano una percentuale di legante attorno al 3%: in questo processo produttivo però si riesce a raggiungere un tasso del 7%.

Generalmente viene aggiunta una percentuale dello 0,5-1% di filler idrofilo, per trattenere e controllare l'umidità latente della schiuma.

La produzione può essere effettuata in continuo; inoltre si mantiene una buona lavorabilità della miscela fino a 60°C; anche le proprietà meccaniche del prodotto finito sono paragonabili a quelle di un conglomerato prodotto a caldo, ma avendo sfruttato delle temperature operative di gran lunga inferiori.

Ciò si ripercuote positivamente sul risparmio energetico, che può arrivare fino al 40%, e sulla riduzione delle emissioni di CO₂. Inoltre le condizioni di lavoro migliorano, grazie anche ai ridotti rischi di ustioni, il bitume si ossida meno, e anche le percentuali di RAP utilizzato possono essere maggiori rispetto alle tecniche HMA.

7.4.7 Double Barrel Green (Astec, US)

Il sistema Double Barrel Green, della Astec, che si avvale di acqua per dare origine ad un legante schiumoso, permette di produrre un conglomerato bituminoso tiepido, con temperature molto più ridotte rispetto alle tecniche tradizionali a caldo.

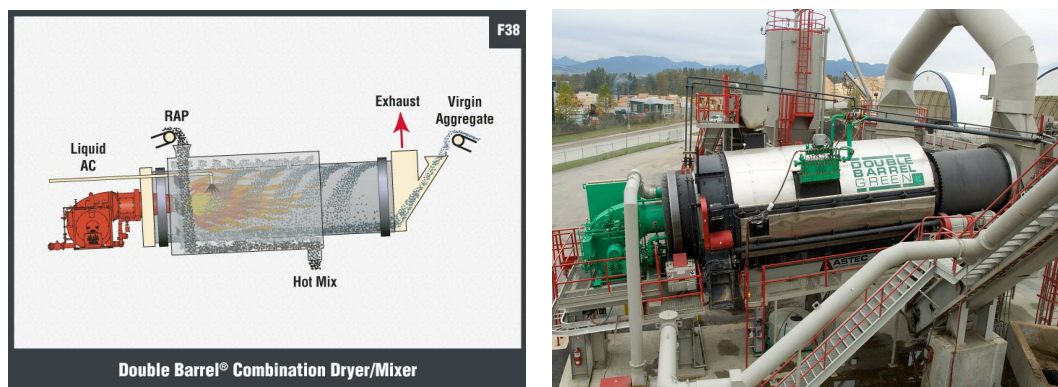


Fig. 7.25 – 7.26: Impianto Double Barrel Green

Gli aggregati sono introdotti all'interno di un tamburo rotante, mediante un nastro trasportatore. Grazie all'inclinazione del Double Barrel Green il materiale lapideo si muove verso il basso, in direzione del bruciatore posto nella parte finale dell'impianto. La fiamma (del bruciatore) è alimentata con olio o gas. Gli aggregati, dopo essere stati asciugati, entrano nella parte più esterna del tamburo, nella camera di miscelazione, attraverso degli appositi fori d'uscita. Vengono ora miscelati per mezzo di pale, che li muovono dal basso verso l'alto, spostandosi simultaneamente verso la parte finale del tamburo. A questo punto viene introdotto il RAP alla miscela mediante un apposito ingresso, e successivamente, grazie ad un sistema di schiumatura che affianca il condotto del bitume, il legante schiumato fuoriesce dagli ugelli e viene addizionato al composto precedente; il numero di ugelli utilizzati viene regolato da un computer in base al tasso di produzione dell'impianto.

Una pompa volumetrica controlla l'iniezione dell'acqua; la sua velocità varia in funzione della pompa di alimentazione del legante.

Come in tutti i processi di schiumatura, viene introdotta una piccola quantità di acqua, che genera vapore, e che viene a sua volta inglobata nel bitume: il legante si trasforma temporaneamente in una schiuma, che rispetto a prima presenta una minor viscosità, ma anche un maggior volume (aumenta di circa 18 volte), e che può quindi rivestire al meglio gli aggregati, con oltretutto temperature più basse rispetto alle tecniche HMA.

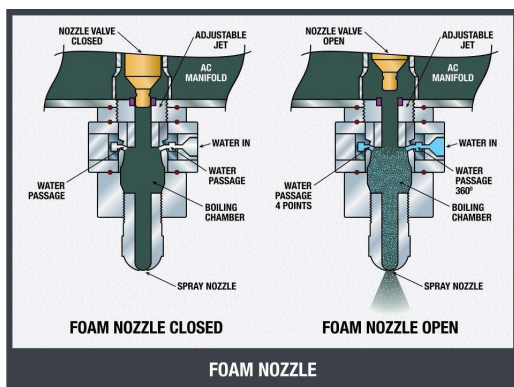


Fig. 7.27: Double Barrel Green: ugello

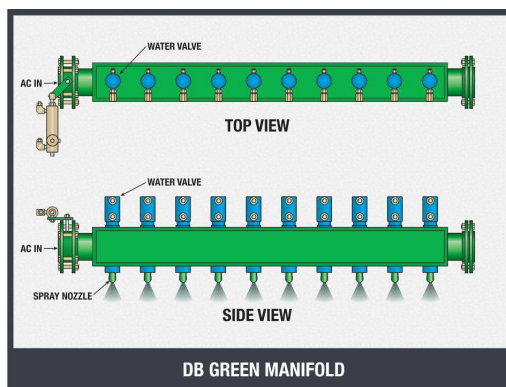


Fig. 7.28: Collettore

Successivamente vengono introdotte alla miscela anche le particelle più fini/filler, attraverso un apposito ingresso nel tamburo. Il conglomerato così ottenuto, viene portato fuori dal Double Barrel Green tramite un'apposita apertura.

Si noti che gli oli leggeri presenti nel bitume liquido non arrivano mai al punto di ebollizione 141°C (285°F), perché queste temperature in fase di miscelazione non vengono mai raggiunte, evitando così la produzione di fumi e di cattivi odori ed ottenendo anche un notevole risparmio di carburante: le temperature di produzione tipiche del processo assumono al massimo il valore di 135°C (275°F).

Con questo sistema si possono inoltre utilizzare percentuali maggiori di RAP, precedentemente frazionato, con bitumi di uguale qualità.

Non è prevista l'aggiunta di additivi, che sono spesso commercialmente costosi, mentre un'agente anti-stripping può tranquillamente essere utilizzato per migliorare l'adesione inerti-legante.

Il conglomerato viene infine trasportato e compattato con i mezzi tradizionali.

Astec ha anche introdotto nel 2009 un Kit per adattare, con poche modifiche, gli impianti tradizionali, continui o discontinui: il "Green System Pac" comprende una serie di valvole per l'introduzione di acqua, una camera di miscelazione, entro la quale viene iniettato il legante, che a contatto con l'acqua si espande istantaneamente, una serie di ugelli per la fuoriuscita della schiuma; sono inoltre previsti un'unità di controllo e un serbatoio per l'acqua dedicato.

Con questa tecnologia, si riesce ad ottenere un risparmio di combustibile fino al 35%, ed un aumento della produttività dell'impianto fino al 15%, rispetto alle tecniche HMA.

7.4.8 AQUABlack WMA (Maxam Equipment, US)

Il sistema AQUABlack WMA, concepito per essere collegato ad un qualsiasi impianto,

è stato sviluppato dalla Maxam Equipment, ed è basato su un sistema di schiumatura con microbolle, per ottenere una miscela a ridotta viscosità, senza richiedere l'aggiunta di alcun tipo di additivo, organico o chimico [55].

Nei tipici processi di schiumatura, quando l'acqua viene addizionata al bitume riscaldato, si formano delle grandi bolle, che si dissipano velocemente, abbandonando il legante non modificato: l'innovazione della tecnologia, consiste invece nel produrre delle microbolle, che rimangono nella miscela finché questa non viene compattata.

L'unità di schiumatura AquaBlack, in acciaio inossidabile, produce e fa entrare nel legante bituminoso le microbolle, che sono trattenute nella fase di miscelazione, attraverso una serie di getti ad alta pressione (1000 psi), un ugello a compressione, e una camera di miscelazione statica. Le microbolle alterano le caratteristiche fisiche del legante finché la compattazione della miscela non è completata.

Con questa tecnologia si limitano le temperature operative di almeno 30°F.

AQUABlack WMA ha costi notevolmente inferiori rispetto alla maggior parte dei sistemi WMA attualmente disponibili. In alcuni casi, la metà del prezzo.



Fig. 7.29: Kit di installazione del sistema AQUABlack WMA

Fig. 7.30: Camera di iniezione dell'acqua

Il produttore offre un pacchetto completo di installazione che può essere collegato in pochi giorni. Esso comprende un ugello per la formazione di schiuma, una pompa ad acqua, un sistema di misurazione, un pannello di controllo.

Con questa tecnologia gli impianti possono utilizzare un maggior quantitativo di RAP, pur rimanendo nei limiti delle temperature della Baghouse, ridurre i consumi di carburante fino al 15%, migliorare la sicurezza dei lavoratori, ridurre le emissioni, favorire percorsi più lunghi e aumentare la durata delle attrezzature.

7.4.9 Terex foamed warm mix asphalt system (Terex Roadbuilding, US)

Il sistema Terex, sviluppato dalla Terex Roadbuilding, una divisione della Terex Corporation, si basa sulla tecnologia del bitume schiumato, già sperimentato in campo stradale, e originariamente introdotto nel 1998. La tecnologia utilizza una camera di espansione brevettata, collocata poco prima del tamburo essiccatore-miscelatore, che garantisce un costante rapporto tra legante e quantità di acqua, ad ogni tasso di produzione. Il bitume, dopo aver subito il processo di schiumatura fuori dal drum mixer, viene iniettato immediatamente nella camera di miscelazione, per fornire agli aggregati un rivestimento uniforme: non è necessario aggiungere additivi di alcun tipo [55].

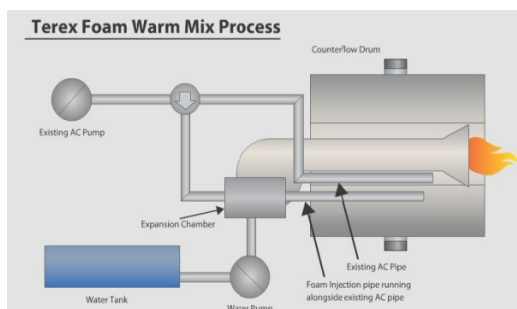


Fig. 7.31: Terex Warm Mix Asphalt system

Fig. 7.32: Foam Warm Mix Process

Questo sistema può essere facilmente adattato alla maggior parte degli impianti di produzione continui, per realizzare conglomerati WMA; inoltre è in grado di abbassare le temperature di miscelazione di una vasta gamma di mix designs, inclusi quelli che incorporano il RAP, di almeno 32°C (90°F), senza usare additivi, come detto prima: ciò implica una notevole riduzione di odori, polveri, emissioni dalla centrale di CO₂ e NO_x. Attualmente si riescono a produrre in impianto fino a 544 tonnellate all'ora di asfalto, ad un tasso di iniezione d'acqua del 4%.

7.4.9 Ultrafoam GX (Gencor, US)

La Gencor Industries ha sviluppato il sistema Ultrafoam GX per produrre conglomerati bituminosi a tiepido, mediante l'utilizzo del bitume schiumato.

L'innovazione della tecnica consiste nel metodo, semplice e affidabile, con cui si riesce ad iniettare il vapore nel processo di schiumatura, avvalendosi solo dell'energia fornita dalla pompa o del carico piezometrico che approvvigionano AC ed acqua, senza l'utilizzo di un dispositivo di miscelazione motorizzato: di conseguenza, il bitume e l'acqua possono essere introdotti con portate e temperature molto diverse.

L'acqua è aggiunta all'AC durante la fase di schiumatura, per promuovere il rivestimento degli aggregati da parte del legante stesso, ad una temperatura inferiore di miscelazione, anche di 30°F; questa temperatura però risulta inferiore non per l'aggiunta d'acqua, ma per aver diminuito la potenza del bruciatore, con un conseguente risparmio dell'8-10% dei costi del carburante, necessario per asciugare gli aggregati, e di emissioni nocive: la tecnica, pertanto, favorisce anche un minor inquinamento in termini ambientali.

Ci si avvale di un generatore speciale di schiuma, chiamato Green Machine, che può essere facilmente fissato ad un sistema di iniezione già esistente, che si collega al drum mixer.



Fig. 7.33: Ultrafoam GX

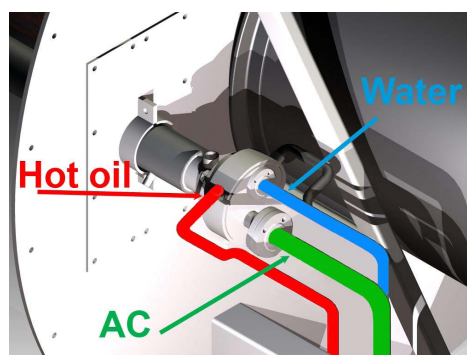


Fig. 7.34: Sistema di iniezione

Ultrafoam GX presenta in posizione centrale una valvola (chiusa da una molla), che si apre quando la pressione dell'acqua agente supera il carico fornito dalla molla di chiusura. Successivamente all'ugello, in posizione centrale, è collocato un diaframma, progettato per introdurre e dirigere il flusso di AC verso il processo, e che permette anche variazioni della portata di AC, mantenendo la pressione del fluido costante. Man mano che il flusso di AC aumenta, le barrette del diaframma si aprono (flettono), consentendo l'aumento dell'area di efflusso.

Il sistema riesce a miscelare il legante e l'acqua in modo proporzionato e continuo, generando piccole bolle di dimensioni costanti, che producono una schiuma uniforme per ogni tasso di produzione.

7.5 Tecniche a base di emulsione bituminosa

Tra le tecnologie a base di emulsione bituminosa, ricordiamo Evotherm ET, già vista nel caso di additivazione di fluidificanti chimici, ed Ecomac.

Nel primo caso, la tecnica consisteva nel miscelare un'emulsione bituminosa ad alto peso specifico, con gli aggregati riscaldati, ad una temperatura ridotta rispetto alle

tecniche tradizionali: il risultato era un'immediata trasformazione dell'acqua presente nel legante, in vapore. L'emulsione per questo tipo di processo era stata appositamente progettata, con l'aggiunta di particolari additivi per poter migliorare la lavorabilità, il rivestimento e l'adesione.

Nel secondo caso una miscela, prodotta con le tradizionali tecniche a freddo mediante emulsione, viene riscaldata al momento del suo utilizzo, come vedremo qui di seguito.

7.5.1 Ecomac (Screg, France)

Ecomac è una tecnologia sviluppata in Francia dal 1999 ad opera della società Screg, ed ha iniziato a vedere le prime realizzazioni su strada già dal 2004.

In fase produttiva si riesce ad ottenere un risparmio energetico di ben tre volte superiore rispetto ad una tecnica HMA; inoltre, questo originale processo brevettato è reso possibile grazie ad una speciale unità di riscaldamento dedicato.

Ecomac appare come una miscela tradizionale preparata a freddo con l'utilizzo di un'emulsione di bitume puro, che viene conservata fino al momento della stesa, e viene successivamente riscaldata fino a 50-60°C, per migliorarne la compattazione e le proprietà meccaniche complessive.

Basata sull'utilizzo di impianti speciali, questa tecnica, grazie alle più contenute temperature operative, produce quantità minori di polveri e fumi, riduce le emissioni di gas che provocano l'effetto serra e di composti organici volatili (VOC), ottimizzando al tempo stesso l'omogeneità della miscela a freddo e la sua capacità di movimentazione. Inoltre, grazie al riscaldamento della stessa, si hanno migliori condizioni operative: lavorabilità, controllo dell'acqua e della rottura dell'emulsione, grazie al particolare metodo di produzione.

Con Ecomac sono possibili diversi impieghi: per manti sottili di usura, grazie alle sue buone proprietà di uniformità, per strati di collegamento (binder), o per strati di base: è possibile anche progettare miscele con materiale di recupero, mediante Ecomac RE.

Dopo la stesa e la compattazione, effettuata a circa 45-50°C è possibile aprire direttamente la strada al traffico.

Ecomac è tuttavia raccomandata solo per condizioni di basso traffico.

Capitolo 8 - MATERIE PRIME SECONDARIE PER UTILIZZO STRADALE

8.1 Introduzione alle materie prime secondarie

Da molti anni la ricerca affronta il tema dell'utilizzo dei materiali di riciclo nelle costruzioni stradali; pertanto gli studi sono sempre più orientati alla caratterizzazione chimico-fisica del prodotto, alla valutazione delle caratteristiche meccaniche delle miscele, alla verifica delle prestazioni in opera ed al potenziale inquinamento connesso all'impiego del prodotto.

I materiali di scarto utilizzabili come materie prime secondarie nella costruzione di pavimentazioni stradali, possono aver origine da molteplici processi produttivi. La loro produzione è delegata ad operatori economici che provvedono alla raccolta, alla selezione, alla lavorazione ed alla distribuzione del prodotto; l'attuale frammentazione del mercato non consente però lo stoccaggio di quantità significative: da ciò ne deriva una carenza di materiale per soddisfare la realizzazione del fabbisogno relativo alle infrastrutture, dettata probabilmente anche dalla sfiducia che ancora oggi si ha nell'utilizzare questa tipologia di materie prime, nelle cui potenzialità forse non si crede abbastanza.

Le principali tipologie di materie prime secondarie utilizzate per pavimentazioni stradali, sono costituite da:

- materiale proveniente da C&D;
- materiale proveniente da terre e rocce da scavo;
- materiale in sito.

8.2 Materiale proveniente da C&D

8.2.1 I rifiuti da C&D: quadro d'insieme

In questi ultimi anni la crescente attenzione alle problematiche ambientali ha reso sempre più difficoltoso il prelievo da cave naturali degli inerti e, nel contempo, sempre più restrittiva la regolamentazione per la gestione delle discariche di rifiuti: di questi solo una minima parte viene riutilizzata come materia prima secondaria.

Una delle categorie di maggior interesse in ambito stradale, è quella dei rifiuti relativi ai *materiali da costruzione e demolizione*.

Questi materiali, altrimenti detti *inerti da C&D*, comprendono tutti gli scarti che derivano dalle diverse attività di costruzione, manutenzione, ristrutturazione, demolizione di edifici, opere civili ed infrastrutture di trasporto; un notevole contributo a questa tipologia di inerti, proviene anche dalla fabbricazione e prefabbricazione di

elementi e componenti delle costruzioni civili (mattoni, piastrelle, elementi strutturali in cemento armato, ecc.) [23].



Fig. 8.1: Esempio di macerie

I rifiuti provenienti da costruzioni e demolizioni, rappresentano una parte significativa del totale dei materiali da avviare annualmente a discarica: questo tipo di smaltimento richiede un numero sempre maggiore di siti in cui realizzare gli impianti, e comporta, anche a causa della difficile dislocazione di questi ultimi, spesso molto lontane dalle aree urbane, notevoli costi di trasporto, gestione e smaltimento.

Una tecnologia che miri ad un contenimento nei consumi delle materie prime vergini, e ad una limitazione degli ingenti quantitativi di rifiuti, non può prescindere dalla scelta del riciclaggio; essa rappresenta una tecnologia ancora giovane nel settore delle costruzioni, e spesso non risulta competitiva, soprattutto dal punto di vista economico, rispetto a tecnologie consolidate nel tempo e che si avvalgono di materie prime vergini. Seppur questa fase iniziale sia tipica di qualsiasi processo innovativo che si rispetti, due problematiche in particolare ne rendono necessario il superamento:

- la carenza sempre più sentita di materie prime vergini;
- la sovrabbondanza di macerie, associata alla difficoltà di smaltimento delle stesse.

L'analisi dei flussi degli inerti da costruzione e demolizione è molto complessa perché questo tipo di rifiuto viene prodotto da settori diversi, e segue strade a loro volta difficilmente quantificabili, a causa del fatto che non tutti siano monitorati a livello nazionale e spesso vengano contabilizzati in maniera scorretta.

In particolare la produzione dei rifiuti da C&D può derivare da almeno quattro settori:

1. attività di costruzione e demolizione;
2. attività di costruzione e demolizione abusiva;

3. attività di “microristrutturazioni” domestiche svolte in conto proprio;
4. altre attività (es: scarifica stradale,...).

La loro composizione risulta molto variabile, sia per la diversa origine dei rifiuti, sia per molteplici fattori quali le tipologie e le tecniche costruttive locali, il clima, l’attività economica e lo sviluppo tecnologico della zona, nonché le materie prime e i materiali da costruzione localmente disponibili.

A livello semplicemente esplicativo, si riportano in tabella le composizioni percentuali medie del rifiuto di demolizione in Italia.

Categoria di rifiuto	% in peso sul totale
Calcestruzzo	30,0
Calcestruzzo non armato	10,0
Calcestruzzo armato	20,0
Laterizio (tegole, mattoni, forati)	50,0
Asfalti	5,0
Scavi	6,0÷10,0
Carta e cartone	0,6÷4,0
Metallo	3,0
Varie	1,0÷1,4

Tabella 8.1: composizione percentuale media in peso del rifiuto da demolizione in Italia

L’esatta composizione merceologica dei rifiuti di demolizione è un dato fondamentale per la corretta progettazione delle diverse fasi di trattamento. È importante sottolineare che la presenza di impurezze nel materiale in ingresso agli impianti di recupero (gesso, asfalto, legno, gomma, plastica, etc.) ne limita le possibilità d’impiego dopo il trattamento e/o condiziona la scelta della tecnologia di riciclaggio da adottare.

Possono inoltre essere presenti anche alcuni elementi pericolosi, quali amianto, cromo, cadmio, zinco, piombo, mercurio e PCB, contenuti in alcuni materiali da costruzione o derivanti da demolizioni di siti contaminati, ma tali sostanze si trovano in percentuali abbastanza ridotte: in Gran Bretagna, per esempio, se ne è stimata la presenza del solo 1% circa, tra i rifiuti da C&D.

Inoltre, la rimozione dei materiali pericolosi è di fondamentale importanza per poter ottenere, dal processo di demolizione, materiali non contaminati che possano essere facilmente avviati al riciclo. Alcune sostanze rilasciate durante la demolizione possono infatti inquinare non solo gli altri rifiuti da C&D, ma anche penetrare nell’atmosfera o

nel terreno, oltre ad esporre a notevoli rischi gli operatori del settore. In un processo di demolizione corretto, quindi, i materiali potenzialmente pericolosi devono essere rimossi per primi, per due motivi fondamentali:

- 1) fin tanto che i materiali sono riconoscibili e possono essere rimossi manualmente, i rischi per gli addetti ai lavori saranno minori;
- 2) la rimozione dei materiali contenenti sostanze pericolose permette di avere rifiuti C&D non contaminati da sostanze nocive, quindi riciclabili con maggiore facilità e riconducibili alla tipologia dei rifiuti non pericolosi, con i vantaggi normativi che ciò comporta.

I materiali ed i prodotti utilizzati in edilizia possono emettere, ad esempio, composti altamente tossici (cancerogeni o allergenici), composti irritanti o composti con sconosciuti effetti collaterali: inoltre possono rilasciare i seguenti inquinanti:

- inquinanti di natura fisica: radon e prodotti di decadimento;
- composti organici volatili e semivolatili, in particolare formaldeide, solventi organici aromatici e antiparassitari;
- inquinanti biologici: funghi, muffe, batteri;
- fibre minerali naturali e artificiali: amianto, lana di vetro, lana di roccia.

Tra i componenti pericolosi, quelli che sono caratterizzati da un impatto ambientale e sanitario elevato, e sono presenti in quantità più rilevanti negli edifici da demolire, sono indubbiamente l'amianto e il piombo [23].

8.2.2 Impianti per il riciclaggio dei rifiuti derivanti da C&D

I rifiuti derivanti da costruzioni e demolizioni, di edifici come di strade, per essere riutilizzati sono trattati presso appositi impianti di frantumazione, che possono essere di due tipi:

- gruppi mobili di frantumazione;
- impianti fissi di trattamento e riciclaggio [23].

L'impiego dei gruppi mobili è giustificato dal costo iniziale inferiore, rispetto a quello degli impianti fissi, oltre che dalla possibilità di ridurre sensibilmente il costo di trasporto, specialmente nei casi in cui è possibile frantumare grosse quantità di materiale da utilizzare in loco.

Questi impianti sono dotati di dispositivi magnetici per l'allontanamento dei materiali ferrosi, ma non consentono di separare automaticamente altri materiali estranei, come

plastica, legno o carta.

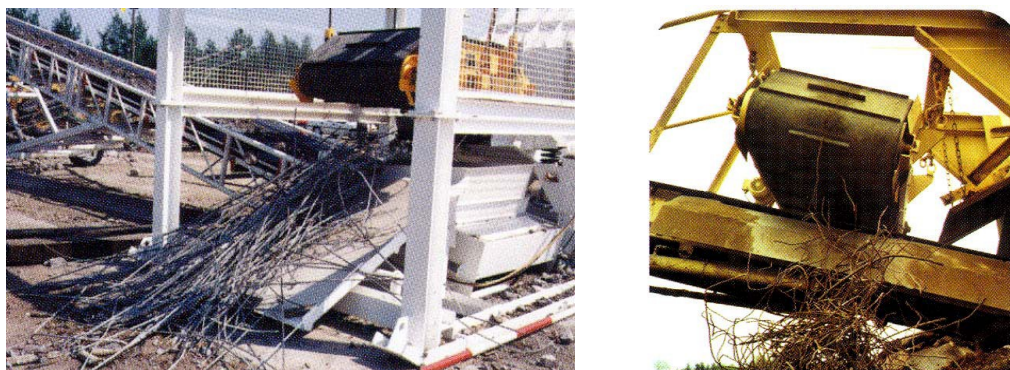


Fig. 8.2 – 8.3: Esempi di separazione magnetica

La frantumazione primaria delle macerie avviene tramite frantoio a mascelle o ad urto; quella secondaria, se prevista, è seguita da una fase di vibrovagliatura, per la produzione di aggregati di materiale inerte secondario o vergine, sempre che le macerie da riciclare siano costituite da materiale litico proveniente da scavi [23].

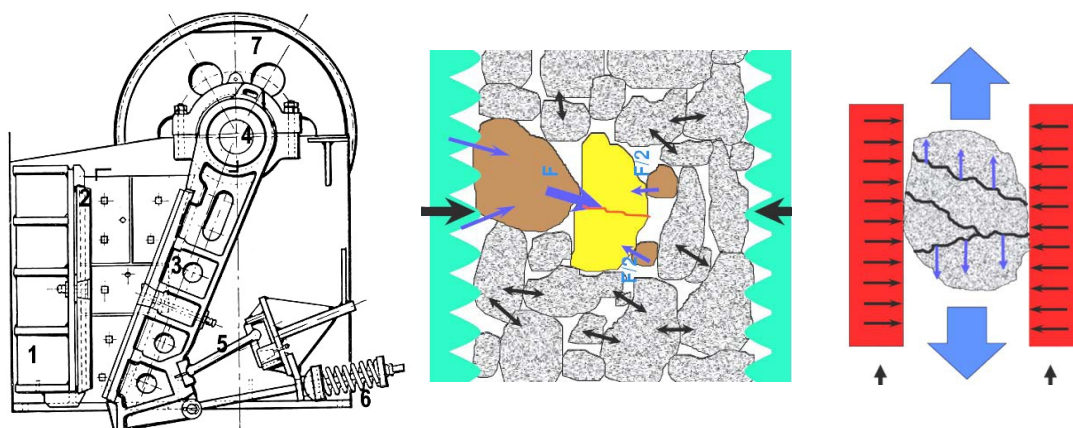


Fig. 8.4 - 8.5 - 8.6: Frantoio a mascelle

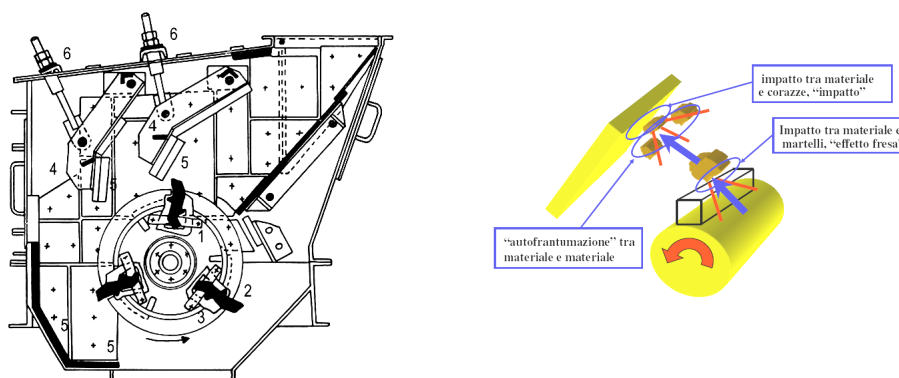


Fig. 8.7 - 8.8: Frantoio ad urto

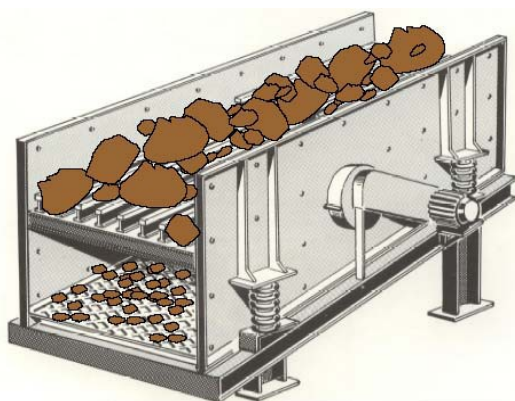


Fig. 8.9: Griglia inferiore a maglie rettangolari con rivestimento in gomma

Questi impianti, seppure generalmente realizzati in serie e quindi senza tener conto di esigenze o particolarità specifiche, sono in grado di trattare anche piccole quantità sul posto di produzione portando ad un risparmio sui costi di trasporto delle macerie, come prima accennato, anche se dal punto di vista qualitativo, se il materiale in ingresso non è molto omogeneo, non è possibile raggiungere buoni rendimenti di selezione, ma soltanto una riduzione granulometrica [23].

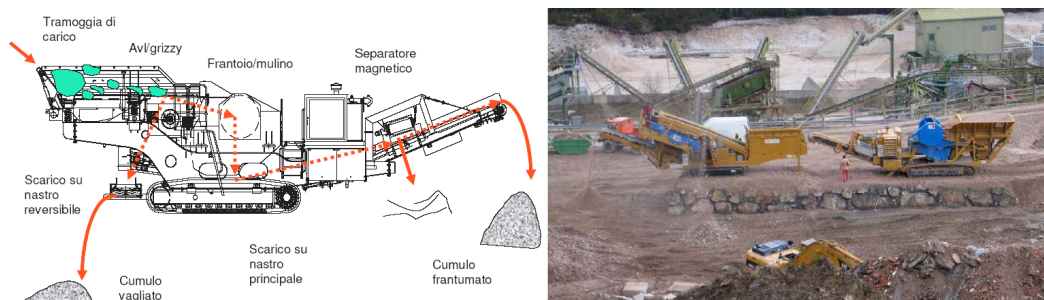


Fig. 8.10 - 8.11: Schema ed immagine di impianto mobile

Gli impianti fissi, invece, presentano una tecnologia più completa, consentono cioè la produzione di materiali selezionati non solo da un punto di vista qualitativo, ma anche in relazione all'assortimento granulometrico che ne deriva, garantendo d'altra parte una produzione molto elevata.

Questi impianti, rispetto ai precedenti, sono in grado di fornire un prodotto di migliore qualità anche per il fatto di essere progettati e realizzati per un sito specifico e per una determinata quantità e qualità di rifiuti di demolizione, oltre che per la possibilità di impiegare tecnologie più innovative [23].

Per entrambe i tipi di impianto, il processo di riciclaggio adottato può sintetizzarsi nelle seguenti fasi:

- controllo sulla qualità dei materiali in arrivo;

- stoccaggio provvisorio dei rifiuti, in modo da mantenere separati i materiali di diverso tipo, come ad esempio:
 - calcestruzzi e c.a,
 - materiali lapidei riutilizzabili provenienti da scavi,
 - laterizi, tegole, mattoni e rivestimenti in genere,
 - conglomerati bituminosi,
 - materiale leggero (carta, cartone, legno e plastica);
- preselezione dei rifiuti per mezzo di pale gommate;
- prevagliatura per la separazione di terra, terreno e gesso;
- frantumazione primaria, tramite frantoio a mascelle o ad urto, con allontanamento del materiale trattenuto per mezzo di nastro trasportatore;
- separazione magnetica o manuale di ferro;
- frantumazione secondaria, se prevista, tramite frantoio a mascelle, a cono o ad urto;
- vibrovagliatura;
- stoccaggio dei prodotti del riciclaggio (materie prime secondarie) [23].



Fig. 8.12 - 8.13: Esempio di impianto fisso e Stoccaggio

8.2.3 Qualità delle materie prime secondarie

La qualità del materiale prodotto, dopo un trattamento di riciclaggio, dipende principalmente dallo stoccaggio provvisorio dei rifiuti, effettuato nella loro fase d'arrivo all'impianto, e dalla buona omogeneità e costanza di produzione del materiale [36].

Nella fase di stoccaggio, infatti, è necessario eseguire una selezione all'origine per separare le diverse componenti dei rifiuti ed allontanare le sostanze estranee o inquinanti.

La composizione costante del prodotto si può conseguire grazie all'adozione di

procedure d'estrazione dai cumuli di macerie, che consentono di ottenere una sufficiente miscelazione delle varie tipologie di rifiuti avviati al trattamento; dalla composizione costante e dall'analisi granulometrica, derivano caratteristiche prestazionali immutabili: proprio per questo è bene effettuare dei controlli frequenti, dai quali scaturiscono valutazioni preliminari sui possibili campi d'impiego.

Nella fase di alimentazione dell'impianto di riciclaggio, per mezzo di pala gommata, l'operatore sceglie con cura il materiale da introdurre nella tramoggia, al fine di avere un carico in cui siano presenti tutti i diversi componenti.

Il materiale viene allontanato, dopo la vagliatura primaria, per mezzo di nastro separatore, e stoccato nell'attesa di un'ulteriore riciclaggio, eseguito con un frantoio ad urto, ed un vibrovaglio a tre piani, che consente di produrre diverse selezioni granulometriche.

I controlli di qualità a cui sono sottoposti questi prodotti, sono diversi sia per frequenza sia per tipologie di prove; ad esempio per le pezzature più grossolane, sono previste prove settimanali, come analisi granulometrica, determinazione dei limiti di consistenza, prova di costipamento di una terra (Proctor), prova CBR, mentre man mano che la granulometria si fa più fine, si effettuano prove come la L.A., coefficiente di forma, equivalente in sabbia, e anche la loro frequenza è inferiore [36], [38].

8.2.4 Riutilizzo delle materie prime secondarie

La scelta di messa in discarica dei materiali, caratterizzata da elevati costi economici nonché ambientali, viene oggi spesso scartata a vantaggio di tecniche di recupero, ad esempio in una nuova pavimentazione.

Le materie prime secondarie ottenute dal processo di riciclaggio, possono essere utilizzate per una serie di applicazioni; le caratteristiche richieste a questi materiali, in assenza di una normativa specifica, sono le stesse dei materiali vergini per le medesime applicazioni; proprio per questo motivo ogni materiale è accompagnato da test di qualificazione, a dimostrazione del fatto che l'utilizzo di detti materiali riciclati, non comporta un abbassamento della qualità del prodotto finale [38].

In Italia questa tipologia di riciclaggio tarda a spiccare il volo, e l'utilizzo che ne viene fatto è soprattutto relativo a sottofondi per piazzali, strade interne e pavimentazioni di opifici industriali, strade di scarsa importanza, e al riempimento di scavi eseguiti per la posa in opera di elettrodotti, gasdotti, acquedotti e reti fognanti [36].

Negli ultimi anni si è iniziata ad affermare una certa tendenza rivolta alla selezione delle

macerie, al fine di ottenere tre categorie qualitativamente differenti:

- ✓ materiali con caratteristiche identiche a quelle dei materiali originari;
- ✓ materiali con caratteristiche di nuovi materiali che possono sostituire quelli tradizionali nelle stesse utilizzazioni da cui provengono;
- ✓ materiali con caratteristiche di nuovi materiali, che possono subentrare a quelli tradizionali, in impieghi diversi da quelli da cui provengono.

Nella prima categoria rientrano ad esempio i materiali ferrosi e quelli metallici in genere, impiegati nella produzione di nuovi semilavorati.

Nella seconda categoria rientrano le macerie costituite da calcestruzzo, calcestruzzo armato e conglomerati bituminosi; spesso sono parte integrante del materiale vergine, dopo essere stati preventivamente frantumati, vagliati ed eventualmente ritrattati, come nel caso del conglomerato bituminoso.

Nella terza categoria rientrano invece gran parte delle macerie edilizie, in particolar modo laterizi, tegole, mattoni, materiali plastici (in prevalenza PVC), legno e vetro [36]. Il materiale da riciclare viene separato, frantumato e opportunamente vagliato, per essere successivamente integrato alla graniglia dei conglomerati bituminosi per uso stradale, come strato anticapillare e come sottofondo per strade con bassi livelli di traffico, ed infine come aggregati per produrre conglomerati cementizi leggeri e a bassa resistenza.

I materiali plastici dopo il riciclo trovano impiego nella produzione dei casseri, sagome per solai e additivi per calcestruzzi leggeri. Il PVC, grazie a recenti tecnologie di riciclaggio, trova impiego nella produzione di profilati per serramenti, previa aggiunta di materiale vergine in percentuali comprese tra il 30 e il 60%. Il legno, dopo essere stato sminuzzato, può essere impiegato come farina di legno nella lavorazione di materiale plastico, per la produzione di mattoni coibentati ed infine come combustibile.

Il vetro è riciclato per poi produrre prodotti (sempre in vetro) non utilizzabili nel settore delle costruzioni, come bottiglie e contenitori in genere, che possiedono minore trasparenza rispetto a quella prevista per le chiusure in campo edilizio [38].

Un programma di ricerca in ambito ferroviario, ad esempio, ha effettuato una valutazione, in termini prestazionali, delle caratteristiche fisiche e meccaniche, determinate con prove di laboratorio previste sulle terre, di un misto granulometrico costituito da materiale riciclato, per un eventuale impiego nella costruzione del corpo stradale ferroviario e della relativa piattaforma. Il confronto tra le prescrizioni tecniche ferroviarie e i risultati delle prove in sito, eseguite su un tratto sperimentale, hanno

evidenziato ottime possibilità d'impiego del misto granulometrico riciclato [36].

Un altro settore in cui l'impiego di aggregati riciclati può diventare efficace è quello dei conglomerati cementizi. Le tecnologie attuali non consentono una sostituzione totale dei materiali naturali, ma è disponibile un processo tecnologico capace di produrre aggregati riciclati a partire da materiali con proprietà omogenee. Con l'impiego di materie prime secondarie di qualità, sono necessarie poche variazioni alla tecnologia del calcestruzzo. Ciò non è valido nel caso della sabbia riciclata, che presenta caratteristiche non omogenee e comporta un congruo aumento della quantità d'acqua d'impasto, e pertanto come inerte è utilizzato raramente [36].

Gli aggregati riciclati da impiegare per la produzione di calcestruzzi, per esempio, provengono solitamente dalla frantumazione e dalla selezione degli stessi, o dal riciclaggio di una miscela di macerie. La qualità dei prodotti dipende dal tipo di materiale di base, considerando però che per i confezionatori il maggior interesse è rivolto al riciclaggio del proprio prodotto, anche per dimostrare che il calcestruzzo appartiene ad un sistema di gestione dei rifiuti che prevede il recupero di materiale, per ridurre quanto più possibile lo smaltimento in discarica.

Questa soluzione richiede selezione e controlli in produzione, da cui costi aggiuntivi. Inoltre l'impiego di materie prime secondarie comporta problemi sia di natura tecnica sia economica, quindi l'adeguamento degli impianti di produzione, per quanto riguarda le aree di stoccaggio ed i relativi costi; proprio questi ulteriori costi potrebbero spingere i confezionatori a commercializzare calcestruzzi a basse prestazioni, ma anche questi devono rispondere alle prescrizioni di durabilità delle strutture previste dalla norma UNI 9858 che, salvo per calcestruzzi con classe d'esposizione 1, prevede l'adozione di materiali (calcestruzzi) con buona resistenza meccanica [38].

Infine si osserva che è in aumento la tendenza all'automazione degli impianti, ma questa scelta ha valenza se gli aggregati hanno caratteristiche costanti, poiché in caso contrario si avrebbero ripercussioni sul rapporto a/c, sulla consistenza e sulla resistenza, e quindi sulla qualità del prodotto finale. Tutto questo rallenta l'uso di materie prime secondarie nel settore dei conglomerati cementizi [36].

8.3 Materiale proveniente da terre e rocce di scavo

8.3.1 Generalità

Negli ultimi anni l'incremento delle opere di scavo è inevitabilmente legato all'aumento dei volumi di terre e rocce che devono essere smobilitate e al loro eventuale reimpiego o

smaltimento: purtroppo anche quando non contaminati, questi materiali sono spesso considerati un rifiuto più che una risorsa.

Il problema è stato affrontato nel passato soprattutto a livello locale, dalle Agenzie Regionali Per l'Ambiente (ARPA), ma con risultati poco risolutivi delle reali problematiche ambientali; al momento invece, l'Italia sta attuando le Normative Europee, allo scopo di armonizzare delle procedure che mirino ad una salvaguardia sempre più efficace nei confronti del territorio.

Anche il materiale proveniente da scavi può infatti essere riutilizzato come materia prima secondaria per la realizzazione di pavimentazioni stradali.

I materiali di scavo sono rifiuti costituiti principalmente da rocce e materiale di sterro provenienti dagli sbancamenti effettuati per la costruzione di infrastrutture (tunnel, gallerie, ecc.) e di edifici.

Basti pensare alla realizzazione della nuova linea AV/AC (Alta Velocità e ad Alta Capacità) a Bologna, che ha comportato una movimentazione di oltre 3 milioni di metri cubi di terra, di cui 2,5 milioni sono stati conferiti nei siti di cava, individuati grazie all'Accordo Procedimentale con il Ministero dell'Ambiente.

A partire dal Febbraio 2010, invece, il terreno proveniente dallo scavo della nuova stazione sotterranea AV/AC è stato suddiviso nel seguente modo: il terreno vegetale è stato stoccato a parte per consentirne la risistemazione all'interno delle cave da ritombare (cioè da chiudere con un intervento che le riambientalizzi), il terreno idoneo è stato destinato per la realizzazione di rilevati, piste e piazzali di cantiere, calcestruzzi e cementizi, il terreno privo di additivi è stato messo a disposizione per ripristini ambientali, mentre lo smarino non riutilizzabile ed il terreno fangoso sono stati inviati in cave vicine.

8.3.2 Un esempio di recupero di terre e rocce da scavo: lo smarino delle gallerie.

Una tipologia di materie prime secondarie, può provenire dagli scavi effettuati per le gallerie: il materiale di risulta presenta infatti le stesse opportunità di impiego del corrispondente materiale che si trova in natura, tenendo però in considerazione che possiede caratteristiche iniziali diverse, individuabili ad esempio, nel caso di materiale roccioso, attraverso indagini sui materiali litoidi e sulle formazioni geologiche interessate; queste caratteristiche sono influenzate sia dalla tipologia di scavo che dall'eventuale presenza di minerali pericolosi o contaminanti, e necessitano quindi di differenti processi di trattamento.

L'interesse per il reimpiego di tale risorsa, sia in forma tal quale e sia trasformata in aggregato lapideo, è di assoluta attualità in quanto la disponibilità di materie prime vergini è notevolmente diminuita a seguito del considerevole sfruttamento avvenuto in passato delle risorse naturali: la qualità stessa degli aggregati riciclati prodotti viene accertata mediante l'assegnazione del marchio CE, e ciò conferma le enormi potenzialità di questa tipologia di materie prime secondarie.

In fase preliminare ai fini progettuali ed in fase costruttiva ai fini conoscitivi diretti, vengono effettuate indagini di tipo geognostico (rilievi geologici, geostrutturali, sondaggi, etc), geofisico (da superficie, da sottterraneo, in foro) ed idrogeologico con lo scopo di supportare le scelte in termini di tecnologia di scavo e di scelta del sostegno.

Le caratteristiche ricercate nel materiale prima e dopo lo scavo sono di tipo petrografico, geomeccanico, fisico e tecnologico; tra le principali ricordiamo la resistenza meccanica, la deformabilità, la resilienza, l'abrasività, la porosità, la capacità di assorbimento d'acqua, la gelività, la lavorabilità.

Le tecniche di scavo nelle gallerie sono essenzialmente di due tipi:

- scavo tradizionale;
- scavo meccanizzato.

Lo scavo tradizionale, o convenzionale, viene generalmente realizzato mediante l'asportazione del terreno per via meccanica tramite l'utilizzo di martelli demolitori, frese meccaniche, benne, oppure attraverso l'abbattimento con esplosivo dei fronti di scavo: la tecnica migliore viene scelta in base alle caratteristiche meccaniche del materiale da scavare.

Nel caso di operazioni meccanizzate, puntuali o a piena sezione, l'asportazione del terreno avviene tramite macchine operatrici continue, che avanzano facendo contrasto sulla volta della galleria e che sono rivestite, quando necessario, da uno scudo metallico con lo scopo di garantire la stabilità della volta: sono le cosiddette "talpe meccaniche".



Fig. 8.14: Esempio di “talpa meccanica”

Successivamente lo smarino, dopo essere stato condotto fuori dalla galleria, viene depositato o in apposite aree all'interno del cantiere, o trasportato in siti prescelti per lo stoccaggio provvisorio e per la caratterizzazione, secondo quanto previsto dalla legge L. 443/2001, meglio conosciuta come Legge Lunardi [48].

Il riutilizzo dello smarino può essere condizionato da varie fonti di inquinamento, e tra le principali ricordiamo gli interventi di stabilizzazione, la tecnologia di scavo, o cause esterne.

In particolare il pre-sostegno della volta, che avviene generalmente mediante centine metalliche spruzzate con del calcestruzzo proiettato (*spritz beton*), produce dei materiali di sfrido, che possono inquinare il terreno scavato (smarino).

Gli interventi di consolidamento, hanno lo scopo di migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno prima dello scavo, attraverso l'iniezione di malte cementizie oppure la messa in opera di chiodature. Le malte, di per sé, sono materiali inerti, quindi non inquinanti, ma possono contenere resine chimiche, additivi o silicati, utilizzati per migliorarne l'efficienza. Le chiodature, realizzate in vetroresina, possono contribuire invece all'inquinamento dello smarino solo quando sono applicate al fronte dello scavo. Un'ulteriore fonte di inquinamento può nascere da cause esterne, come ad esempio il traffico veicolare su una strada vicina (o sulla stessa strada nel caso si tratti di un intervento di allargamento) oppure altre attività produttive situate nella zona limitrofa. Nel caso si utilizzi una tecnica di scavo con esplosivo, i residui della combustione possono contaminare lo smarino.

I materiali di scavo dovranno inoltre essere separati da eventuali coltri vegetali, sostanze

organiche, rifiuti ed agenti contaminanti, come ad esempio amianto, uranio, radon; in questi casi si adotteranno delle ben precise procedure operative [23].

Secondo l'attuale classificazione dei materiali con amianto, ad esempio, le rocce e le terre derivanti da scavo di gallerie non sono considerati rifiuti fino a quando la concentrazione di sostanza inquinante o pericolosa non si pone al di sopra di un certo limite consentito dalla legge; in caso contrario lo smaltimento del materiale di risulta dovrà essere realizzato in accordo con la normativa sui rifiuti speciali, tossici e nocivi.

Nel caso di scavi in presenza di ammassi rocciosi con minerali uraniferi, invece, dovrà essere eseguito il controllo con spettrometria gamma del materiale roccioso frantumato (smarino) mirato a valutare quantitativamente il contenuto di radioattività del materiale stesso, prima che questo sia allontanato dalla galleria; può anche essere presente il Radon, originato dai minerali uraniferi della crosta terrestre.

Una volta che ci si è accertati che non si tratti di rifiuti pericolosi, i suddetti materiali possono essere riutilizzati con ricollocazione in altro sito per reinterri, riempimenti, ad esempio di cave coltivate, rilevati e macinati ed altri impieghi, ma solo dopo una preventiva analisi delle proprietà fisiche e meccaniche dello smarino tal quale, e dopo l'esito favorevole delle prove di laboratorio, che comprendono l'analisi granulometrica e la determinazione delle caratteristiche meccaniche (contenuto d'acqua, limite liquido e limite plastico, prove di compattazione), dopo eventuali trattamenti di frantumazione e vagliatura. Non è sempre possibile infatti il riutilizzo nell'ambito del cantiere di produzione, perché la tipologia di opera/lavoro non prevede l'uso dei materiali prodotti, o perché non è detto che le prescrizioni di progetto consentano il riutilizzo degli stessi.

8.3.3 Normativa relativa alle terre e alle rocce da scavo

Relativamente alle terre e alle rocce da scavo, l'art. 186 del Testo Unico in Materia Ambientale, attenendosi alle indicazioni contenute nell'art. 8 (comma 1, lettera f-bis), del D. Leg.vo 22/1997, ribadisce che il materiale proveniente anche da gallerie ed i residui di lavorazione della pietra non sono da considerarsi rifiuti se destinati all'effettivo riutilizzo per reinterri, riempimenti, rilevati e macinati, *“e sono, perciò, esclusi dall'ambito di applicazione della parte quarta del presente decreto solo nel caso in cui, anche quando contaminati, durante il ciclo produttivo, da sostanze inquinanti derivanti dalle attività di escavazione, perforazione e costruzione siano utilizzati, senza trasformazioni preliminari, secondo le modalità previste nel progetto sottoposto a valutazione di impatto ambientale ovvero, qualora il progetto non sia sottoposto a*

valutazione di impatto ambientale secondo le modalità previste nel progetto approvato dall'autorità amministrativa competente, ove ciò sia espressamente previsto, previo parere delle Agenzie regionali e delle Province autonome per la protezione dell'ambiente", sempre che la concentrazione di inquinanti non superi i limiti di accettabilità stabiliti dalle norme vigenti [48].

Tale condizione implica però che non vi sia una trasformazione preliminare del materiale scavato, e che si verifichi l'effettivo riutilizzo secondo le modalità previste nel progetto sottoposto a VIA o, qualora non sottoposto a VIA, almeno secondo il progetto autorizzato da autorità competente, previo parere dell'ARPA.

In questo caso quindi non è necessaria l'osservanza delle condizioni previste per i depositi temporanei, né l'autorizzazione per il deposito preliminare. Per trasformazione preliminare deve intendersi, ad esempio, un qualsiasi trattamento che abbia lo scopo di alterare il contenuto medio degli inquinanti, oppure anche la semplice operazione di vagliatura finalizzata ad ottenere da un ammasso più ammassi aventi percentuali di inquinanti diverse rispetto a quello originario.

Non sono invece da intendersi come trasformazioni preliminari, ad esempio, la vagliatura, il lavaggio, la riduzione volumetrica, l'essiccazione di materiale mediante stendimento al suolo ed evaporazione, oppure la stabilizzazione geotecnica mediante trattamento a calce o a cemento.

La frequenza della verifica del rispetto dei limiti va condotta ogni qualvolta si verificano variazioni del processo di produzione o della natura dei materiali di scavo (art. 186, comma 4) [48].

Qualora, al momento della produzione delle rocce e terre non sia possibile il loro immediato riutilizzo, l'art.186, comma 8, prevede che queste si possano conservare in un apposito sito, anche esterno al luogo di produzione, indicando tipologia e quantitativo del materiale, per un periodo massimo di 6 mesi con possibilità di proroga. Come limiti massimi di concentrazione di inquinanti, continuano ad essere validi i valori indicati nell'Allegato 1, tabella 1, colonna B, del D.M. 471/1999, "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del D. Leg.vo 5.2.1997, n. 22, e successive modificazioni e integrazioni".

Delle importanti novità sono state apportate con il D. Lgs. n. 04/2008, che modifica profondamente l'articolo 186, prevedendo a tutti gli effetti una nuova modalità di gestione delle "Terre e Rocce da Scavo", relativamente a tutte attività che comportano

l'allontanamento degli stessi, nonché il ricevimento di materiali per il reinterro [48].

La normativa in questione presenta i seguenti aspetti fondamentali:

- La competenza per le verifiche è Comunale, fermo restando la possibilità di richiedere parere ad ARPA per i casi complessi o ritenuti tali: la responsabilità della gestione ricade ora sugli attori coinvolti a vario titolo nello scavo e nella movimentazione delle terre e delle rocce che ne derivano.
- Per ogni tipologia di lavoro che richieda scavi o riporti di qualsiasi natura, il Progettista dovrà produrre il cosiddetto *progetto di gestione delle terre e rocce da scavo*, formato da una relazione tecnica, un elaborato grafico, eventuali analisi di campioni a sostegno del progetto, prospetto informativo e dichiarazioni.
- La relazione tecnica dovrà dimostrare:
 - ✓ che il materiale sia impiegato direttamente per opere o interventi preventivamente individuati e definiti;
 - ✓ sin dalla fase della produzione vi sia certezza del suo utilizzo integrale;
 - ✓ l'impiego integrale del materiale destinato al riutilizzo sia possibile senza un preventivo trattamento o qualsiasi trasformazione che ne alteri i requisiti merceologici e di qualità ambientali, affinché possa spontaneamente rientrare nei limiti di legge consentiti, in relazione alle emissioni e agli impatti ambientali per il sito nel quale verranno utilizzate;
 - ✓ sia garantito un elevato livello di tutela ambientale;
 - ✓ sia accertato che non provengono da siti contaminati o sottoposti ad interventi di bonifica;
 - ✓ le loro caratteristiche chimiche e chimico-fisiche siano tali che il loro impiego nel sito prescelto non determini rischi per la salute e per la qualità dell'ambiente interessato, nel rispetto delle norme di tutela delle acque superficiali e sotterranee, della flora, della fauna, degli habitat e delle aree naturali protette. In particolare deve essere dimostrato che il materiale da utilizzare non sia contaminato, ma compatibile con il sito di destinazione;
 - ✓ sia dimostrata la certezza dell'utilizzo integrale.

Si ricorda inoltre che il D. Lgs. 152/2006 aveva previsto alcune semplificazioni amministrative delle procedure per i cantieri di piccole dimensioni (<6000 m³); purtroppo con l'entrata in vigore del nuovo Decreto, non ci sono eccezioni per i piccoli cantieri, pertanto la procedura deve ritenersi valida per qualsiasi attività di

movimentazione di materiale di scavo, fatto salvo il caso in cui si proceda al “riutilizzo in sito”.

Un'altra importante novità è stata apportata col D.L. n.185/2008, art.20, successivamente convertito in legge n.2/2009, che inserisce tra i materiali esclusi dall'applicazione della disciplina sui rifiuti (art.185 del D.lgs. 152/06), le terre e rocce da scavo non contaminate utilizzate nel sito di produzione; detti materiali non costituiscono quindi rifiuto e conseguentemente non sarà più necessario prevedere la redazione di un espresso progetto.

Nel caso invece in cui il materiale sia utilizzato al di fuori del cantiere di produzione, continuano ad applicarsi le regole della normativa vigente.

8.4 Materiale recuperato in sito

Tra le materie prime secondarie più utilizzate per il riciclaggio delle pavimentazioni stradali (come già abbiamo avuto modo di vedere nei precedenti capitoli) ricordiamo in primis il “materiale recuperato in sito”; con questa definizione intendiamo sia il materiale proveniente dalla scarifica degli strati legati delle vecchie pavimentazioni, che i materiali di sottofondo o fondazione già presenti in sito, che possono essere successivamente stabilizzati.

8.4.1 Il materiale fresato

La manutenzione stradale, ordinaria e straordinaria comporta interventi di minor o maggior entità, al fine di garantire l'integrità delle infrastrutture; in alcuni casi è prevista la rimozione degli strati ammalorati mediante fresatura, con il conseguente accumulo di materiale di risulta, comunemente denominato *fresato* (o anche conosciuto come *Reclaimed Asphalt Pavement*).

Per fresato si intende un materiale solido contenente aggregati lapidei, che presentano una curva granulometrica caratterizzata da un'elevata percentuale di inerti di piccola pezzatura (fini), e bitume invecchiato; esso si ottiene dalla fresatura o frammentazione a blocchi di strati di una pavimentazione ammalorata. Può quindi essere considerato come un materiale inerte bitumato e non consolidato.

Inoltre è bene precisare la differenza tra fresato e RAP: per “*fresato*” intendiamo il materiale prodotto dalla dismissione con macchine fresatrici a tamburo, preferibilmente a freddo o con un leggero preriscaldamento, tale da non compromettere il legante presente; per “*RAP*” invece intendiamo il materiale risultante dalla dismissione, con

qualsiasi mezzo, ripper, escavatore o martello demolitore, e successiva frantumazione degli strati bituminosi delle pavimentazioni degradate. Le due differenti modalità di demolizione della sovrastruttura, sono anche citate negli articoli Art. 1.1 e 1.2 delle “NORME TECNICHE D’APPALTO PRESTAZIONALI” (AUTOSTRADE SPA, 2004).

La scelta della successiva destinazione d’uso del fresato, costituito da materiali pregiati, ossia aggregati lapidei e legante bituminoso invecchiato, è una questione di notevole rilevanza della quale si sono occupati per molto tempo i ricercatori e gli operatori del settore stradale. Per questo motivo l’opzione di messa a discarica del conglomerato bituminoso fresato, peraltro caratterizzata dai più elevati costi operativi ed ambientali, viene oggi accantonata a vantaggio di alternative che prevedono il riciclaggio nelle pavimentazioni stradali stesse, dando soluzione ad un problema di “macro-scala”.

Tuttavia in Italia la quantità di materiale fresato riutilizzato è ancora troppo bassa, con una percentuale di reimpiego che si aggira attorno al 15%, rispetto a percentuali molto più elevate di altri paesi Europei, che arrivano addirittura al 100%.

Le tecniche analizzate fin’ora sono il riciclaggio a caldo, a freddo e a tiepido, a seconda delle esigenze che devono essere soddisfatte per ogni singolo caso; certo è che la tendenza degli ultimi decenni è rivolta proprio alla salvaguardia ambientale che si concretizza con il risparmio energetico, l’eliminazione dei fattori inquinanti e la tutela di risorse non rinnovabili; non va però dimenticato che questo tipo di approccio non solo ha dei vantaggi sotto l’aspetto “ecologista”, ma anche da un punto di vista più “pratico ed economico”, in quanto tende al risparmio sui costi dei materiali, alla riduzione delle apparecchiature, alla diminuzione dei tempi operativi, con conseguente snellimento del traffico: e proprio per questo motivo le miscele a caldo vengono sempre meno preferite.

Difatti nel caso di riciclaggio a caldo, ed in particolare in situ, abbiamo già avuto modo di vedere come le emissioni di fumi nocivi, e l’eccessivo ingombro dei mezzi operativi, ne rendevano impraticabile l’operatività su piccole e medie strade. Col passare del tempo, quindi, sono stati sempre più approfonditi gli studi relativi al riciclaggio a freddo, con emulsioni bituminose o bitume schiumato: ciò è stato possibile grazie alla progettazione di speciali macchine fresatrici-riciclatrici, che non avendo il forno mescolatore, assumevano (ed assumono tutt’oggi) dimensioni notevolmente ridotte, permettendo così un’operatività anche su strade provinciali, comunali, consortili. Il naturale processo evolutivo ha aperto la strada anche alle nuove tecnologie tiepide, che

eliminano la gran parte degli svantaggi delle tecniche a caldo, sia dal punto di vista ambientale che pratico ed economico, ma anche le difficoltà che le tecniche a freddo presentano a causa del ricoprimento non ottimale degli aggregati da parte del legante (difatti le emulsioni non rivestono completamente le pezzature più grossolane, mentre il bitume schiumato è particolarmente efficace solo sulle frazioni fini) e sulla conoscenza dell'effettiva durata delle miscele a lungo termine: le tecnologie tiepide rappresentano dunque un ottimo punto di incontro delle tradizionali tecniche di riciclaggio.

Gli impianti di cui ci si avvale per realizzare conglomerati bituminosi con materiale di recupero, possono essere di tipo fisso o di tipo mobile; nel primo caso, la produzione può essere di tipo continuo o discontinuo, per tutte e tre le tecniche produttive, apportando solo delle piccole modifiche che permettano l'utilizzo del RAP; nel secondo caso invece vengono impiegati dei gruppi di attrezzature semoventi, i cosiddetti "treni", appositamente progettati per il riciclaggio, che procedono lungo la pavimentazione stradale, eseguendo le operazioni di scarifica, miscelazione e stesa: questa seconda tipologia di impianto è però presente solo per le tecniche a caldo e a freddo, mentre per le tecniche a tiepido dovremo ancora aspettare, e ciò ne determinerà definitivamente la massima efficienza.

Per entrambe le tipologie di impianto (fisso o mobile), ove necessario, la componente lapidea delle miscele riciclate a freddo potrà essere integrata con l'aggiunta di aggregati di primo impiego, detti per l'appunto *aggregati di integrazione*.

Sulla base di studi preliminari, al momento, ci si può aspettare di procedere alla rigenerazione della pavimentazione non meno di 3-4 volte; a tale riguardo va nuovamente ribadita l'importanza dei materiali costituenti la miscela originaria in quanto dalla loro qualità e quantità, forse più che da quelle dei materiali di aggiunta per la rigenerazione, dipende la possibilità di replicare n volte gli interventi di riciclaggio.

Diventa fondamentale il ruolo dei produttori dei materiali di partenza, specialmente del legante, che deve garantire elevate prestazioni nel tempo, soprattutto rispetto al traffico e agli agenti atmosferici; anche gli inerti però devono possedere determinate caratteristiche di qualità per essere riutilizzati, ed in particolare non dovranno produrre troppi fini durante le operazioni di scarifica stradale, specialmente se si tratta di un riciclaggio per strati drenanti fonoassorbenti: in questo caso le tipologie di inerti che meglio resistono sono basaltici e porfirici.

Relativamente al legante, esso viene riutilizzato completamente e addizionata una piccola quantità di bitume nuovo contenente un rigenerante: ne conseguono notevoli

risparmi anche sui prodotti di distillazione petrolifera, sui costi di trasporto e sui combustibili necessari per il confezionamento del conglomerato nuovo; anche i tempi operativi sono notevolmente ridotti e ciò favorisce uno snellimento del traffico sulle strade interessate dagli interventi di manutenzione.

Col tempo infatti il bitume subisce un invecchiamento e quindi una trasformazione chimica che ha inizio già dalle fasi di confezionamento e stesa del conglomerato e prosegue nel tempo in maniera continuativa, a causa del traffico e degli agenti atmosferici, come ad esempio il gelo e la neve.

Il legante risente anche di un invecchiamento fisico, che ha come diretta conseguenza un aumento della viscosità e quindi una maggior fragilità; mediante prove di laboratorio si è constatato col passare del tempo una diminuzione della penetrazione, nonché un aumento della temperatura di Palla Anello (P.A.) [34].

La rigenerazione del bitume è pertanto affidata a due circostanze fondamentali: il bitume nuovo aggiunto al vecchio deve essere ad alta penetrazione, per ovviare all'invecchiamento fisico, ma deve contenere determinate componenti aromatiche perse dal legante originario: ciò è facilmente rilevabile anche dall'analisi chimica effettuata su campioni, realizzata con il metodo delle separazioni nelle frazioni SARA (Saturi, Aromatici, Resine, Asfalteni) dove si nota una discreta diminuzione della percentuale aromatica già nella fase della lavorazione e stesa. Difatti il bitume si distribuisce attorno all'inerte attraverso una pellicola sottile, subendo un riscaldamento localizzato che lo porta a perdere la sua frazione leggera.

Chiaramente nella scelta del nuovo bitume intervengono svariati fattori, tra cui le caratteristiche del bitume di partenza, il trattamento termico subito durante la stesa, la composizione del conglomerato e la sua funzione all'interno del pacchetto stradale, il tempo di invecchiamento, le condizioni climatiche.

In ogni caso i criteri seguiti nella “progettazione” di un intervento di riciclaggio, possono essere diversi a seconda del Capitolato che viene considerato, tra cui i più importanti sono quello dell'ANAS, della Società AUTOSTRADE PER L'ITALIA SPA e del MIT (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), che come avremo modo di vedere in seguito si stanno sempre più avvicinando ad un approccio di tipo “prestazionale”, rispetto al più tradizionale approccio di tipo “prescrizionale”.

8.4.2 Stabilizzazione in sito

Il riciclaggio, oltre agli strati più superficiali della pavimentazione stradale, che si

identificano con gli “strati legati”, può interessare anche strati più profondi, normalmente “non legati”.

Ricordiamo brevemente che il pacchetto stradale è formato da uno strato di usura, uno strato di binder o di collegamento, e uno strato di base, costituiti da materiale legato, nello specifico con legante bituminoso (che per lo strato di base di una pavimentazione semirigida sarà invece di tipo cementizio); lo strato di fondazione successivo è invece formato da materiali inerti non legati.

Il riciclaggio in profondità è la tecnica più utilizzata nel caso in cui si debba effettuare un intervento strutturale, ossia di consolidamento di pavimentazioni preesistenti e deteriorate, con strati sovrastanti più o meno sottili: si parlerà in questo caso di “stabilizzazione in sito”.

Tecnicamente per stabilizzazione si intende un processo di trattamento che prevede l’apporto di leganti artificiali e/o naturali in modo che si abbia una modifica delle proprietà chimiche, fisiche e meccaniche del materiale trattato, ma soprattutto che siano durevoli nel tempo.

Negli ultimi anni si stanno diffondendo tecniche di stabilizzazione che prevedono l’utilizzo di leganti bituminosi, come emulsione e bitume schiumato, o idraulici, come calce e cemento, che possono essere combinati tra di loro o utilizzati singolarmente: avremo quindi stabilizzazioni con calce, con cemento, ma anche con calce-cemento, emulsione-cemento, bitume schiumato-cemento [16].

Relativamente all’analisi delle modalità operative dell’intervento, le stabilizzazioni vengono realizzate con macchine operatrici semoventi, che disposte in successione formano dei veri e propri treni, che svolgono tutte le fasi della lavorazione, dalla scarifica della vecchia pavimentazione alla compattazione dello strato finale (vedi “Treno di riciclaggio: composizione e modalità esecutive”, par. 6.3).

La scelta del tipo di stabilizzazione da effettuare, viene presa in base alle caratteristiche della fondazione e del terreno di sottofondazione, ai macchinari a disposizione, alle possibilità di reperimento dei leganti da utilizzare, ma soprattutto al risultato finale che si vuole raggiungere: lo scopo è quello di migliorare le caratteristiche meccaniche dei materiali (soprattutto in termini di resistenza e portanza) che dimostrano scarse qualità per l’utilizzo a cui sarebbero destinati.

La tecnica della **stabilizzazione a calce** viene utilizzata in presenza di terre incoerenti o scarsamente portanti, tipicamente argillose, per conferire loro un miglioramento delle caratteristiche meccaniche.

Grazie all'uso di questo tipo di legante diminuisce, difatti, l'indice di plasticità, si verifica un miglioramento delle caratteristiche meccaniche (sfruttando soprattutto l'interazione tra le particelle umide dell'argilla e la calce), si riducono marcatamente i fenomeni di rigonfiamento ed essiccamento conseguenti alle variazioni di umidità, migliorano le caratteristiche di resistenza (soprattutto a taglio e a fatica) e aumenta la capacità portante del piano trattato (grazie anche allo sviluppo della reazione di idratazione della calce che porta ad un indurimento dell'impasto), sia a breve sia a lungo termine, sotto le azioni cicliche veicolari anche in presenza di acqua.

Il campo di applicazione è molto esteso: con la stabilizzazione a calce si interviene per migliorare le condizioni di strade di campagna, le capacità portanti dei piani di posa dei rilevati stradali, per la costruzione del corpo stradale, per sottofondi (formazione e risanamento) e per fondazioni stradali (formazione e risanamento) [6].



Fig. 8.15 - 8.16: Macchinari per la stabilizzazione a calce

Le fasi necessarie per effettuare una stabilizzazione di questo tipo consistono nella scarificazione e polverizzazione della terra in sito, nel successivo spandimento della calce e dell'acqua, nella miscelazione e nella finale compattazione; una volta che la maturazione è stata completata viene effettuata l'esecuzione degli strati sovrastanti, previa verifica della regolarità superficiale, profondità di mescolazione e densità del secco; vengono poi valutati il modulo di deformazione M_d , l'indice CBR e le caratteristiche meccaniche sul materiale prelevato in sito, che dovranno risultare non inferiori a quelle di progetto.

La tecnica della **stabilizzazione a cemento** viene utilizzata invece per migliorare la capacità portante delle fondazioni stradali che presentano una stabilità compromessa in seguito a profonde deformazioni della sovrastruttura stessa, o più in generale per migliorare le prestazioni dei materiali componenti; l'aggiunta di cemento permette infatti di aumentare la resistenza dello strato finale, spesso realizzando un prodotto addirittura superiore ai misti cementati che ormai da anni vengono prescritti come

fondazione nelle strade ad elevato traffico pesante.



Fig. 8.17: Macchinario per la stabilizzazione a cemento

Le applicazioni sono limitate ai terreni sabbiosi con granulometria continua; dopo la fase di miscelazione e compattazione si hanno in tempi brevi elevate resistenze a causa di veri e propri fenomeni di presa.

Uno dei maggiori problemi con cui ci si deve confrontare quando si opera con materiali trattati con cemento è l'inevitabile formazione di fessure da ritiro. Il grado di fessurazione e la qualità complessiva degli strati stabilizzati sono prevalentemente condizionati da fattori chiave, come lo studio della miscela, la qualità ed il tipo di cemento utilizzati, l'aggiunta della giusta quantità di acqua, l'uniformità di applicazione ed un'attenta fase di maturazione che eviti la completa asciugatura della superficie (mediante spruzzaggio frequente con acqua o con l'applicazione di un impermeabilizzante provvisorio).

Le due tecniche fin'ora considerate possono anche essere utilizzate contemporaneamente (*con calce e cemento*): difatti se un materiale da stabilizzare, di cui si voglia aumentare la resistenza, possiede anche una certa quantità di particelle limo-argillose può essere utile combinare all'azione del cemento gli effetti positivi che derivano dall'utilizzazione della calce stessa. Molti progetti di risanamento stradale prevedono, per l'appunto, la stabilizzazione a calce dei piani di posa e successivamente il recupero dei materiali asportati che vengono riposizionati nella trincea di scavo e stabilizzati a cemento per formare una nuova fondazione stradale.

Anche la stabilizzazione delle terre con calce e/o cemento necessita però di uno studio preliminare in laboratorio, per definire al meglio il quantitativo "ottimale" di calce e/o cemento da miscelare con il materiale presente in sito e la percentuale ottimale di acqua da aggiungere in fase di miscelazione.

Relativamente alla **stabilizzazione con bitume schiumato e cemento**, ricordiamo brevemente il processo che dà origine a questo tipo di legante. Il bitume caldo, alla temperatura di circa 160 -180°C, viene miscelato in un'apposita camera di espansione con una piccola quantità d'acqua fredda, trasformandosi in una sostanza schiumosa; quando le particelle d'acqua vengono a contatto con il bitume caldo, l'energia termica del bitume stesso viene trasmessa all'acqua.

Non appena la temperatura di quest'ultima raggiunge il punto di ebollizione, si verifica un cambiamento di stato: difatti si creano delle bolle piene di vapore acqueo che vengono ricoperte da un sottile film di bitume.

Allo stato "schiumato", ossia in uno stato temporaneo di bassa viscosità, il bitume può essere aggiunto e mescolato con aggregati a temperatura ambiente, anche in presenza di umidità in sito.

Normalmente anche con questa tecnica vengono addizionate piccole quantità di cemento, calce o altro materiale similmente fine (passante al 100% al setaccio da 0,075 mm). L'aggiunta di questi tipi di filler "attivi", oltre a migliorare la capacità di mantenimento della resistenza dopo il contatto con l'acqua, aumenta la frazione del materiale minore di 0,075 mm, contribuendo anche a disperdere meglio il bitume: ciò è indubbiamente vantaggioso, soprattutto se il materiale riciclato presenta una carenza di fini.

Alcune ricerche hanno evidenziato come i filler attivi (e in particolare il cemento), oltre ad integrare il filler naturale, creino sulla superficie delle particelle, delle irregolarità alle quali le goccioline di bitume tendono ad aderire; inoltre migliorano la lavorabilità della miscela e ne riducono l'indice di plasticità.

Il bitume schiumato può essere usato come legante con i più svariati materiali, che spaziano dagli aggregati lapidei di qualità ottenuti per frantumazione, fino alle ghiaie di qualità più scadente con un certo grado di plasticità.

La stabilizzazione con bitume schiumato ha il vantaggio di ridurre i costi sostenuti per il trasporto, ma anche di annullare quelli di produzione (l'unico investimento è quello richiesto inizialmente per l'acquisto delle attrezzature); inoltre il materiale trattato con questo tipo di legante rimane lavorabile per lunghi periodi e di conseguenza può essere stoccato anche in condizioni climatiche avverse senza che il bitume venga dilavato dagli aggregati; infine è un legante che si presta bene anche per il trattamento di materiali in sito con tenori d'umidità relativamente alti, in quanto il legante può essere aggiunto senza acqua supplementare.

Anche le **emulsioni bituminose**, infine, si prestano per la stabilizzazione in sito.

Questo tipo di legante, come sappiamo, è composto da due liquidi immiscibili, uno nella fase dispersa, sottoforma di piccole goccioline (bitume), l'altro nella fase continua (acqua).

Grazie alla presenza di una sostanza attiva in superficie, un emulsionante, le particelle di bitume non possono raggrupparsi: attorno alle particelle stesse si forma un film protettivo, che genera delle forze repulsive tra di loro, mantenendole disperse nella fase acquosa continua.

Successivamente alla miscelazione con il materiale, l'acqua viene eliminata e le particelle di bitume si aggregano, formando una pellicola ininterrotta che si deposita sulla superficie dell'aggregato, rivestendolo, e dando origine al processo di "rottura" dell'emulsione; infine si verifica la presa, ossia la fase in cui il bitume perde l'acqua rimasta al suo interno (in primo luogo per evaporazione), si stringe sempre più intorno all'inerte fino ad aderirvi completamente, determinando l'aumento della rigidità e della resistenza a trazione dello strato stabilizzato con l'emulsione bituminosa.

Una miscela stabilizzata con un'emulsione deve soprattutto dissipare l'acqua in eccesso, ossia maturare, affinché la sua resistenza aumenti. Anche se taluni materiali stabilizzati con emulsione bituminosa possono acquisire la loro piena resistenza in un breve periodo di tempo (un mese), nel caso di altri materiali la maturazione può durare anche più di un anno. La durata di tale periodo è influenzata dal contenuto d'umidità del materiale in sito, dalle interazioni chimiche fra emulsione e aggregati, dal clima locale (temperatura, precipitazioni e umidità atmosferica) e dalla percentuale di vuoti della miscela. L'aggiunta di cemento può non solo controllare o eliminare il rischio di una rottura impropria dell'emulsione (a causa dell'umidità della miscela stessa), ma anche aumentare in maniera significativa la velocità di acquisizione della resistenza. Da alcune ricerche è tuttavia emerso che l'aggiunta di un quantitativo superiore al 2% in massa influisce negativamente sulle proprietà a fatica dello strato stabilizzato. Per questa ragione la percentuale di cemento aggiunta è solitamente limitata all'1,5%, o al massimo ad un valore del 2%.

Due Capitolati molto importanti, delle società ANAS e AUTOSTRADE, descrivono alcune di queste tipologie di interventi.

Entrambe presentano le stesse considerazioni in relazione al materiale fresato e alla normativa che lo compete:

- *“I conglomerati bituminosi fresati dalle pavimentazioni, per brevità chiamati nel*

seguito “fresati” sono materiali provenienti da fresature dirette, a freddo o a caldo, o da demolizioni a blocchi di pavimentazioni preesistenti, sottoposte a successiva frantumazione. Essi vanno utilizzati o nei conglomerati bituminosi, con o senza altri materiali vergini, oppure per la costruzione di rilevati di qualsiasi tipo, per piazzole di sosta, rampe di conversione o d’uscita per usi di servizio o in condizioni di blocco stradale, allargamento di corsie d’emergenza, aree di parcheggio, d’atterraggio elicotteri ecc. e per tutte le sottofondazioni delle pavimentazioni”;

- *“...l’impiego definitivo del fresato deve rispondere a quanto prescritto dal decreto legislativo del 5 Febbraio 1997 n° 22. In particolare, la messa in riserva e l’impiego di fresato per gli usi sopra descritti, al di fuori dei conglomerati bituminosi, è subordinato all’esecuzione del test di cessione sul rifiuto eseguito sul materiale tal quale, secondo il metodo riportato in allegato n° 3 al Decreto Ministeriale del Ministero dell’Ambiente n° 72 del 5 Febbraio 1998”.*

Più nello specifico, nelle “LINEE GUIDA DI PROGETTO E NORME TECNICHE PRESTAZIONALI” dell’ANAS (2008), gli interventi di stabilizzazione in sito sono relativi alle seguenti lavorazioni:

- **Art 2.1.** Riciclaggio in sito mediante bitume schiumato (RBS): *“La lavorazione dello schiumato permette di riciclare in sito vecchie fondazioni (misti cementati ammalorati, misti stabilizzati da “potenziare” (in manutenzione) o per “creare” la fondazione con materiale in sito o con materiale di apporto)”.*
- **Art 2.5.** Misto cementato in sito (MCS): *“La stabilizzazione a cemento si applica in sito su vecchie fondazioni che possono comprendere anche una parte dello strato di imposta della sovrastruttura stradale; è possibile stabilizzare anche misti granulari di riporto; in tal caso non si devono usare materiali fresati contenenti bitume” [32].*

Anche nelle “NORME TECNICHE D’APPALTO PRESTAZIONALI” della società AUTOSTRADE SPA, del 2004, sono specificati dettagliatamente i possibili interventi di stabilizzazione in sito, relativamente alle fondazioni e ai sottofondi.

Dopo aver ricordato che *“I sottofondi sono le superfici d’appoggio normalmente non legate della pavimentazione ... per la costruzione dei rilevati e dei sottofondi è consentito l’impiego parziale o totale di materiali fresati che hanno superato i test di cessione secondo le prescrizioni del seguito. Nelle manutenzioni si useranno*

preferibilmente questi materiali di recupero fresati, mentre per nuove costruzioni richiedenti quantità non disponibili di questi ultimi, si useranno terreni naturali, seguendo le norme tecniche generali autostrade, edizione 1999”, il documento descrive gli interventi di stabilizzazione in sito:

- **Art.2.4.** FONDAZIONI LEGATE: RICICLAGGIO IN SITO DEL MISTO CEMENTATO E/O GRANULARE CON AGGIUNTA DI CEMENTO E ACQUA: *“La rigenerazione in sito a freddo viene realizzata mediante idonee attrezzature che consentono di miscelare in sito, anche in cassonetti ricavati da pavimentazioni preesistenti, il misto cementato per fondazione o il misto granulare costituenti la preesistente fondazione, con cemento ed eventuali inerti freschi ed acqua In alternativa si potranno usare materiali fresati di pavimentazioni bituminose”*.
- **Art 2.5.** FONDAZIONI LEGATE: RICICLAGGIO A FREDDO IN SITO DEGLI STRATI DI FONDAZIONE (LEGATI E NON LEGATI) MEDIANTE BITUME SCHIUMATO E CEMENTO (SOTTOBASE A SCHIUMA DI BITUME): *“La rigenerazione in sito a freddo viene realizzata mediante idonee attrezzature mobili (con miscelatore a volume variabile) che consentano di miscelare in sito la fondazione esistente, sia legata che stabilizzata granulometricamente (o la medesima integrata con materiale bituminoso fresato), con aggiunta di bitume schiumato, cemento, acqua e se necessario inerti freschi ... saranno anche utilizzabili i materiali fresati dagli strati superiori alla preesistente fondazione”*.
- **Art 2.8.** FONDAZIONI LEGATE : RICICLAGGIO A FREDDO IN SITO DI MATERIALI PREESISTENTI CON EMULSIONE BITUMINOSA MODIFICATA E CON AGGIUNTA DI CEMENTO PER LA FORMAZIONE DI STRATI DI FONDAZIONE: *“La rigenerazione in sito a freddo viene realizzata mediante idonee attrezzature che consentano di miscelare in sito misti cementati, misti granulari o altri materiali anche bitumati, preesistenti nel luogo, con emulsione bituminosa modificata e cemento, ed eventuali inerti freschi additivi ed acqua ... Gli inerti di integrazione devono provenire esclusivamente da frantumati di cava (frantumazione 100%) e conformi alle specifiche tecniche della miscela di base oppure da fresato degli strati superiori a quello trattato” [40]*.

8.5 Individuazione delle tipologie di rifiuto nella normativa attuale: Codici CER

La definizione di rifiuto è data dall'art.183 comma 1 del D.Lvo 152/2006: l'articolo definisce rifiuto “*qualsiasi sostanza od oggetto che rientra nelle categorie riportate nell'allegato A alla parte IV del presente decreto e di cui il detentore si disfi o abbia deciso di disfarsi, indipendentemente dal fatto che il bene possa potenzialmente essere oggetto di riutilizzo (diretto o previo intervento manipolativo)*”.

Tuttavia l'appartenenza ad una delle categorie riportate nell'allegato A, non è sufficiente per l'identificazione di un rifiuto, ma è necessaria anche la volontà del detentore di disfarsene.

Inoltre un oggetto diventa rifiuto quando non è più possibile reimpiegare lo stesso direttamente nel ciclo produttivo da cui proviene, e sussiste pertanto, la necessità da parte del produttore e/o detentore di disfarsene.

Per la classificazione dei rifiuti esiste un modello europeo di riferimento, denominato Catalogo Europeo dei Rifiuti, che attribuisce ad ognuno di essi un codice composto da 6 cifre (Codice Europeo Rifiuti, CER).

I rifiuti, suddivisibili secondo l'attuale normativa in rifiuti *speciali* (provenienti da attività produttive specifiche) e *urbani* (provenienti dalla raccolta dei rifiuti in ambito urbano), sono ulteriormente classificabili in *pericolosi* e *non pericolosi*: i secondi sono identificati graficamente con un asterisco “*” dopo le 6 cifre [5]. La *pericolosità* di un rifiuto viene determinata tramite analisi di laboratorio, volte a verificare l'eventuale superamento di valori di soglia individuati dalle Direttive, sulla classificazione, l'etichettatura e l'imballaggio delle sostanze pericolose stesse.

Il Catalogo Europeo dei Rifiuti fu istituito per la prima volta grazie alla Decisione CEE/CEEA/CECA n.3 del 20/12/1993, revisionato l'anno dopo con una nuova Decisione che individuò l'elenco dei rifiuti pericolosi, e definitivamente recepito in Italia con il D.Lgs n.22: nel decreto viene riportato nell'allegato A l'elenco dei rifiuti nella loro globalità, e nell'allegato D l'elenco dei rifiuti pericolosi.

Il Catalogo fu tuttavia soggetto ad aggiornamenti periodici, che ebbe la sua prima revisione nel 2000, con la Decisione 2000/532/Ce, e che determinò l'apposizione dell'“*” per caratterizzare la pericolosità del rifiuto.

Con il 1° Gennaio 2002 entra in vigore il nuovo Catalogo Europeo dei Rifiuti: vennero abbandonati 280 codici ed introdotti circa 470 ex-novo, di cui 260 riguardanti i rifiuti pericolosi: ciò avvenne con l'apporto di due nuovi provvedimenti:

- il *Dlgs 152/2006* (recante “Norme in materia ambientale”), allegato D, parte IV;

- il *Dm Ministero dell'ambiente del 2 maggio 2006* ("Istituzione dell'elenco dei rifiuti") emanato in attuazione del Dlgs 152/2006, allegato A.

Per l'assegnazione del corretto CER si eseguono i seguenti passi:

- si identifica la fonte che genera il rifiuto consultando i capitoli da 01 a 12 e da 17 a 20, ai quali corrisponde una possibile attività che lo genera;
- si ricerca all'interno del capitolo individuato precedentemente, il codice di 6 cifre che corrisponde al rifiuto;
- se non è stato possibile identificare il rifiuto utilizzando i codici dei capitoli suddetti, occorrerà analizzare i capitoli 13, 14, 15;
- se neanche in questi capitoli è stato possibile individuare il codice di riferimento, bisogna esaminare il capitolo 16; se infine anche questo non contiene un codice appropriato, il rifiuto viene identificato con un CER le cui ultime cifre sono 99 (rifiuti non altrimenti specificati) e le prime 4 cifre sono quelle che corrispondono ad una delle attività identificate al punto 1.

Ricordiamo che nelle sei cifre identificanti il codice CER, divise in tre gruppi da due, il primo gruppo è relativo al capitolo, ossia alle classi di attività generatrici dei rifiuti, come accennato prima; il secondo gruppo è relativo al sottocapitolo, ossia al processo produttivo da cui è stato originato o sub-attività che genera i rifiuti; il terzo gruppo è costituito dai codici che identificano il singolo rifiuto prodotto [12], [5].

In relazione al riciclaggio dei rifiuti nei materiali costituenti le pavimentazioni stradali, sono spesso oggetto di indagine solo alcune tipologie di rifiuto:

- materiali provenienti dalle attività di costruzione & demolizione;
- materiali provenienti dalle operazioni di demolizione e/o rifacimento delle pavimentazioni stradali (fresato).

Entrambe sono prevalentemente appartenenti alla macrocategoria CER 17.

I capitoli fondamentali dei codici CER sono i seguenti:

- 1) Rifiuti derivanti da prospezione, estrazione da miniera o cava, nonché dal trattamento fisico o chimico di minerali.
- 2) Rifiuti prodotti da agricoltura, orticoltura, acquacoltura, selvicoltura, caccia e pesca, trattamento e preparazione di alimenti.
- 3) Rifiuti della lavorazione del legno e della produzione di pannelli, mobili, polpa, carta e cartone.
- 4) Rifiuti della lavorazione di pelli e pellicce, nonché dell'industria tessile.
- 5) Rifiuti della raffinazione del petrolio, purificazione del gas naturale e

- trattamento pirolitico del carbone.
- 6) Rifiuti dei processi chimici inorganici.
 - 7) Rifiuti dei processi chimici organici.
 - 8) Rifiuti della produzione, formulazione, fornitura ed uso di rivestimenti (pitture, vernici e smalti vetrati), adesivi, sigillanti e inchiostri per stampa.
 - 9) Rifiuti dell'industria fotografica.
 - 10) Rifiuti prodotti da processi termici.
 - 11) Rifiuti prodotti dal trattamento chimico superficiale e dal rivestimento di metalli ed altri materiali; idrometallurgia non ferrosa.
 - 12) Rifiuti prodotti dalla lavorazione e dal trattamento fisico e meccanico superficiale di metalli e plastica.
 - 13) Oli esauriti e residui di combustibili liquidi (tranne oli combustibili ed oli di cui ai capitoli 05, 12 e 19).
 - 14) Solventi organici, refrigeranti e propellenti di scarto (tranne 07 e 08).
 - 15) Rifiuti di imballaggio, assorbenti, stracci, materiali filtranti e indumenti protettivi (non specificati altrimenti).
 - 16) Rifiuti non specificati altrimenti nell'elenco.
 - 17) Rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione (compreso il terreno proveniente da siti contaminati).
 - 18) Rifiuti prodotti dal settore sanitario e veterinario o da attività di ricerca collegate (tranne i rifiuti di cucina e di ristorazione non direttamente provenienti da trattamento terapeutico).
 - 19) Rifiuti prodotti da impianti di trattamento dei rifiuti, impianti di trattamento delle acque reflue fuori sito, nonché dalla potabilizzazione dell'acqua e dalla sua separazione per uso industriale.
 - 20) Rifiuti urbani (rifiuti domestici e assimilabili prodotti da attività commerciali e industriali nonché dalle istituzioni) inclusi i rifiuti della raccolta differenziata.

I codici CER servono per la compilazione del MUD (Modello Unico di Dichiarazione ambientale), che a sua volta rappresenta un'importante banca dati per la riorganizzazione del Catasto dei Rifiuti e dell'Osservatorio nazionale sui rifiuti [12].

CAPITOLO 9 - BREVE STORIA DEL QUADRO NORMATIVO ITALIANO IN TEMA DI RIFIUTI E MARCATURA CE

9.1 Dal Decreto Ronchi al D.Lgs 152/2006

Con la pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale del “*Decreto Legislativo n. 22 del 5 Febbraio 1997*”, si è dato il via ad una graduale e radicale riforma delle regole che disciplinano tutt’oggi il nostro paese [22].

Fino ad allora la legislazione italiana in materia di rifiuti, era stata particolarmente carente, e incapace di fronteggiare le più complesse situazioni di inquinamento ambientale che da lì a poco si sarebbero venute ad affacciare: il nuovo Decreto, che prese il nome dal Ministro dell’Ambiente Ronchi, offriva quindi una visione d’insieme organica sulla normativa del suddetto settore, prevedendo precisi obblighi di indirizzo, di pianificazione e di attuazione della politica di gestione dei rifiuti [12].

Il particolare il Decreto ha recepito ben tre Direttive Comunitarie:

- la 91/156/CEE sui rifiuti,
- la 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi,
- la 94/62/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti da imballaggio.

Come prima accennato, il Decreto regolamentava la gestione dei rifiuti, differenziandoli in *urbani e speciali, pericolosi e non pericolosi*, associando inoltre, come previsto dalla normativa da cui derivava, i codici CER per ogni tipologia di rifiuto (successivamente ripresi e modificati nel 2002) [38].

Tuttavia vennero ben presto apportate delle modifiche, prima con il provvedimento conosciuto come Ronchi Bis, D.Lgs.389 dell’8 Novembre 1997, e successivamente con il Ronchi Ter, Legge n.426 del 9 Dicembre 1998, che prevedeva nuovi interventi in campo ambientale.

Il D.Lgs. 22/97, con i suoi decreti attuativi (D.M. 5/02/98), recepiva totalmente il principio della gerarchia dei rifiuti, adottato a livello europeo, in cui le forme di **prevenzione**, dallo sviluppo di tecnologie pulite alla promozione di strumenti economici, dalle azioni di informazione e comunicazione agli accordi di programma, doveva essere privilegiata rispetto alle forme di gestione.

Una volta favorita la prevenzione, la politica di gestione esortava ogni attività di **recupero**, ossia qualsiasi forma di reimpiego e riciclaggio, che permettesse ai rifiuti di essere utilizzati come materie prime secondarie, o come combustibile o altro mezzo per produrre energia.

Infine l’intera gestione si concludeva con lo **smaltimento** (messa in discarica e

incenerimento), fase a questo punto necessaria ed inevitabile, ma che vantava il pregio di essere minimizzata grazie al potenziamento delle prime fasi della gestione.

Anche dopo il Decreto Ronchi, la disciplina si è comunque mostrata più complessa di quello che sembrava: proprio per questo si è fatto un tentativo di redarre un **TESTO UNICO** con il D.LGS. 3/4/2006, N. 152, che detta norme in materia ambientale (anche detto “Codice ambientale”) che disciplina: VAS, VIA e IPPC - Difesa del suolo e delle acque-Aria-Danno ambientale.

Venne introdotta poi una parte IV, “Norme in materia di gestione dei rifiuti e di bonifica dei siti inquinati”, che abrogava nel contempo diversi, ma non tutti, dei provvedimenti prima elencati; quindi il D.Lgs. 152/2006 costituisce, anche per i rifiuti, una sorta di “Testo Unico” [21].

Il Decreto entra in vigore il 29 Aprile 2006, e riprende in gran parte il vecchio Decreto Ronchi, ma vengono presto apportate alcune modifiche dal nuovo governo; nella sua parte quarta, Art.177 (Campo di applicazione), come prima accennato, si disciplina la gestione dei rifiuti e la bonifica dei siti inquinati anche in attuazione delle Direttive Comunitarie sui rifiuti, sui rifiuti pericolosi, sugli oli usati, sulle batterie esauste, sui rifiuti da imballaggio, sui policlorobifenili (Pcb), sulle discariche, sugli inceneritori, sui rifiuti elettrici ed elettronici, sui rifiuti portuali, sui veicoli fuori uso, sui rifiuti sanitari e sui rifiuti contenenti amianto.

Sono esenti dal regime dei rifiuti le terre e rocce di scavo (art.186), come già si stava delineando nella precedente Legge 443/2001, ma che ebbe difficoltà nell’affermarsi a causa delle successive limitazioni con l’art.23 L.306/2003.

Il D.Lgs.152/2006 non apporta novità nella definizione di rifiuto, ma introduce la nuova definizione (non prevista dal Ronchi) di *sottoprodotto*: i sottoprodotti sono i prodotti dell’attività dell’impresa che, pur non costituendo l’oggetto dell’attività principale, scaturiscono in via continuativa dal processo industriale della stessa e sono destinati ad ulteriore impiego e al consumo. I sottoprodotti non sono soggetti alla normativa sui rifiuti, se impiegati direttamente dall’impresa che li produce, o commercializzati dalla stessa, in modo economicamente vantaggioso, per il consumo o per un impiego da parte di terzi [21].

Per distinguere il *sottoprodotto* dal *rifiuto*, secondo la Corte di Giustizia dell’Unione Europea (CGUE), è necessario che il suo riutilizzo sia certo e che non ci si avvalga di sostanze chimiche o quant’altro per la sua modifica [38].

Sempre con il Decreto 152, si conferma la nozione di materia prima secondaria (MPS),

definita come “sostanza o materia avente le caratteristiche stabilite dall’art. 181” (Recupero dei rifiuti) che detta la disciplina per il suo utilizzo, in quanto prodotto direttamente dall’attività di recupero.

In questo importante percorso normativo, che va dal Decreto Ronchi al Decreto 152/2006, si ambisce dunque:

- all’autosufficienza nello smaltimento dei rifiuti urbani non pericolosi in ambiti territoriali ottimali;
- allo smaltimento dei rifiuti in uno degli impianti più vicini, minimizzando i movimenti dei materiali stessi;
- all’utilizzazione di metodi e tecnologie che garantiscano il più alto grado possibile di protezione dell’ambiente e della salute pubblica [21].

9.2 Marcatura CE: quadro d’insieme

La marcatura CE degli aggregati riciclati è finalizzata alla produzione di aggregati riciclati di elevato livello qualitativo, che soddisfino le richieste del mercato e che presentino costi inferiori rispetto agli aggregati naturali, col rispetto delle specifiche tecniche, in un’ottica di sostenibilità ambientale e di salvaguardia delle risorse naturali. Ricordiamo che per “Aggregato” si intende “Il materiale granulare utilizzato nella costruzione. L’aggregato può essere di origine naturale, artificiale, sottoprodotto o riciclato”.

La complessità della materia ha fatto sì che il quadro normativo di riferimento impiegasse diversi anni per svilupparsi. Il primo passo di questo sviluppo è stato effettuato il 1 Giugno 2004, stabilendo anche per gli aggregati, naturali, artificiali o riciclati che siano, l’entrata in vigore della direttiva 89/106 CE, recepita con il Regolamento d’Attuazione D.P.R. 246 del 21 aprile 1993, riguardante i prodotti da costruzione, e seguita dal Decreto n. 156 del 9 maggio 2003, che indicava i criteri e le modalità per il rilascio dell’abilitazione degli organismi di certificazione, ispezione e prova nel settore dei prodotti da costruzione [13].

La direttiva 89/106 CE e la normativa che a tal riguardo la completa, vertono sostanzialmente sull’obbligo di marcatura CE dei prodotti stessi, portando agli operatori del settore nuovi obblighi, ma anche nuove prospettive di innovazione ed evoluzione del mercato.

Gli obblighi da affrontare sono costituiti fondamentalmente dal controllo e dalla certificazione di qualità del prodotto, al fine di immettere sul mercato materiali

rispondenti a caratteristiche omogenee in tutta la UE: tali norme sono dette “norme armonizzate” proprio perché hanno l’obiettivo di armonizzare la regolamentazione delle caratteristiche dei prodotti da costruzione a livello di UE [13].

La verifica di avvenuta corrispondenza tra il prodotto e norma armonizzata, relativa al prodotto stesso, permetterà di apporvi il marchio CE, favorendone la sua libera commercializzazione in quegli stati membri per cui le specifiche di accettazione nelle opere cui sono destinati risultano soddisfatte.

Gli aggregati riciclati non si sottraggono alla direttiva: ciò è sicuramente un bene per quegli operatori del campo del riciclaggio di rifiuti che nel tempo hanno lavorato sulla qualità dei propri aggregati.

La possibilità di marcare CE il prodotto senza dubbio nobiliterà gli aggregati riciclati che, in un’ottica europea sono considerati al pari degli aggregati di origine naturale, a patto che rispondano agli standard definiti nelle norme armonizzate.

L’aumento del volume del mercato degli aggregati riciclati è auspicabile per gli operatori del settore e fornirà all’intera collettività la possibilità da una parte di limitare l’utilizzo di risorse naturali, quali terre e materiali lapidei provenienti da colture di cave, dall’altra di disincentivare il ricorso alla discarica per rifiuti, con notevoli vantaggi dal punto di vista ambientale e del territorio.

9.3 Dalla direttiva 89/106/CE alla marcatura CE degli aggregati riciclati

La Direttiva 89/106 individua i requisiti essenziali che i manufatti e le opere di costruzione e ingegneria civile devono soddisfare: possono essere infatti immessi sul mercato, quei prodotti da costruzione (in generale) che permettono alle opere in cui sono incorporati, di adempiere a determinati obblighi:

- resistenza meccanica e stabilità;
- sicurezza in caso di incendio;
- igiene, salute e ambiente;
- sicurezza nell’impiego;
- protezione contro il rumore;
- risparmio energetico e ritenzione di calore [13].

I requisiti essenziali enunciati dalla Direttiva sono stati poi oggetto di un intervento di ulteriore precisazione attraverso i “documenti interpretativi” che hanno anzitutto armonizzato la terminologia ed i concetti di base, nonché i metodi di calcolo e di prova,

creando un riferimento per la successiva emanazione di norme armonizzate.

L'attività di predisposizione delle norme armonizzate vere e proprie è stata poi svolta dal CEN (Comitato Europeo di Normalizzazione) il quale ha agito sulla base di un preciso incarico ricevuto dalla Commissione Europea, il c.d. Mandato.

Secondo il Mandato (M125) l'insieme delle proprietà degli aggregati da considerare per assicurare il rispetto dei requisiti essenziali era il seguente:

- dimensione, forma e massa delle particelle;
- pulizia;
- resistenza alla frammentazione-frantumazione;
- resistenza alla levigatura-abrasione;
- composizione chimica;
- stabilità volumetrica;
- assorbimento acqua;
- sostanze pericolose;
- durabilità al gelo;
- durabilità contro la reazione alkali-aggregato.

In base al Mandato ricevuto il CEN ha elaborato le seguenti norme (relative agli aggregati che, prima dell'immissione sul mercato nazionale-comunitario, devono riportare obbligatoriamente la marcatura CE):

- ❖ *EN 12620* Aggregati per calcestruzzi.
- ❖ *EN 13139* Aggregati per malte.
- ❖ *EN 13043* Aggregati per miscele bituminose e finiture superficiali per strade, aeroporti e altre aree trafficate.
- ❖ *EN 13242* Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade.
- ❖ *EN 13055-1* Aggregati leggeri per calcestruzzo, malta e malta da iniezione/boiacca.
- ❖ *EN 13055-2* Aggregati leggeri per miscele bituminose.
- ❖ *EN 13450* Aggregati per massicciate ferroviarie.
- ❖ *EN 13383-1* Aggregati per opere di protezione.

Le precedenti norme armonizzate emanate a livello europeo vengono recepite dagli stati membri attraverso i propri organismi di normazione [38]. Per l'Italia l'organismo di riferimento è l'UNI, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, che, oltre a partecipare con propri rappresentanti alle commissioni per l'elaborazione delle norme armonizzate,

traduce e pubblica le norme europee (EN). Le norme in questione, nella loro versione italiana, saranno dunque denominate UNI EN.

Segue poi l'attestazione di conformità, ossia la procedura mediante la quale viene dichiarata l'effettiva conformità di un prodotto alle specifiche tecniche delle norme armonizzate che lo riguardano.

Nel caso degli aggregati sono due i sistemi di attestazione possibili, relativamente alla sicurezza dell'opera:

- il **2+**: è indubbiamente il più restrittivo e destinato a trovare applicazione nelle opere che richiedono un elevato grado di sicurezza. È richiesta la dichiarazione di conformità rilasciata dal produttore, sulla base delle prove iniziali, ed inoltre l'intervento di un organismo notificato che, tramite una visita iniziale e una di sorveglianza annuale (continua), verifica e certifica il sistema di controllo del processo di produzione in impianto.
- il **4**: è relativo a tutte le altre applicazioni. È richiesta la sola dichiarazione di conformità rilasciata dal produttore, sulla base di prove iniziali e del controllo del processo di produzione effettuato sotto la propria responsabilità [29], [13].

Gli organismi notificati sono enti certificatori esterni, di natura pubblica o privata, che hanno la possibilità di rilasciare l'attestazione di conformità per determinate categorie di prodotti; l'elenco di tali organismi viene pubblicato con l'emanazione di Decreti Ministeriali dei Ministeri competenti (Interno, Sviluppo Economico ed Infrastrutture): i suddetti organismi interverranno solamente nel caso di attestazione di conformità di tipo 2+ [38].

Più nel dettaglio l'ITER per ottenere la marcatura CE degli aggregati nel sistema 2+ si compone dei seguenti passi:

- esame documentale da parte dell'Ente di Certificazione incaricato (di cui sopra): si tratta di una verifica del manuale predisposto dal produttore per il "Controllo di Produzione in Fabbrica" FCP;
- verifica ispettiva in campo da parte dell'ispettore:
 - ✓ rapporti delle Prove Iniziali di Tipo (ITT);
 - ✓ verifica dell'impianto di produzione;
 - ✓ verifica del sistema di controllo del processo produttivo;
- segnalazione di eventuali non conformità e osservazioni nel rapporto finale di verifica;
- trasmissione del rapporto al Comitato Tecnico presso l'Ente di Certificazione per

la valutazione e rilascio del certificato.

Il marchio CE è obbligatorio non solo per chi esporta il proprio prodotto nei Paesi della Comunità Europea, ma anche per chi lo commercializza solo all'interno della propria Nazione [38].

Il marchio indica solamente l'abilitazione del produttore ad immettere prodotti sul mercato e non va quindi confusa con un marchio di qualità né con un marchio di origine, ma rappresenta una notevole presa di responsabilità in quanto il produttore stesso è effettivamente responsabile dell'apposizione della marcatura, anche nel caso in cui intervenga un organismo esterno.

Tale certificato di marcatura, deve essere riportato sul documento di accompagnamento, o ad esso collegato, e dovrà contenere le seguenti informazioni:

- l'origine dell'aggregato;
- il produttore;
- il luogo di prima vendita, se è differente dal luogo di produzione;
- il N° di certificato del controllo di produzione, in caso di sistema 2+;
- il tipo petrografico dell'aggregato, secondo En 932-3;
- la classe granulometrica;
- le norme di riferimento;
- le eventuali condizioni particolari di utilizzazione;
- un rinvio ad uno, o più, fogli di informazioni sulla marcatura;
- il nome e la persona abilitata a firmare;
- la data e la firma.

9.4 Sostituzione della UNI EN 10006:2002

Il panorama normativo italiano concernente l'impiego di aggregati riciclati nelle opere di ingegneria civile e nelle costruzioni stradali ha subito, nel mese di Marzo del 2004, un radicale sconvolgimento a seguito del ritiro della norma tecnica di riferimento, UNI 10006:2002 (già CNR-UNI 10006:1963) "Costruzione e manutenzione delle strade- Tecniche di impiego delle terre".

Essa è stata sostituita dalle tre norme:

- UNI EN 13242:2004 (poi sostituita dalla UNI EN 13242:2008) "Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade". È la norma armonizzata di prodotto che fornisce le linee guida per la marcatura CE degli aggregati destinati

a miscele legate idraulicamente e non legate per usi stradali. Tale norma non dice nulla a proposito degli usi degli aggregati e tanto meno delle miscele cui essi sono destinati.

- UNI EN ISO 14688-1:2003 “Indagini e prove geotecniche - Identificazione e classificazione dei terreni - Identificazione e descrizione”. È una norma riguardante il riconoscimento “in situ” dei terreni e fornisce metodi manuali e visivi per la classificazione. Non esiste più la classificazione delle terre nei gruppi definiti dalla UNI 10006, e tanto meno esistono le indicazioni riguardanti gli usi delle terre fornite dalla vecchia norma.
- UNI EN 13285:2004 (poi sostituita dalla UNI EN 13285:2010) “Miscele non legate - Specifiche”. La norma specifica i requisiti per miscele non legate impiegate per la costruzione e la manutenzione di strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico, fornisce le indicazioni sulla classificazione della miscela in termini di dimensione del sopravaglio, caratterizza il fuso granulometrico relativo a ciascuna designazione ed indica i metodi per la determinazione dell’umidità ottimale di costipamento. Tale norma però non dà alcuna indicazione effettiva sulle proprietà fisiche e meccaniche che gli aggregati componenti la miscela devono possedere al fine di essere impiegati correttamente, rimandando (in un circolo vizioso) alla UNI EN 13242:2004.

Le nuove norme non trattano però alcuni argomenti legati alle tecniche di impiego, ad esempio cause e rimedi per le instabilità del corpo stradale, le opere di difesa dalle acque, la preparazione del sottofondo, la costruzione delle trincee.

Si occupano invece di:

- procedure per il saggio di alcune proprietà dei materiali granulari e modalità di espressione dei risultati;
- schema generale di classificazione dei terreni in posto.

Mancano inoltre prescrizioni sui controlli e sui valori ammissibili: a tal riguardo si è cercato di recuperare, aggiornandoli, gli argomenti della UNI 10006, non trattati nelle nuove norme.

9.5 UNI EN 13108: la marcatura CE dei conglomerati bituminosi

Dal 1° Marzo 2008 è divenuta obbligatoria la marcatura CE per i conglomerati bituminosi immessi sul mercato, con certificazione del sistema di controllo della produzione da parte di Ente notificato [1].

Le norme armonizzate di riferimento sono la serie UNI EN 13108, parti da 1 ad 8.

- ❖ **UNI EN 13108-1.** Miscele bituminose – Specifiche del materiale – Parte 1: Conglomerato bituminoso prodotto a caldo.
- ❖ **UNI EN 13108-2.** Miscele bituminose – Specifiche del materiale – Parte 2: Conglomerato bituminoso per strati molto sottili.
- ❖ **UNI EN 13108-3.** Miscele bituminose – Specifiche del materiale – Parte 3: Conglomerato con bitume molto tenero.
- ❖ **UNI EN 13108-4.** Miscele bituminose – Specifiche del materiale – Parte 4: Conglomerato bituminoso chiodato.
- ❖ **UNI EN 13108-5.** Miscele bituminose – Specifiche del materiale – Parte 5: Conglomerato bituminoso antisdrucchiolo chiuso.
- ❖ **UNI EN 13108-6.** Miscele bituminose – Specifiche del materiale – Parte 6: Asfalto colato.
- ❖ **UNI EN 13108-7.** Miscele bituminose – Specifiche del materiale – Parte 7: Conglomerato bituminoso ad elevato tenore di vuoti.
- ❖ **UNI EN 13108-8.** Miscele bituminose – Specifiche del materiale – Parte 8: Conglomerato bituminoso di recupero.

Le parti 1, 5, 7 e 8, sono di particolare importanza per il mercato italiano.

Le caratteristiche essenziali ai fini della marcatura CE sono riportate nel mandato M/124 “Prodotti per la costruzione di strade”.

La serie di Norme, che ha regolamentato le specifiche dei materiali per la costruzione delle pavimentazioni stradali flessibili, ha gettato le basi per l’individuazione delle proprietà fondamentali dei conglomerati bituminosi in funzione delle loro prestazioni in opera.

Si distinguono, infatti, due tipologie di approccio: *fondamentale* ed *empirico*.

L’indagine empirica (o approccio empirico), che avremo modo di analizzare più approfonditamente nel Capitolo 10, specifica il conglomerato bituminoso attraverso la sua ricetta costitutiva, andando a determinare parametri propri della miscela dai quali si possono dedurre le prestazioni del conglomerato bituminoso (requisiti della granulometria e del legante, più altri requisiti misurati con metodi di prova empirici).

L’indagine fondamentale (o approccio fondamentale) invece, specifica il conglomerato bituminoso in termini di requisiti prestazionali direttamente misurati, che possono essere correlati, a loro volta, con le caratteristiche compositive della miscela e con le proprietà dei materiali costituenti (per esempio rigidità, deformazione permanente in

cella triassiale e resistenza alla fatica).

La direttiva 89/106/CEE e il mandato M/124 hanno un approccio di tipo prestazionale. Per i conglomerati bituminosi tutte le norme di prodotto sono state elaborate seguendo il sistema empirico: solo per conglomerati bituminosi a caldo e conglomerati bituminosi chiodati è stato possibile inserire come alternativa anche il sistema fondamentale.

L'attuale Norma UNI EN 13108 non prevede differenze di applicazioni fra i due differenti metodi, ma si limita ad auspicare un graduale passaggio al metodo "fondamentale" una volta che i produttori avranno acquisito una maggiore esperienza sui metodi di prova prestazionali, legati a tecnologie più recenti rispetto alle metodologie tradizionali ed "empiriche".

Infine, tra le caratteristiche richieste ad un prodotto dalla norma, ricordiamo:

- resistenza allo slittamento; essa dipende da una serie di proprietà intrinseche della miscela, che verranno debitamente analizzate di volta in volta, e che determinano la macrotessitura e la microtessitura della pavimentazione stessa, dai metodi utilizzati per la posa in opera e la compattazione, da eventuali trattamenti e dalle condizioni climatiche;
- conducibilità idraulica; considerata pertinente solo per conglomerati ad alto tenore di vuoti (parte 7), essa ha cominciato ad essere "valutata" da quando si sono scoperti i vantaggi di questo tipo di pavimentazione, ed i benefici che essa aveva nei confronti della riduzione del fenomeno dell'acquaplaning, aumentando così la sicurezza stradale;
- assorbimento del rumore; le pavimentazioni drenanti possono anche avere un benefico effetto di riduzione del rumore generato dall'autovettura e dal contatto del pneumatico con la strada;
- durabilità; le caratteristiche di un prodotto devono mantenersi elevate per un considerevole periodo di tempo, soprattutto se le pavimentazioni in questione sono esposte a notevole traffico e agenti climatici (luce, acqua, ossigeno), e sono direttamente influenzate dalla progettazione strutturale, dalla composizione della miscela, dalle modalità di posa in opera e compattazione.

9.6 Rifiuti inerti e nuove prospettive per il riciclaggio: dalla legge n. 448/2001 e dal DM n.203/2003, alla circolare 5205 del 15 Luglio 2005

La Circolare del Ministero dell'Ambiente 15 Luglio 2005, n.5205, "*Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del decreto*

ministeriale 8 Maggio 2003, n. 203”, fornisce le indicazioni per rendere operativo nel settore edile, stradale e ambientale, il DM n.203/2003, “*Norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo*” [11], che ha imposto agli uffici pubblici e alle società che sono prevalentemente sostenute da capitale pubblico, di soddisfare il proprio fabbisogno annuale di manufatti e beni, con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato, per almeno il 30% sul totale: con essi si intendono in particolar modo rifiuti inorganici post-consumo derivanti da demolizione e manutenzione di opere edili e infrastrutturali, nonché conglomerato bituminoso post-consumo proveniente dalla scarifica di pavimentazioni [20], [11].

La circolare pone le basi concrete per un importante impulso al settore del riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione: l’iniziativa di introdurre l’obbligo di avvalersi di materiale riciclato per una certa percentuale, nasce già con l’art 56, legge Finanziaria 2002 (Legge n.448/2001) che originariamente si indirizzava alla sola fornitura di beni (esempio: utilizzo di carta riciclata negli uffici pubblici), ma che nel successivo decreto attuativo (DM n.203/2003) si rivolgeva anche alle opere pubbliche, imponendo quindi alle PA l’obbligo di prevedere l’impiego di materiali riciclati, in sede di formulazione dei capitolati d’appalto [11].

La pubblicazione della circolare n.5205/2005 rende di conseguenza definitivo questo obbligo, e consequenzialmente quello di adeguare i propri capitolati d’appalto.

Gli aggregati riciclati, posso concorrere a determinare il 30% del fabbisogno annuale della P.A. e delle società a prevalente capitale pubblico solo se iscritti al *Repertorio del Riciclaggio* (istituito dal DM 203/2003, tenuto e reso pubblico dall’Osservatorio Nazionale dei Rifiuti), alla cui ammissione si giunge mediante una *domanda* che l’azienda produttrice deve inviare all’Osservatorio, usufruendo di apposito modello e allegando la documentazione tecnica, specifica per ogni settore [11].

Relativamente ai settori edile, stradale e ambientale, i criteri tecnici e prestazionali, che i materiali e i manufatti riciclati devono avere per essere iscritti al sopracitato repertorio, sono forniti dalla circolare stessa 5205/2005.

Il “*materiale riciclato*” viene definito come “*materiale realizzato utilizzando rifiuti post-consumo da costruzione e demolizione*”.

Il riferimento ai rifiuti post-consumo non dovrebbe rappresentare per gli impianti di trattamento una limitazione, poiché la materia prima è nella maggior parte dei casi

costituita proprio da rifiuti da costruzione e demolizione. Alcuni impianti tuttavia ricevono e trattano scarti e sfridi di lavorazione, che non rientrano nella definizione di rifiuti post-consumo, in quanto mai inseriti sul mercato e pertanto mai utilizzati.

Relativamente alla composizione dell'aggregato riciclato, è previsto che il materiale di post-consumo possa essere miscelato con altri materiali, e di natura diversa, come ad esempio rifiuti inerti industriali, terre e rocce da scavo naturali, ma debba rappresentare all'interno della miscela una percentuale minima del 60% [11].

La tecnologia impiegata per la produzione di conglomerati bituminosi riciclati, impone invece di riutilizzare almeno il 20% del rifiuto inerte da scarifica.

Relativamente, poi, ai settori di applicazione, viene fornito un elenco indicativo di prodotti realizzati utilizzando rifiuti da costruzione e demolizione, derivanti dal post-consumo, iscrिवibili nel Repertorio del riciclaggio:

- A.1 Aggregato riciclato per la realizzazione del *corpo dei rilevati* di opere in terra dell'ingegneria civile, avente le caratteristiche riportate in Allegato C1;
- A.2 Aggregato riciclato per la realizzazione di *sottofondi stradali*, ferroviari, aeroportuali e di piazzali, civili e industriali, avente le caratteristiche riportate in Allegato C2;
- A.3 Aggregato riciclato per la realizzazione di *strati di fondazione* delle infrastrutture di trasporto, avente le caratteristiche riportate in Allegato C3;
- A.4 Aggregato riciclato per la realizzazione di *recuperi ambientali*, riempimenti e colmate, avente le caratteristiche riportate in Allegato C4;
- A.5 Aggregato riciclato per la realizzazione di *strati accessori* (aventi funzione anticapillare, antigelo, drenante, etc.), avente le caratteristiche riportate in Allegato C5;
- A.6 Aggregato riciclato conforme alla norma armonizzata UNI EN 12620:2004 per il confezionamento di *calcestruzzi* con classe di resistenza $R_{ck} \leq 15$ MPa, secondo le indicazioni della norma UNI 8520-2.

Nella circolare sono imposti due ulteriori condizioni necessarie per l'impiego del bene riciclato da parte delle PA:

- i materiali iscritti al Repertorio del riciclaggio devono presentare contestualmente “*medesimo uso, ancorché con aspetto, caratteristiche o ciclo produttivo diversi, e prestazioni conformi all'utilizzo cui sono destinati rispetto a quelli realizzati a partire da materiali vergini*”;
- congruità di prezzo: “*la congruità di prezzo degli aggregati riciclati iscrिवibili al*

repertorio del riciclaggio, si ritiene rispettata se tale valore non risulta superiore a quello relativo ai corrispondenti materiali che si vanno a sostituire”.

L'iscrizione al repertorio non deve creare delle distorsioni del mercato, e grazie alla congruità del prezzo che viene richiesta, gli aggregati riciclati verranno utilizzati solamente laddove il loro prezzo sia “congruo”, cioè dove siano reperibili a distanze brevi dal luogo di utilizzo, o siano comunque meno cari: ciò favorirà certamente la nascita e lo sviluppo di nuove attività imprenditoriali nel settore del riciclaggio.

Nell'allegato C della circolare vengono fornite le caratteristiche prestazionali, a seconda dei diversi usi, che gli aggregati devono possedere per poter essere iscritti al Repertorio.

I parametri su cui la circolare ha focalizzato la propria attenzione, limitandone i valori, sono:

- composizione. È stata posta una maggior attenzione alla qualità dei materiali presenti nella miscela: ad esempio la presenza di *materiali deperibili e/o materiali plastici cavi*, viene limitata allo 0,1% in massa per tutti gli usi. Questa particolare limitazione viene valutata in quanto dopo la degradazione delle sostanze organiche e l'evaporazione dei liquidi in esse contenuti, il volume occupato all'inizio tende ad annullarsi, creando vuoti interstiziali che possono causare pericolosi cedimenti, nel tempo. Nei rifiuti da C&D la presenza di elementi deperibili, come carta o legno, quindi una frazione leggera, è molto frequente; tuttavia negli *impianti di tipo fisso*, è possibile eliminare facilmente questa frazione, grazie a particolari dispositivi, riuscendo quindi a rispettare il limite imposto; ciò risulta più difficile nel caso di *impianti mobili*, e si provvederà all'eliminazione dei rifiuti indesiderati prima di immetterli nell'impianto (vedi Par. 8.2.2): tutto ciò richiederebbe necessariamente una particolare attenzione nella raccolta a monte dei rifiuti stessi, grazie ad un importante lavoro di differenziazione [36]. Relativamente invece a vetro e scorie vetrose, conglomerati bituminosi e altri rifiuti minerali dei quali sia ammesso il recupero nel corpo stradale, i limiti vengono spontaneamente rispettati, a meno che non si stiano trattando flussi di rifiuti di natura particolarmente omogenea.
- resistenza. Gli aggregati riciclati presentano in genere una composizione molto disomogenea: sono infatti generalmente costituiti da grani litici o frammenti di laterizi, ricoperti parzialmente da malte o da intonaci. Tuttavia l'esperienza ci dimostra che le miscele assortite, se prodotte in impianti fissi ben regolati, manifestano una spiccata tendenza alla stabilizzazione della granulometria. Ma

dalle demolizioni possono anche essere prodotti quantitativi di materiali ricchi di malta o intonaci, con pochi elementi litici: ne conseguirebbe una polverizzazione della miscela, con conseguente perdita di capacità portante; per evitare ciò vengono fissati i limiti di perdita in peso *Los Angeles*, che per i sottofondi stradali sarà ≤ 45 , mentre per gli strati di fondazione sarà ≤ 40 .

- forma. La diversa forma degli aggregati può influenzare la costipabilità delle miscele, riducendo anche la portanza. Seppur non vi siano specifiche prescrizioni per lo strato di sottofondo o fondazione, tuttavia si richiede una presenza contenuta di grani piatti o allungati: in questo caso le caratteristiche tecniche della miscela riciclata saranno simili a quelle dei misti di deposizione fluviale. Se l'impianto viene invece temporaneamente alimentato con macerie di tramezzature in forati e/o sfridi di produzione dell'industria delle ceramiche, il materiale prodotto potrebbe essere costituito da un'elevata percentuale di elementi piatti, che potrebbero provocare vespai e zone costipate in maniera disomogenea: proprio per questo vengono imposti dei limiti sugli *indici di forma e di appiattimento* degli aggregati relativi ai sottofondi stradali e agli strati di fondazione, che gli impianti non avranno problemi a rispettare, grazie ad un precedente stoccaggio provvisorio dei rifiuti, suddiviso per tipologie.
- caratteristiche granulometriche. Grazie alle tecnologie adottate dagli impianti fissi, è possibile produrre diverse granulometrie, anche in funzione del materiale di riciclo utilizzato all'ingresso. Alla maggior presenza di materiale con durezza modesta, come terre naturali o laterizi, corrisponde inevitabilmente una maggior produzione di materiale fine; se poi questo materiale fine ha origine da rifiuti caratterizzati dal codice CER 170504, potrebbe superare il valore richiesto di progetto dell'equivalente in sabbia.
- ecocompatibilità. La circolare a riguardo non si esprime, in quanto il fatto stesso di reinserire nell'ambiente materiale riciclato, comporta la presenza dei contaminanti che vi appartengono, e ciò è già regolato dalle norme. A volte però possono presentarsi eccessi di contenuto di sostanza organica, di solfati e alcune volte anche di metallo pesante (esempio nichel), creando problemi nel risultato del test di cessione. L'effettuazione del test in 24 ore, anziché in 16 giorni, porterebbe alla risoluzione del problema nella maggior parte dei casi.

L'elenco delle principali prove e normative di riferimento per la definizione delle caratteristiche geotecniche degli aggregati di riciclo, sono, infine:

1) Composizione delle miscele contenenti aggregati di riciclo	UNI EN 13285
2) Requisiti granulometrici	UNI EN 933-1
3) Equivalente in sabbia	UNI EN 933-8
4) Resistenza alla frammentazione con prova "Los Angeles"	UNI EN 1097-2
5) Indice di forma	UNI EN 933-4
6) Indice di appiattimento	UNI EN 933-3
7) Indice di portanza CBR	CNR UNI 10009
8) Resistenza al gelo-disgelo	UNI EN 1367-1

Tab. 9.1: Principali prove per la definizione delle caratteristiche geotecniche degli aggregati di riciclo

CAPITOLO 10 - DALL'APPROCCIO EMPIRICO A QUELLO FONDAMENTALE

10.1 Capitolati speciali d'appalto prestazionali

Il Regolamento di attuazione della legge quadro in materia di lavori pubblici, D.P.R. 21/12/1999 n.554, ha apportato delle considerevoli novità in tema di normativa tecnica e contrattuale dei Capitolati speciali d'appalto, determinando uno scenario di notevole interesse per l'impiego generalizzato dei materiali riciclati.

In particolare l'art. 24 del Regolamento, insieme agli articoli 45 e 46, introduce già in fase di progettazione preliminare, lo specifico strumento del *Capitolato speciale prestazionale*, che si differenzia nettamente per contenuti e finalità dal tradizionale e consolidato Capitolato prescrizionale, in cui venivano stabilite dettagliatamente le lavorazioni e gli obblighi per l'impresa, limitando la gestione dell'appalto ad una serie coordinata di controlli formali sulle singole componenti dell'opera viaria [48].

Le Norme Tecniche del capitolato speciale d'appalto possono infatti avere un'impostazione diversa a seconda che siano di tipo prescrittivo o di tipo prestazionale.

Le *Norme Tecniche prescrittive* si avvalgono anche delle conoscenze precedentemente acquisite sulla buona riuscita di realizzazioni analoghe per tipologia e condizioni di esercizio.

Nell'approccio prescrittivo, inoltre, il conglomerato bituminoso viene descritto attraverso la sua "ricetta costitutiva", andando a determinare parametri propri della miscela dai quali si possono dedurre le prestazioni del conglomerato finale posto in opera.

Le Norme riguardano tutte le fasi della realizzazione di una determinata opera: l'accettabilità dei materiali, che dovevano essere vergini, il confezionamento delle miscele, i controlli in corso d'opera, le macchine di cantiere e le modalità esecutive dei lavori in generale, sottostando sempre a regole ben precise; i capitolati erano dunque costituiti da un susseguirsi di richieste specifiche, che dovevano opportunamente essere verificate con prove dettagliate, con l'unico obiettivo di non compromettere il buon esito dell'opera.

Queste verifiche, tuttavia, non erano quasi mai praticabili oppure economicamente non sopportabili, e assumevano pertanto solamente un valore formale più che essere un reale strumento di controllo delle fasi produttive.

Nacque così l'idea del controllo sul risultato finale, grazie all'ausilio di una strumentazione ad Alto Rendimento; difatti la natura dell'aggregato, la sua forma, la sua

frantumabilità, analizzati dalle norme tradizionali, non permettevano di rilevare, ad esempio, l'aderenza fornita sulla strada ai fini della frenatura e del mantenimento in curva dei veicoli, ossia la prestazione che la pavimentazione doveva avere; tantomeno era possibile effettuare un controllo della capacità portante, prestazione fondamentale della struttura profonda della pavimentazione.

Diversamente, le *Norme Tecniche prestazionali* si riferiscono soprattutto alle "prestazioni" che l'opera dovrà garantire dopo la sua ultimazione, e sono largamente utilizzate nelle pavimentazioni flessibili e semirigide.

In questo secondo approccio il conglomerato bituminoso viene specificato in termini di requisiti prestazionali direttamente misurati, che possono essere correlati, a loro volta, con le caratteristiche compositive della miscela e con le proprietà dei materiali costituenti: difatti vengono comunque seguite delle indicazioni di massima, ma in maniera meno rigida e vincolante di quanto non si facesse nell'approccio prescrittivo. Per essere pienamente efficaci, le Norme Tecniche prestazionali devono basarsi su parametri assolutamente affidabili e chiaramente, nonché esplicitamente, connessi alle prestazioni finali, quali, ad esempio, le caratteristiche meccaniche dei materiali da impiegare; all'impresa esecutrice rimane la facoltà di effettuare tutte le possibili scelte, che, non pregiudicando la realizzazione finale dell'opera, le permettano tuttavia di differenziarsi in base alla propria capacità ed esperienza.

Va segnalato al riguardo che l'attuazione delle Norme prestazionali richiede un livello superiore di conoscenze da parte dei Tecnici e delle Imprese e la disponibilità di Laboratori prove dotati di specifiche attrezzature sperimentali, in generale più complesse di quelle tradizionali; tali attrezzature, necessarie per le prove sia in laboratorio che in sito "ad alto rendimento", dovranno essere capaci di determinare tutti i parametri richiesti, e ciò rappresenta indubbiamente un ostacolo per una rapida ed efficace diffusione delle Norme stesse.

Accanto alle prove empiriche, che hanno favorito la comprensione delle leggi che regolano il comportamento meccanico della pavimentazione sotto traffico, sono stati sviluppati diversi *test* classificati rispettivamente come fondamentali oppure simulativi. Le prove meccaniche, considerate singolarmente, non danno indicazioni sulla qualità che la miscela deve possedere in sito, soprattutto per quanto concerne la sua durabilità; lo stato tenso-deformativo generato nei provini durante i test di laboratorio, non può essere paragonato a quello indotto dalle reali condizioni di traffico veicolare sulla pavimentazione: si possono quindi determinare le caratteristiche prestazionali delle

miscele solamente in modo grossolano.

Le prove di tipo fondamentale valutano invece le proprietà intrinseche delle miscele, in base alle quali si fanno delle previsioni sulle caratteristiche prestazionali delle pavimentazioni; tali prove, rispecchiando precise correlazioni con le condizioni di carico agenti sulla sovrastruttura, interpretano con maggiore attendibilità lo stato tenso-deformativo dei conglomerati bituminosi in opera [10].

Le prove di tipo simulativo riproducono infine in laboratorio i diversi processi che le miscele subiscono in sito nelle fasi di preparazione, stesa, compattazione e nel corso della vita utile della sovrastruttura; in particolare il processo di compattazione della miscela può essere, ad esempio, simulato in laboratorio con la pressa giratoria, la cui azione di compattazione produce una riorganizzazione interna del conglomerato bituminoso, analoga a quella prodotta dai rulli utilizzati in situ; lo stato tenso-deformativo generato all'interno della struttura dai carichi ciclici delle ruote (sulle quali agiscono a loro volta i carichi assiali), viene riprodotto mediante il *wheel tracking test* in scala reale, e dà un'indicazione della deformazione permanente e dell'ormaiamento che si possono creare [10].

10.2 Progettazione delle miscele: un nuovo approccio

La progettazione di una miscela comporta la scelta di una certa tipologia di aggregati, caratterizzati da una ben precisa composizione granulometrica, di un certo tipo di legante e dell'eventuale additivo modificante, che permettano di ottenere una "ricetta" che soddisfi totalmente le specifiche richieste; questa stessa ricetta, ai fini economici, dovrà certamente ottimizzare tutte le componenti, ma dovrà anche possedere un tenore di legante che garantisca la durabilità del prodotto finale ed una sufficiente adesione tra legante e aggregati; la miscela così progettata dovrà possedere una buona lavorabilità per favorire le fasi di stesa e compattazione, e più in generale dovrà soddisfare tutte quelle caratteristiche prestazionali che possano condurre la pavimentazione stessa alla più lunga vita utile possibile.

Il conglomerato confezionato rappresenterà quindi il punto di equilibrio tra i costi di realizzazione disponibili per la sovrastruttura e la qualità attesa in sito per il materiale.

Tuttavia, mentre con il metodo empirico la formulazione della "ricetta ideale" (ottima) avviene tramite prove di tipo meccanico, che in base alle esperienze acquisite segue delle specifiche in continua evoluzione, con il metodo analitico si fa riferimento ad appositi sistemi di equazioni, grazie all'utilizzo di un elaboratore elettronico.

La progettazione del conglomerato bituminoso proporziona i diversi componenti della miscela, per ottenere l'optimum prestazionale in funzione della tipologia e dell'entità di traffico previsti, nonché delle condizioni ambientali e dei fattori strutturali che caratterizzano la pavimentazione durante la propria vita utile; ciò sarà possibile solo se saranno note a priori le relazioni che intercorrono tra le proprietà meccaniche possedute dalla miscela non appena comincia a deteriorarsi, e le prestazioni che sono richieste alla sovrastruttura stessa.

A tal riguardo, sono state sviluppate due metodologie: performance-related e performance-based. Nel primo caso le prove di tipo fondamentale e simulativo ottimizzano la ricetta valutando in laboratorio le proprietà del conglomerato e dei componenti, correlate con le caratteristiche prestazionali della sovrastruttura, mediante relazioni quantitative; nel secondo caso invece le stesse prove sono combinate per ottenere la massima correlazione tra i risultati dei test di laboratorio, condotti per ampi intervalli di carico e temperatura, ed il comportamento meccanico del materiale in sito. È bene ricordare infine che le principali proprietà delle miscele bituminose utilizzate nei moderni metodi di *mix design* sono rappresentate dal modulo di rigidità, dalla resistenza alle deformazioni permanenti e dalla resistenza a fatica.

10.3 L'evoluzione delle presse

La pressa Marshall è basata su criteri empirici legati all'impiego su strada che hanno permesso, in passato, di studiare le miscele bituminose, costituite da materiali selezionati, per trovare la loro formulazione migliore.

I campioni di conglomerato bituminoso, necessari per la prova, vengono costipati in laboratorio con uno speciale maglio battente all'interno di un contenitore cilindrico che impone un determinato numero di colpi per faccia, seguendo una procedura normalizzata. La tecnica è quindi di tipo impulsivo unidirezionale; durante l'addensamento i grani si avvicinano progressivamente, fino alla formazione di zone di saldo contatto. Tuttavia gli aggregati lapidei, che costituiscono lo scheletro portante del conglomerato nello strato compattato, si spostano solamente in direzione verticale, e non riescono a raggiungere le configurazioni di massimo addensamento a causa delle limitate possibilità che gli aggregati stessi hanno di ruotare.

Inoltre la tecnica, eseguita nei laboratori di ricerca, è molto rumorosa; le soluzioni adottate in passato per ovviare a questo inconveniente, furono l'insonorizzazione del pestello Marshall e successivamente l'addensamento statico pre-calcolato a volume

finale costante, effettuato con presse idrauliche (Società Autostrade SPA): quest'ultima soluzione ha rappresentato un'importante anticipazione della più rivoluzionaria pressa giratoria, nella sua versione americana, di cui parleremo fra poco.

Tornando alla pressa Marshall, essa è dotata di una testa di rottura formata da due ganasce metalliche con superficie interna semicilindrica, di cui quella inferiore è fissata al basamento della macchina, mentre quella superiore è libera di scorrere lungo due guide verticali. Viene misurata la deformazione che il provino subisce, con una velocità costante della ganascia superiore di 51 mm al minuto fino a rottura, in corrispondenza della quale si misura la massima forza esercitata sul campione (stabilità) e la relativa deformazione subita (scorrimento).

Tali parametri danno un'idea della resistenza della pavimentazione a deformarsi e a disgregarsi sotto l'azione dei carichi dovuti al traffico.



Fig. 10.1: Pressa Marshall



Fig. 10.2: Pressa Giratoria

Per ovviare alle problematiche della prova Marshall, fu introdotta la pressa giratoria. La nuova attrezzatura nacque inizialmente in Francia, presso il “Laboratoire Central des Ponts et Chaussée”, sfruttando un innovativo principio di addensamento: l'applicazione di un'azione combinata di sollecitazioni normali e tangenziali, che mutano continuamente di direzione a causa della rotazione eccentrica della fustella che contiene il materiale, favorisce una continua riorganizzazione dei granuli, simulando più

fedelmente le azioni dei rulli.

La prova era indubbiamente complessa, ma il prodotto finale era molto più simile al conglomerato posto in opera [15].

Una radicale semplificazione venne condotta ad opera degli Americani, che fissarono alcuni parametri secondo il processo SuperPave, da cui sono derivate l'attrezzatura e la modalità esecutiva attuali. Un importante vantaggio della pressa, è rappresentato dalla possibilità di stimare l'addensamento sotto traffico del conglomerato oppure il suo comportamento con gradi di addensamento diversi, semplicemente variando la velocità di rotazione, il numero di giri ed il carico in fase di preparazione; inoltre l'attrezzatura può essere fermata a più riprese per simulare sia il prodotto appena lavorato, sia il prodotto dopo un certo carico di traffico.

Seppur la pressa giratoria USA sia una realtà funzionante ancora oggi, il suo miglior utilizzo è stato possibile grazie ad una prova di laboratorio molto semplice, che ha permesso di valutare il prodotto ottenuto con la sua azione; la misura finale di accettazione era infatti ancora legata ad una resistenza a compressione del provino prodotto con il "massaggio" giratorio, che seppur non era più una resistenza di tipo "Marshall", non era neanche direttamente collegata al comportamento finale su strada. Era necessaria una misura di durata reale secondo il comportamento del materiale in opera: una durata "a fatica" [15].

10.4 La pressa a fatica da cantiere

La misura della fatica delle miscele da usare per le pavimentazioni stradali, per essere attendibile, deve essere condotta con attrezzature molto complesse, costose, e ingombranti.

Per anni si è cercato di semplificarne l'esecuzione e ci si è riusciti operando un confronto con materiali il cui comportamento è noto e ben studiato.

Difatti, se i materiali di riferimento possono essere descritti attraverso una curva di fatica, ottenuta in maniera semplificata, allo stesso modo lo possono essere i materiali da esaminare, il cui comportamento può essere confrontato, per l'appunto, con quello di un ben preciso materiale di riferimento [15].

Si parte dal presupposto di considerare la pavimentazione come una sovrapposizione di strati, il cui materiale costituente viene considerato omogeneo, elastico-lineare ed isotropo, caratterizzato quindi da un valore del modulo E , dal coefficiente di Poisson ν e da uno spessore s [41].

Con queste ipotesi è possibile analizzare il comportamento di una pavimentazione, in termini di tensioni e deformazioni, in funzione delle diverse condizioni climatiche e di traffico a cui è sottoposta, ma soprattutto in termini di durata residua della pavimentazione stessa.

Le curve di fatica danno indicazioni, difatti, sul numero di ripetizioni di un assegnato carico che porta a rottura il materiale esaminato; ad esempio, secondo le “Linee guida di progetto e Norme Tecniche Prestazionali” dell’ANAS del 2008, esse sono esprimibili mediante una formula,

$$\varepsilon = k \cdot \left(\frac{N}{10^6} \right)^{-\frac{1}{a}}$$

dove ε rappresenta la deformazione tangenziale alla base del conglomerato bituminoso o alla base del misto cementato o schiumato, N indica il numero di passaggi che la pavimentazione riesce a sopportare, k ed a sono delle costanti che dipendono dal tipo di materiale utilizzato: in particolare k rappresenta la deformazione per un singolo passaggio.

Tale espressione consente di determinare la vita utile o la vita residua legata al raggiungimento di assegnati livelli di degrado superficiale o livelli di servizio della strada, del tipo PSI.

La curva di fatica proposta può anche essere utilizzata impiegando la deformazione verticale ε_v relativa alla fondazione/sottofondo, con lo scopo di determinare la vita utile legata al raggiungimento di ben precisi livelli di ormaimento, che sono direttamente legati alle deformazioni plastiche della fondazione/sottofondo, oltre che del conglomerato bituminoso.

I provini cilindrici del materiale da analizzare vengono confezionati con pressa giratoria, e la fatica viene indotta negli stessi attraverso una compressione diametrale lungo la direttrice del cilindro, come nella prova brasiliana (ITFT, norma UNI EN 12697-24): i provini possono anche essere prelevati direttamente dalla strada. Si utilizza una macchina pulsante con una sola frequenza, ad un carico definito e alla temperatura dell’ambiente di prova, che va tenuto a circa 20°C.

È bene tener presente che nell’attuale versione del Capitolato ANAS, non è prevista l’esecuzione “prestazionale” sul prodotto finale delle prove a fatica, perché anche se il modo di procedere è stato notevolmente semplificato, le prove rimangono comunque di

tipo “puntuale” e non ad alto rendimento (nel documento la valutazione della resistenza a fatica viene menzionata relativamente alle caratteristiche meccaniche delle miscele) [15].

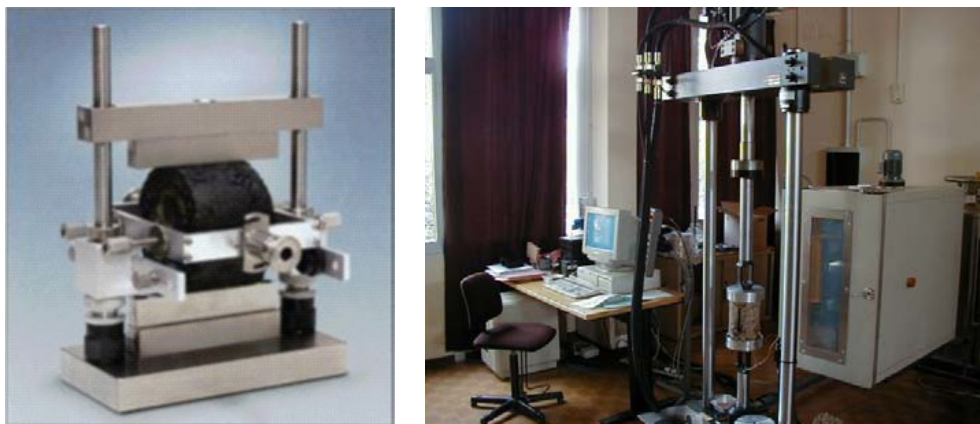


Fig. 10.3 – 10.4: Macchine per prova a fatica diametrale

Il costo dell'attrezzatura è contenuto e facilmente sostenibile da un qualsiasi cantiere stradale, anche di dimensioni modeste; non è richiesta una particolare preparazione degli operai, diversamente dalle prove di fatica di tipo empirico fino ad ora utilizzate.

In ogni caso questo costo è facilmente compensato dai vantaggi che le stesse imprese esecutrici ottengono con il suo impiego, sia per la possibilità che danno di utilizzare materiali locali, sia per la garanzia che offrono di superare i controlli di portanza prestazionali a conclusione del lavoro.

10.5 L'evoluzione dei controlli ad alto rendimento

Con l'arrivo del Capitolato Prestazionale, nacque l'idea del controllo sul risultato globale, che doveva essere effettuato con macchine ad Alto Rendimento su tutto il lavoro eseguito.

Nel resto del mondo esistevano già nel settore delle pavimentazioni, macchine in grado di rilevare, ad esempio, l'aderenza che si riusciva ad avere in strada, ai fini della frenatura e del mantenimento in curva dei veicoli.

I primi capitolati che si iniziarono ad avvicinare a questa visione, sono stati scritti e adottati nel 1991 sulla rete autostradale, ma erano di tipo misto: univano cioè ad una parte prestazionale, una serie di prescrizioni per i materiali componenti, sia relative alle loro composizioni e caratteristiche, sia ai criteri di posa in opera, che venivano poi controllate con prove tradizionali. Difatti all'epoca la prestazione globale si riferiva solamente alla regolarità e all'aderenza della pavimentazione finita, e non ad esempio

alla portanza.

La prima attrezzatura utilizzata nel campo, lo SCRIM, Sideway Coefficient Routine Investigation Machine, rivoluzionò senza dubbio il modo di analizzare le caratteristiche superficiali delle pavimentazioni; consentiva di rilevare le proprietà di aderenza trasversale di un manto stradale in presenza di acqua, ossia a superficie bagnata.

Successivamente il macchinario fu superato dal più evoluto SUMMS, Sunvey Machine for Macrottexture and Skid, che permise di valutare anche la prestazione relativa alla tessitura superficiale; per di più, oltre a controllare i lavori eseguiti, valutava lo stato attuale della pavimentazione, per decidere il momento più opportuno in cui doveva essere ripristinata [15].

Oggi invece lo SCRIM dell'ANAS, denominato ERMES (Equipment for Routine evaluation of Macrottexture, Evennes and Skid resistance), riesce addirittura a misurare in un solo passaggio aderenza, tessitura e regolarità [19].

Era iniziata la fase della costruzione e gestione in qualità della strada, che introduceva anche il concetto della misura dello stato della strada stessa, individuando i tratti maggiormente degradati, e determinando e controllando gli interventi necessari per il loro ripristino.



Fig. 10.5: SCRIM ANAS, denominato ERMES, che misura in un solo passaggio aderenza, tessitura e regolarità

Le attrezzature erano già state sviluppate ed usate all'estero, tuttavia si dovettero determinare le modalità ed i limiti con cui potessero essere utilizzate per il controllo dei lavori.

Il percorso evolutivo della misura ad alto rendimento della *capacità portante* è stato indubbiamente più lungo e complesso; il problema non era solo relativo all'attrezzatura, ma anche al progetto e alla misura delle caratteristiche intrinseche delle miscele in opera, connesso con i metodi razionali di calcolo del pacchetto nuovo e/o del pacchetto

di pavimentazione esistente [15].

L'iter delle macchine di misura ha presentato una svolta con il Falling Weight Deflectometer (deflettometro a massa battente): difatti è stata introdotta la possibilità di una misura di prestazione globale della pavimentazione, che poteva essere correlata con i valori dei moduli complessi dei materiali in opera.

Tuttavia due furono i principali motivi che non fecero decollare l'uso del FWD come strumento di controllo formale: il primo è rappresentato dal fatto che l'attrezzatura fosse molto lenta (per ogni prova della durata di circa 1 minuto, bisognava fermarsi e ciò non era agevole in caso di strade molto trafficate); il secondo consisteva nella necessità di una Back Analysis del bacino di deformazione, non univoca nei parametri e quindi contestabile sia da parte degli esecutori dei lavori, che come strumento di Capitolato.

Purtroppo la non unicità della soluzione può determinare differenti combinazioni di valori dei moduli, per uno stesso bacino di deflessione, per differenti valori dei moduli iniziali [42].

Oggi questa problematica è stata superata con il TSD, Traffic Speed Deflectometer, fabbricato dalla società danese Greenwood Engineering A/S, che misura gli stessi parametri del FWD, ma in continuo ed alla velocità di 80 Km/h: è anche definito Rolling Weight Deflectometer.

In Italia sono state condotte diverse campagne di misura con l'apparecchiatura Greenwood, che hanno permesso di verificarne l'affidabilità, il suo buon livello di reperibilità e, grazie al confronto con le misure FWD, hanno dimostrato il buon grado di correlazione esistente tra le due apparecchiature [15].

10.6 L'evoluzione dei criteri progettuali

Dal metodo semiempirico dell'Indice di Spessore derivato dalle prove AASHTO e dal PSI ad esso correlato ed usato in passato anche in Italia, sono stati fatti molti passi avanti.

Negli anni '70 furono poste le prime basi dei metodi razionali di calcolo, fondati su misurazioni dirette che venivano condotte sui materiali e non su parametri dedotti dalla letteratura. Fu possibile calcolare per la prima volta la durata delle pavimentazioni, applicando la legge di Miner (sull'accumulo della fatica), che interpreta la rottura per fatica come il risultato di un accumulo lineare di danni parziali (danneggiamento cumulativo), usando per l'appunto curve di fatica parametriche messe a punto dal belga J. Verstraeten; tuttavia questa metodologia non era propriamente corretta, in quanto la

stima sulla durata era inferiore rispetto a quella riscontrata poi nella realtà.

Il criterio attuale consiste in un metodo di calcolo razionale che approssima molto bene le condizioni reali, ed in base al quale si effettuano considerazioni di affidabilità e di durata di soluzioni progettuali: i materiali, vergini, marginali o riciclati, sono valutati a fatica attraverso un confronto con materiali di riferimento il cui comportamento in opera, seguito per anni sulla rete stradale italiana, è noto.

La soluzione progettuale individuata si identifica con l'Indice Strutturale IS, da non confondere con il già citato indice di spessore IS AASHTO, che deve essere ritrovato in opera con le misurazioni del bacino, eseguite con il FWD o con il TSD: il controllo della portanza legato alla durata può quindi essere ottenuto facilmente [15].

L'indice è definito come la differenza della deflessione a centro piastra, o centro ruota nel caso di TSD, e della deflessione letta ad una certa distanza dal punto: tale indice risulta essere l'espressione della portanza dell'intera sovrastruttura stradale, che deve ricadere in un certo intervallo; chiaramente ogni soluzione presenta una diversa tabella di valori limite a diversi gradi di maturazione delle miscele.

Grazie alle importanti innovazioni sulla stima delle caratteristiche superficiali e profonde della pavimentazione, è stato possibile produrre norme tecniche di tipo prestazionale.

10.7 Studio a carattere prenormativo delle Norme Tecniche di tipo prestazionale per Capitolati speciali d'appalto

L'elaborazione dello "Studio a carattere prenormativo delle Norme tecniche di tipo prestazionale per capitolati speciali d'appalto", del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, nasce dalla volontà di introdurre progressivamente le Norme Tecniche di tipo prestazionale, mantenendo però in vita una parte delle Norme Tecniche prescrittive, opportunamente aggiornate, senza arrivare ad una loro totale soppressione [48].

Lo studio è stato il primo a trattare con un certo rigore i "rilevati con materiali riciclati", considerando materiali riciclati quelli provenienti da attività di demolizione o di scarto di processi industriali trattati in impianto di lavorazione, ai sensi del D.M. 5/2/98 Decreto Ronchi; di queste tipologie di materiali viene fatta un'elencazione dettagliata al punto 1.4.5 dell'art. 1, "Formazione del corpo stradale".

Sono escluse dal capitolato, a prescindere dai risultati dei test di cessione, i materiali contenenti amianto o con significative presenze di gesso, mentre per la prima volta sono introdotti, come possibili materiali d'uso stradale, scarti industriali come scorie

d'altoforno, ceneri volanti, argilla espansa, e altri materiali inerti: per questi prodotti viene inoltre tollerata una percentuale massima dell'1% in massa di metalli, guaine, gomme, lana di vetro, lana di roccia, materiali deperibili o cavi, residui alimentari [48].

La legittimazione dei suddetti materiali innovativi ricorrendo ad esperienze di "campo prova", rappresenta indubbiamente un elemento di svolta nella gestione dell'appalto, perché permette all'appaltatore di valorizzare materiali e prodotti altrimenti residuali, e più in generale di indirizzare le stazioni appaltanti alla massimizzazione del recupero dei rifiuti nelle attività produttive.

Lo studio effettua una valutazione sulla qualificazione fisicomeccanica, i requisiti chimici, l'impianto di lavorazione, la formazione e lo stoccaggio delle partite, la campionatura per impianti ordinari, la campionatura per impianti a prodotto costante, l'accettazione, la posa in opera, i controlli prestazionali ed il campo prova.

Chiaramente i requisiti di accettazione degli aggregati riciclati, variano a seconda dell'impiego per il quale sono destinati: se nello strato di sottofondo, per strati di rilevato, oppure per bonifiche del piano di posa e similari.

Successivamente il tema delle norme prestazionali è stato ripreso dallo stesso D.M. 14 Settembre 2005 "Norme tecniche per le costruzioni", che non solo va incontro all'esigenza fortemente sentita, nel campo della costruzione delle opere civili, di avere un riferimento normativo con caratteristiche di coerenza, chiarezza, sinteticità, ma lo fa sulle basi di un più moderno indirizzo di normazione prestazionale, piuttosto che prescrittiva e di semplificazione legislativa [48].

10.8 Linee guida di progetto e Norme Tecniche Prestazionali ANAS 2008

Come abbiamo visto nei paragrafi precedenti, i capitolati seguiti fino a poco tempo fa erano di tipo prescrittivo, ossia basati su indicazioni ben precise sui quantitativi dei materiali utilizzati, sulla loro qualità, sui processi produttivi e sulle modalità di confezionamento; i controlli di tutte le prove da parte dell'Ente proprietario erano quasi impossibili da effettuare, né ci poteva essere la certezza di un lavoro ben eseguito.

Con la presentazione delle "Linee guida di progetto e Norme Tecniche prestazionali" da parte dell'ANAS (acronimo di Azienda Nazionale Autonoma delle Strade), nell'Aprile del 2008, si è passati definitivamente ad un sistema di tipo prestazionale, nel quale l'Ente proprietario ha il compito del controllo sulle prestazioni finali dell'opera commissionata, mentre all'Impresa esecutrice spettano tutti i controlli atti a garantire le prestazioni richieste.

Il Capitolato Prestazionale è tale se, oltre ad indicare le prestazioni legate alle finalità del bene prodotto, include anche le possibilità, con metodi ed attrezzature condivise, di verificarle in tutte le parti del prodotto finito.

Così facendo l'Impresa è stimolata ad operare bene e non solo ad eseguire prescrizioni rigide, difficilmente controllabili e spesso non coerenti con il risultato voluto.

Le Linee Guida e il Capitolato sono stati presentati ufficialmente a Padova, in occasione dell'edizione 2008 di Asphaltica. La versione finale, rivista con le aziende esecutrici rappresentate dalla FINCO, è stata approvata dal Consiglio di Amministrazione dell'ANAS ed è divenuta operativa per le manutenzioni a partire dal Luglio 2009.

Grazie alle conoscenze e alle macchine di cui si dispone per la sua operatività, si passa dunque da un processo semiempirico ad una tecnica scientifica completa, per la quale è possibile progettare il risultato voluto ed ottenerlo veramente, anche con l'utilizzo di materiali marginali, opportunamente trattati.

Ricordiamo che per marginale intendiamo qualsiasi materiale non completamente conforme alle prescrizioni in vigore in un paese, ma che può essere usato con successo in relazione a particolari condizioni climatiche o grazie a determinati progressi tecnici.

Indubbiamente i traguardi più importanti raggiunti dal processo tecnico scientifico, sono rappresentati da:

- l'utilizzo di tutti i materiali disponibili, grazie alla possibilità di una verifica a fatica globale da effettuare prima dell'esecuzione del lavoro;
- la verifica globale non distruttiva sulla strada sia per quanto riguarda le caratteristiche superficiali, che la capacità portante e conseguentemente la durata del servizio.

Le caratteristiche che contraddistinguono le Linee Guida di progetto e le Norme Tecniche prestazionali sono:

- Il dimensionamento dei pacchetti sulla base di metodi razionali di calcolo che permettono di stimare la vita utile dell'intervento attraverso curve di fatica specifiche.
- L'ottimizzazione delle materie prime vergini, grazie al maggior utilizzo possibile dei materiali fresati o comunque marginali disponibili in loco, di cui sia stimata la validità mediante calcoli di durata a fatica, per ridurre costi, trasporti, e tutelare l'ambiente.
- La definizione dei criteri generali di lavorazione che tengano conto delle

problematiche applicative sulle strade in esercizio.

- L'impiego generalizzato di bitumi modificati, per incrementare la durata degli interventi.
- La definizione di metodi di verifica prestazionali sui materiali utilizzati, sulle miscele e sulle lavorazioni complete finali; per queste ultime ci si avvarrà di strumentazione ad Alto Rendimento, sia per valutare le caratteristiche superficiali (indicatore di regolarità IRI, misura dell'aderenza CAT, misura della macrotestitura HS) che profonde (FWD o TSD, che valutano i bacini di deflessione ottenuti con prove deflettometriche dinamiche) [19], [41].

Il documento ANAS può inoltre essere macroscopicamente diviso in tre parti.

Una parte iniziale prevede una serie di soluzioni progettuali ("pacchetti") che contengono materiali riciclati o marginali, integrati con quelli più tradizionali: sono delle Linee Guida per il progetto, connesse alla durata delle pavimentazioni stesse.

Una seconda parte indica i criteri con cui i materiali che compongono il pacchetto devono essere confezionati e stesi: si parla in questo caso di Norme Tecniche sulla confezione e posa delle miscele. Nelle Norme sono ancora presenti, anche se in numero esiguo, alcune prescrizioni tipiche dei capitolati tradizionali, e che hanno il solo scopo di "guidare" la progettazione delle miscele.

Una terza ed ultima parte indica i criteri di portanza, aderenza, regolarità dei risultati ottenuti sulla pavimentazione finale, da verificare in ogni punto di un tronco omogeneo con attrezzature ad Alto Rendimento [57].

10.8.1 Parte prima: descrizione delle Linee Guida per il progetto

Le Linee guida dell'ANAS rappresentano indubbiamente un importante passo innovativo, in quanto sono state le prime in Italia sia ad essere espressamente dedicate alla manutenzione stradale, ossia alla ricostruzione o potenziamento della pavimentazione esistente, sia ad essere basate sulla concezione prestazionale.

La scelta degli interventi e del loro dimensionamento viene condotta in base a considerazioni visive dello stato da risanare e sul livello di traffico presente; tuttavia le soluzioni progettuali vengono definite più dettagliatamente, di volta in volta, a seconda delle condizioni locali.

Le operazioni di ripristino sono svolte con nuove tecnologie e nuove strumentazioni ad alto rendimento per la determinazione della tipologia, degli spessori e della portanza residua delle pavimentazioni esistenti.

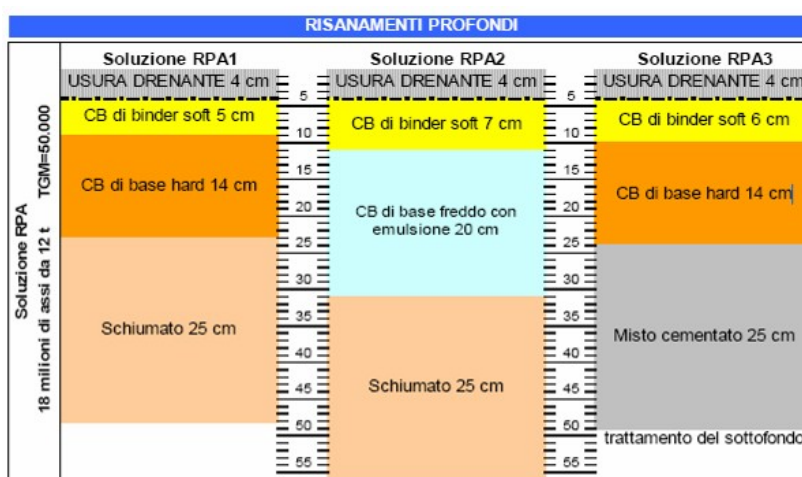
La scelta delle tipologia di intervento da effettuare, viene supportata dalla valutazione del traffico giornaliero medio (TGM), ed in base alla definizione di percentuali, combinazioni e tipologie di traffico pesante, vengono fornite anche le durate in termini di passaggi di assi equivalenti da 12 t; ci si avvale di particolari formule di trasformazione che permettono di passare dal TGM al numero di passaggi di assi equivalenti da 12 t, e di conseguenza al traffico di progetto.

Si individuano soluzioni di durata e costi differenti, considerando 3 livelli di traffico per i *risanamenti profondi*, indicati con le lettere A, B e C, e altri 3, di entità inferiore, per i *risanamenti superficiali*, da effettuarsi preferibilmente su strade a traffico modesto.

Relativamente ai *risanamenti profondi* (RP), la pavimentazione esistente e ammalorata, viene completamente demolita, e i materiali rimossi posso essere riutilizzati totalmente o in parte.

Questi tipi di intervento vengono effettuati nel caso in cui siano diffusi nella pavimentazione degli sfondamenti, individuati generalmente con criteri visuali, o se necessario, con specifici sondaggi.

In funzione del TGM possono essere distinte 3 categorie di risanamenti, ciascuna delle quali è ulteriormente suddivisa in 3 tipologie, a seconda dei materiali che vengono usati, e tutte di durata equivalente; chiaramente questa scelta è dettata sia dalle condizioni della pavimentazione esistente, che dalla disponibilità locale di materiali e di impianti.



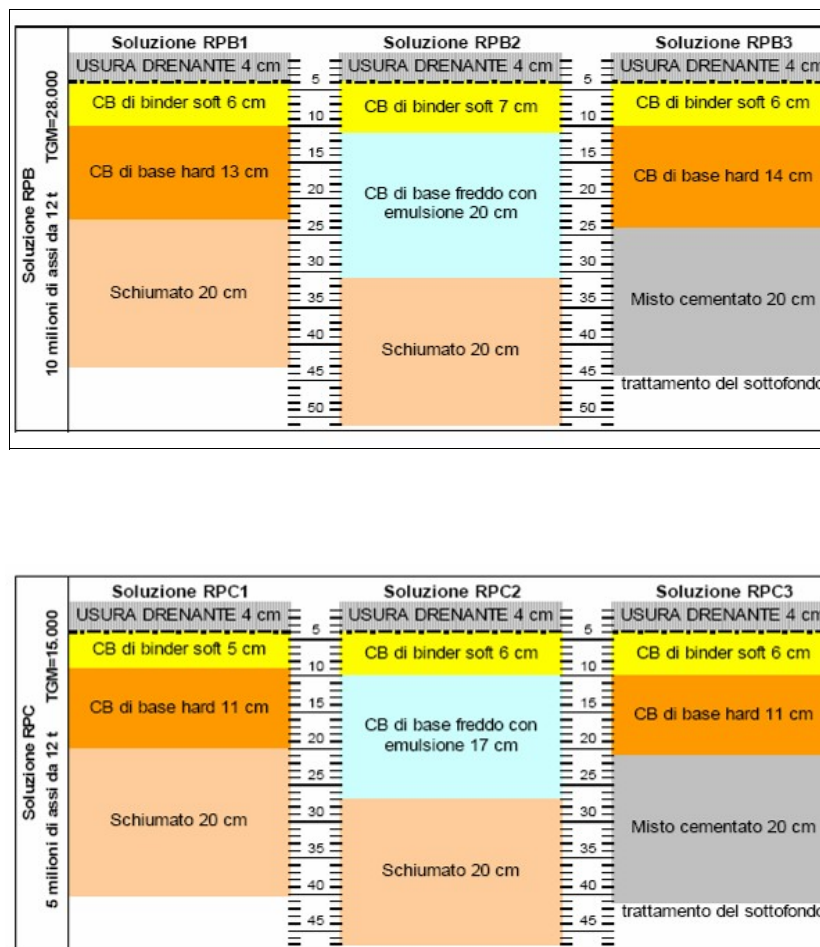


Fig. 10.6 – 10.7 – 10.8: Tipologie di risanamenti profondi

Tra le pavimentazioni proposte, le fondazioni nel caso di RP sono realizzate mediante riciclaggio a freddo della fondazione esistente, con bitume schiumato e cemento, o in alternativa mediante uno strato di misto cementato; quest'ultima soluzione comporterebbe indubbiamente oneri maggiori per la rimozione degli strati esistenti, nonché tempi più lunghi di realizzazione, a causa dell'attesa necessaria per raggiungere il giusto grado di maturazione, prima di realizzare gli strati sovrastanti: proprio per questi motivi la soluzione va adottata solo nel caso in cui i materiali presenti in sito non si prestino alla schiumatura, richiedendo quindi una loro rimozione.

Per gli strati superiori invece, che verranno realizzati in conglomerato bituminoso, verrà previsto sempre l'uso di bitumi a caldo modificati con elastomeri e parte del materiale riciclato, oppure l'uso di emulsioni bituminose con materiale riciclato fino al 100%, miscelati a freddo.

Inoltre è bene precisare che l'aggiunta di bitume "tal quale", senza il contributo di modificanti, causerebbe una riduzione della vita utile della pavimentazione almeno del

30%, rispetto a quanto riportato negli schemi Rpi e Rsi; l'utilizzo di bitume modificato è particolarmente importante negli strati di base.

A seconda dell'entità e della tipologia del traffico potranno essere realizzate due tipologie di usura: drenante oppure chiusa.

I risanamenti superficiali (RS) invece, seppur comportino un minor dispendio economico da valutare in fase di progettazione, non potranno garantire una durata equivalente rispetto agli interventi profondi.

Gli strati più superficiali della pavimentazione vengono fresati, ed è possibile realizzare anche uno strato di usura in copertura, con conseguente innalzamento delle quote; anche in questo caso possono essere adottate soluzioni diverse, in funzione dell'entità e della tipologia di traffico.

I risanamenti superficiali possono essere distinti in due tipologie:

- RS1, in caso di pavimentazione molto ammalorata (molto fessurata, superficie sconfigurata, rappezzi frequenti, presenza di risalita di limi);
- RS2 da prevedere nel caso di pavimentazione semplicemente fessurata (senza sconfigurazioni della superficie).

Per entrambe vengono proposte 3 soluzioni con materiali simili, ma con spessori diversi in funzione del traffico veicolare; tuttavia il ripristino della parte superiore del pacchetto non supera mai i 15 cm.

RISANAMENTI SUPERFICIALI			
	0.65 milioni di assi 12t TGM = 5.500 Traffico A	0.40 milioni di assi 12t TGM = 3.000 Traffico B	0.20 milioni di assi 12t TGM = 1.500 Traffico C
RS1 pavimentazione con fessure pesanti	Soluzione RS1A USURA CHIUSA 3 cm	Soluzione RS1B USURA CHIUSA 3 cm	Soluzione RS1C USURA CHIUSA 3 cm
	CB di base-binder soft 10 cm	CB di base-binder soft 8 cm	CB di binder soft 6 cm
RS2 pavimentazione con fessure leggere	Soluzione RS2A USURA CHIUSA 3 cm	Soluzione RS2B USURA CHIUSA 3 cm	Soluzione RS2C USURA CHIUSA 3 cm
	CB di base-binder soft 9 cm	CB di binder soft 7 cm	CB di binder soft 4 cm

Fig. 10.9: Tipologie di risanamenti superficiali

Nel caso di risanamenti superficiali, viene ipotizzata la presenza di uno spessore in conglomerato bituminoso di almeno 20 cm, e nel cavo della pavimentazione fresata, alla base della nuova pavimentazione, è sempre prevista la stesa di una mano di attacco con bitume modificato di tipo hard.

Per questa tipologia di risanamenti, vengono utilizzati conglomerati bituminosi

confezionati a caldo, con bitumi modificati. Lo strato di usura potrà essere realizzato sull'intera carreggiata o nel cavo, a seconda delle condizioni della corsia adiacente, danneggiata o meno, delle quote, dell'impatto del traffico, ecc...

Tutte le soluzioni proposte e le durate previste saranno garantite solamente nel rispetto delle Norme Tecniche prestazionali che verranno allegare ai Contratti d'Appalto, e saranno considerate come parte integrante delle Linee Guida; le Norme forniscono infatti le prescrizioni di progetto, i criteri di valutazione dei materiali da impiegare ed i livelli prestazionali richiesti alle nuove pavimentazioni, misurabili ad Alto Rendimento. Se non si dispone delle misure di portanza della pavimentazione, la scelta della tipologia di intervento da effettuare viene presa individuando il tratto degradato e valutando quale tipo di degrado prevale:

- se prevalgono gli sfondamenti per più del 45% → RPi
- se prevalgono le fessure pesanti per più del 45% → RS1
- se prevalgono le fessure leggere per più del 45 % → RS2



Fig. 10.10: Tipi di degrado di una pavimentazione

Per individuare uno sfondamento poi, si risconterà la risalita del limo; nel caso di fessure pesanti si noterà una sconfigurazione del piano viabile; le fessure leggere infine non presentano particolari aspetti di deterioramento della pavimentazione.

Tuttavia è anche possibile che i diversi tipi di degrado siano presenti contemporaneamente, e sarà necessario valutare, caso per caso, l'entità delle stesse, per effettuare una scelta di intervento che verrà confermata o meno in base alle disponibilità economiche.

Possono essere previsti anche trattamenti di tipo superficiale (TS), che indubbiamente tra tutti gli interventi sono quelli di maggior resa e minor costo, se le problematiche

relative alla pavimentazioni, sono rappresentate ad esempio dalla mancanza di aderenza o da fessurazioni piccole e poco diffuse.

Nel caso in cui le problematiche siano relative alla carenza di regolarità superficiale, sarà preferibile intervenire con microtappeti, preceduti o meno da fresatura [57].

10.8.2 Parte seconda: Norme tecniche sui materiali

Le Norme Tecniche prestazionali esprimono specifiche regole per realizzare gli interventi precedentemente esposti nelle Linee guida, mediante la formulazione e la verifica dei materiali da utilizzare nel pacchetto stradale, ponendosi l'obiettivo di ottimizzare il rapporto costi-benefici grazie all'utilizzo di materiale di recupero e di bitume modificato.

È proprio in questa parte del documento ANAS che sono ancora presenti delle indicazioni di tipo prescritzionale, tipiche dei capitolati tradizionali, ma che comunque sono in numero esiguo e servono solamente alla progettazione delle miscele.

Relativamente a questa seconda parte ci soffermeremo poco, proprio perché principalmente dedicata alle prescrizioni che vengono richieste ai materiali utilizzati nei singoli interventi.

Vengono inizialmente trattati i leganti bituminosi utilizzati nelle diverse tecniche e per i diversi tipi di interventi: si tratta di bitumi per il confezionamento di conglomerati bituminosi a caldo, o per lavori di riciclaggio a freddo mediante la tecnica di schiumatura, di emulsioni bituminose, sempre per lavori di riciclaggio a freddo, o per mani di attacco.

A seconda della tecnica specifica considerata, sono forniti dei range di valori, o delle soglie, per le caratteristiche che tali leganti dovranno possedere per essere utilizzati: per citarne sono alcuni, tra i più rappresentativi, ricordiamo ad esempio il Punto di Rammollimento, la Penetrazione, il Punto di rottura Fraas, la Viscosità Dinamica a 160°C, nel caso del bitume, il Rapporto e Velocità di espansione, il Tempo di dimezzamento, nel caso di bitume schiumato, il Contenuto di acqua e di legante, Grado di acidità, nel caso di emulsione bituminosa, e molte altre.

Vengono anche citati gli Attivanti Chimici Funzionali (ACF), gli Attivanti di adesione, i Dopes (DP), e le fibre per il rinforzo strutturale del bitume (FB), di cui vengono fornite indicazioni sul loro utilizzo e dosaggio; queste sostanze infatti permettono al bitume puro, di assumere nuove proprietà, migliorando le caratteristiche finali del prodotto stesso.

Gli ACF e i DP sono le principali classi di additivi esistenti. Gli ACF correggono alcune proprietà del legante bituminoso come la suscettività termica, l'elastoplasticità, la coesione, la viscosità, il comportamento reologico e la resistenza all'ossidazione. Sono spesso utilizzati nei processi di riciclaggio del conglomerato bituminoso per rigenerare le caratteristiche del bitume contenuto nel fresato: il loro dosaggio sarà direttamente influenzato dalle proprietà possedute dal bitume invecchiato, in particolar modo dalla sua viscosità, e verrà valutato come percentuale in peso rispetto al legante totale, secondo indicazioni della DL ed in accordo con i Laboratori accreditati o con il CSS. I DP invece sono sostanze tensioattive che migliorano la resistenza all'acqua delle miscele, agendo sulle condizioni di interfaccia inerte-legante in modo da favorire l'adesione tra bitume ed aggregato. Questa tipologia di additivi viene utilizzata a causa delle diverse proprietà adesive che il bitume presenta, a seconda della natura acida o basica degli aggregati. Gli attivanti di adesione impediscono che in caso di basse temperature o elevate deformazioni, se l'adesione è insufficiente, il velo di bitume si distacchi dall'inerte e permetta all'acqua di penetrare, impedendo al legame bitume-aggregato di ripristinarsi e provocando il degrado della pavimentazione. Il loro dosaggio dovrà essere tale da garantire le caratteristiche di resistenza allo spogliamento e di durabilità all'acqua previste dal capitolato.

Le fibre per il rinforzo strutturale del bitume sono invece dei prodotti che migliorano le caratteristiche strutturali del legante, conferendo al conglomerato finale una maggior resistenza a trazione ed un miglior comportamento a fatica.

Successivamente vengono esposti i possibili lavori di riciclaggio a freddo di conglomerati bituminosi e fondazioni: riciclaggio in sito mediante bitume schiumato (RBS), conglomerato a freddo schiumato in impianto (SCI), riciclaggio con emulsione (RE), misto cementato prodotto in centrale (MCI), misto cementato in sito (MCS). Per ciascuna tecnologia, dopo una breve descrizione della stessa, vengono fornite delle indicazioni di massima sulle modalità operative, sulle eventuali verifiche da effettuare prima dell'inizio dei lavori, o semplicemente su alcuni accorgimenti che devono essere presi, in relazione ai materiali costituenti, per ottenere un buon prodotto finale.

Vengono poi forniti i limiti del fuso granulometrico che deve contenere la curva di progetto, ed indicazioni sulla resistenza a compressione e a trazione indiretta su provini realizzati con pressa giratoria, secondo modalità di confezionamento opportunamente specificate.

Viene effettuato anche un breve studio di progetto, che permette di determinare le

percentuali ottime dei leganti, ossia cemento, bitume ed emulsione, e dell'acqua di compattazione, nonché di stabilire l'eventuale aggiunta di inerti di integrazione, per ottenere le migliori caratteristiche di resistenza possibili, i cui valori di riferimento sono stati già precedentemente indicati; per fare questo si realizzano 6 provini, con combinazioni differenti di acqua di compattazione e legante/i, a seconda della tecnologia utilizzata, confezionati con pressa giratoria secondo le modalità già descritte, che andranno maturati e portati a rottura con 3 prove a compressione e 3 a trazione indiretta: dai risultati di queste prove verranno determinate le percentuali ottimali dei componenti.

Vengono infine date delle indicazioni sulla posa in opera, se ci sono dei tempi che devono essere rispettati tra diverse fasi della lavorazione, se c'è un range di temperature in cui può essere effettuata la stesa oppure se sussistono condizioni ambientali che la vietano, se sono necessarie eventuali mani d'attacco o rifiniture superficiali con emulsione bituminosa; ma sono date anche indicazioni sulla modalità di compattazione, sul tipo di rullo che deve essere usato e su eventuali verifiche finali.

I capitoli successivi descrivono i Conglomerati bituminosi, le Miscele Drenanti Fonoassorbenti, l'Usura Drenante (DR) e il Drenante Alleggerito con argilla Espansa (DAE), i Trattamenti superficiali e altri tipi di lavorazioni minori. Anche in questo caso, come per i precedenti, sono previste delle prescrizioni generali (di massima) sulla lavorazione stessa, ad esempio sul tipo di inerti che deve essere utilizzato e sulle caratteristiche che devono possedere, sul fuso granulometrico di progetto della miscela finale, sulle caratteristiche prestazionali volumetriche e meccaniche, sulle verifiche finalizzate ad individuare la qualità del prodotto in opera, ed in generale su tutti i trattamenti specifici che competono ogni lavorazione.

Ad esempio nel caso di pavimentazioni drenanti le Norme prescrivono la discontinuità della curva granulometrica di progetto, che permette alle miscele di possedere un'elevata percentuale di vuoti intercomunicanti, che non solo assicurano lo smaltimento delle acque meteoriche, ma possiedono anche importanti proprietà fonoassorbenti, riducendo l'inquinamento acustico presente su strada.

Indubbiamente questa è la parte meno innovativa di tutto il documento ANAS, ma certe prescrizioni, anche in un approccio di tipo prestazionale, sono comunque necessarie e devono essere rispettate, o meglio autocontrollate, anche se da una prospettiva diversa: il fine ultimo di un capitolato non mira infatti alla perfezione teorica, ma a rispettare ciò che è reputato funzionale al raggiungimento del massimo risultato prestazionale in

opera [57].

10.8.3 Parte terza: controlli prestazionali ad Alto Rendimento

La terza parte del documento ANAS, come già precedentemente accennato, è incentrata sulle verifiche prestazionali del prodotto finito, mediante attrezzature ad Alto Rendimento.

Le caratteristiche superficiali e profonde che la pavimentazione dovrà avere a conclusione dei lavori, potranno essere valutate attraverso l'indicatore di regolarità IRI, la misura dell'aderenza CAT, la misura della macrotessitura HS, nel primo caso, e attraverso il FWD o il TSD, nel secondo caso; naturalmente prima di effettuare ogni singola prova, devono essere valutati e calcolati tronchi omogenei, ossia dei tratti di strada per i quali abbia senso definire un valor medio ed una varianza di un certo parametro. Le sezioni omogenee vengono individuate mediante l'utilizzo di mezzi statistici e devono dar luogo, per sezioni adiacenti, a valori medi molto differenti tra loro; all'interno dei tronchi, invece, le caratteristiche significative per l'analisi dell'infrastruttura dovranno mantenersi in un campo di variabilità molto ristretto [56].

10.8.3.1 Il controllo della portanza: FWD, TSD, LFWD

L'FWD e il TSD

Il controllo tradizionale della portanza, avviene con il FWD, che permette di condurre indagini non distruttive mediante l'analisi di un bacino di deflessione indotto dall'applicazione di un carico superficiale, di tipo impulsivo, attraverso una piastra circolare: il diametro standardizzato è, ad esempio, di 300 o 450 mm. Alla piastra è collegato un sistema di molle sulle quali vengono lasciate cadere alcune masse (per esempio di 50, 150, 250 o 350 kg) da un'altezza che viene variata da un minimo di 50 mm ad un massimo (per esempio di 390 mm); la piastra è rivestita in gomma per favorire una distribuzione uniforme dell'impulso generato dal carico. All'accoppiamento fra entità della massa e altezza di caduta corrisponde il valore di picco del carico.

Il caricamento viene reso dinamico grazie alla regolazione del sistema di molle che consente di produrre un'azione assimilabile, sia in termini di livello tensionale sia in termini di durata di applicazione del carico, a quella che la ruota di un veicolo commerciale pesante, alla velocità di 40-60 Km/h, trasmette alla pavimentazione.

Dopo che il carico è stato imposto, l'apparecchiatura registra l'abbassamento subito

dalla pavimentazione, in altri termini il bacino di deflessione, attraverso 7 o 9 sensori (geofoni), posti a distanze prefissate e disposti in linea con il carico: in questo modo è possibile individuare le caratteristiche meccaniche degli strati che compongono la pavimentazione. Tutta la strumentazione viene gestita tramite un personal computer, che mediante un apposito software attribuisce il valore del carico mediante la scelta dell'opportuna altezza di caduta della massa ed archivia tutti i valori ottenuti durante le prove.



Fig. 10.11: Particolare dei geofoni



Fig. 10.12: Bacino di deflessione

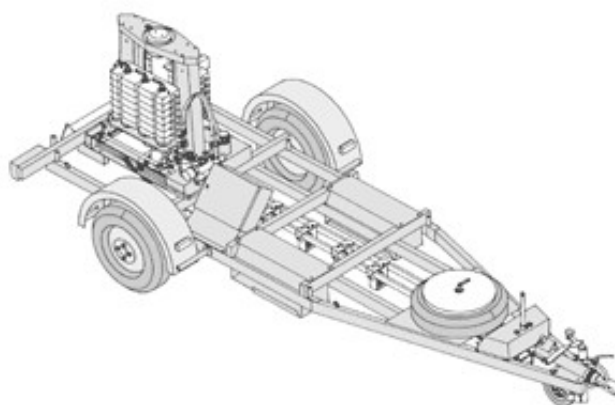


Fig. 10.13: Apparecchio di misura del FWD



Fig. 10.14: Possibile posizionamento dei geofoni

Le misure di deflessione ottenute vengono elaborate con un'apposita procedura che prende il nome di Back Analysis, la quale consente di determinare il valore del modulo di elasticità dei materiali dei diversi strati della pavimentazione (che compongono la struttura analizzata); ci si avvale di un algoritmo di ottimizzazione di tipo iterativo il quale ricerca quei valori dei moduli che producono deformazioni calcolate quanto più prossime possibili a quelle rilevate.

I valori dei moduli calcolati sono utilizzati per valutare, mediante idoneo algoritmo di previsione, la vita utile residua della pavimentazione, ovvero per determinare il tipo di intervento necessario al rafforzamento della pavimentazione stessa.

Tuttavia, come accennato prima (nel paragrafo “Il cammino dei controlli ad alto rendimento”), per uno stesso bacino di deflessione, la soluzione al problema non è unica, e possono essere determinate differenti combinazioni di valori dei moduli; inoltre il mezzo, per ogni prova della durata di circa 1 minuto, effettuata ogni 100÷200metri, deve fermarsi, e ciò comporta notevoli disagi in caso di strade molto trafficate. Proprio per questi motivi, e anche per la gestione del dato rilevato in termini di valutazione globale della portanza (ricordiamo che la prova è di tipo puntuale e non in continuo), è stata aperta la strada ad una nuova ed innovativa apparecchiatura: il TSD, Traffic Speed Deflectometer.

Fabbricata dalla società danese Greenwood Engineering A/S, il TSD misura gli stessi parametri del FWD, ma in continuo ed alla velocità di 80-90 Km/h.

L'apparecchiatura è composta da un mezzo articolato con un rimorchio strumentato il cui asse gemello posteriore scarica 12 t; l'asse esercita sulla pavimentazione una sollecitazione che ha come diretta conseguenza una serie di deformazioni, ma è allo stesso tempo sufficientemente lontano dagli altri assi del veicolo, da non risentirne l'influenza. Tali deformazioni non vengono misurate in termini di deflessioni, come nei mezzi tradizionali, tipo FWD, ma in termini di velocità di deformazione, attraverso l'impiego di una serie di laser doppler installati su una barra indeformabile contenuta all'interno del rimorchio; proprio l'assenza di ogni contatto con la superficie stradale consente il rilievo in velocità, che rappresenta l'aspetto più innovativo dell'apparecchiatura.



Fig. 10.15: Traffic Speed Deflectometer

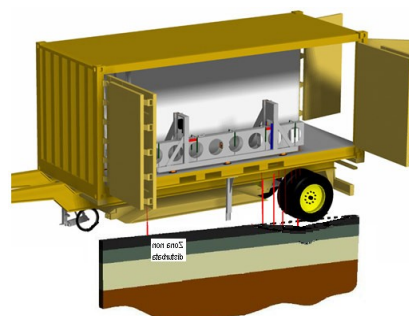


Fig. 10.16: Trave indeformabile portalaser

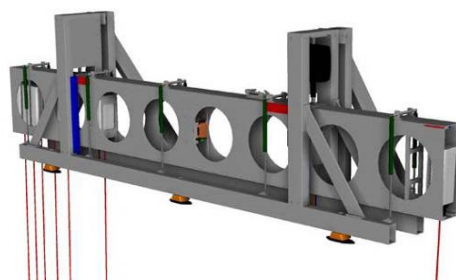


Fig. 10.17: Particolare della trave indeformabile porta laser

Il sistema funziona correttamente grazie all'uso di sistemi di controllo e regolazione costituiti da accelerometri, giroscopi, attuatori meccanici elettrocomandati, processori; grazie a questa strumentazione si è in grado di valutare e compensare le velocità fittizie, relative alle vibrazioni della barra, indotte dalle forze di inerzia presenti durante il moto; è anche possibile regolare l'altezza di lavoro dei laser doppler, affinché sia sempre rispettato il loro campo ottimale di misura.

I dati rilevati vengono successivamente integrati per determinare il bacino di deflessione.

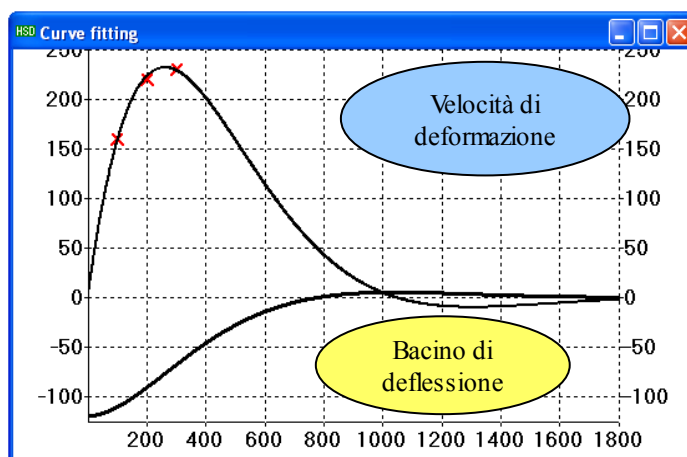


Fig. 10.18: Bacino di deflessione ottenuto integrando le velocità di deformazione

Il TSD consente quindi di conoscere le caratteristiche di portanza delle pavimentazioni della rete stradale in forma estensiva, fornendo lo strumento necessario di conoscenza per la messa a punto dei piani di manutenzione programmata.

Per uniformare le misure dell'FWD e del TSD, il controllo della portanza è stato successivamente affidato all'Indice Strutturale **IS**, che deriva direttamente dalle misurazioni effettuate con le stesse apparecchiature, ossia dai bacini di deflessione, in maniera puntuale nel primo caso, ed in continuo e ad alta velocità nel secondo. Nel documento ANAS sono indicate le modalità operative specifiche per l'esecuzione della

prova nel caso si utilizzi una oppure l'altra apparecchiatura.

L'Indice Strutturale è definito come differenza della deflessione a centro piastra, o centro ruota nel caso del TSD, e deflessione letta ad una certa distanza da tale punto; il suddetto indice esprime la portanza dell'intera sovrastruttura stradale.

Per ogni tipologia di intervento, considerando le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati e gli spessori adottati, sono state valutate le durate teoriche di progetto e sono state stimate le caratteristiche di portanza attraverso l'Indice Strutturale IS_{300} , definito come differenza tra la deflessione massima registrata a centro piastra ed a 300 mm dallo stesso centro: $IS_{300} = D_0 - D_{300}$. Allo stesso tempo, con opportuni calcoli, sono stati determinati i limiti ammissibili dell' IS_{300} in funzione delle condizioni di prova, e riportati nei grafici.

Le condizioni di prova sono valutate attraverso la temperatura effettiva dell'aria nel momento in cui viene eseguita la prova stessa; nella maggior parte dei casi la temperatura di riferimento è di 14°C, ma possono essere valutate tutte le possibili soluzioni in un intervallo prestabilito, generalmente compreso tra 10°C e 20°C; i dati esterni a tale intervallo, seppur registrati, non verranno considerati vincolanti.

Nei grafici sono presenti diverse curve relativamente ai Risanamenti Profondi, che si riferiscono a diversi momenti di maturazione dei materiali: le misurazioni di accettazione sulla pavimentazione finita, andranno effettuate al massimo entro un anno dalla stesa dell'ultimo strato.

Per gli interventi di tipo superficiale, che non interessano cioè gli strati più profondi della pavimentazione, si farà riferimento all'Indice Strutturale IS_{200} , definito anch'esso come differenza tra la deflessione a centro piastra ed a 200 mm dal centro:

$$IS_{200} = D_0 - D_{200}.$$

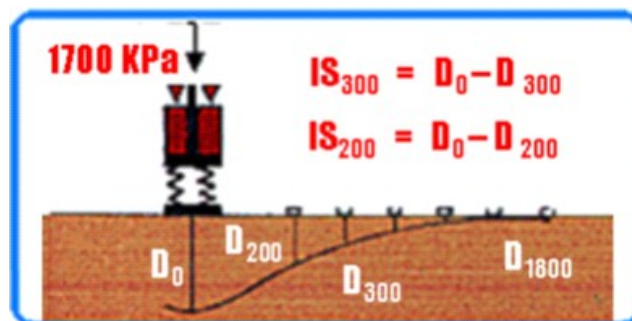


Fig. 10.19: Visualizzazione grafica degli indici IS_{300} e IS_{200} in relazione al bacino di deflessione

Per una corretta valutazione di questa tipologia di interventi (superficiali), devono

essere applicate opportune correzioni all'indice IS di riferimento, che abbiamo visto in questo caso essere IS_{200} : tali correzioni sono calcolate, sempre in forma semplice, direttamente valutando il bacino di deflessione, sia per tener conto della deformabilità del sottofondo (non interessato dall'intervento), e sia perché essendo gli indici fortemente influenzati dalla temperatura del conglomerato bituminoso, è necessario ritornare alle condizioni di temperatura di riferimento.

È bene tener presente che sia per risanamenti profondi che superficiali, le prove di portanza possono essere condotte anche in caso di temperature dell'aria differenti da quelle di riferimento adottate nelle Norme Tecniche; in questo caso sarà sufficiente riportare l'Indice a condizioni standard, mediante una semplice formula:

$$IS_{14^{\circ}C}/IS_{T_{prova}} = \exp(c \cdot (14 - T_{prova}))$$

dove $c=0,037$ nel caso di interventi RP, mentre $c=0,022$ nel caso di interventi di tipo RS. Nel caso di Trattamenti Superficiali infine, non sono previsti limiti di accettazione per la Portanza.

II LFWD

Nel capitolato ANAS, relativamente ai lavori di riciclaggio RBS, MCI e MSC, viene menzionata anche un'altra apparecchiatura per la misura della portanza in corso d'opera: il LFWD, Light Falling Weight Deflectometer.

L'attrezzatura permette di eseguire una prova di carico con piastra dinamica che valuta efficacemente portanza e grado di addensamento; inoltre, essendo assimilabile ad un FWD, ma molto più maneggevole, leggero e conseguentemente trasportabile, è possibile effettuare molte più prove sia dal punto di vista temporale che spaziale. Viene eliminata anche la presenza del mezzo di contrasto, come l'autocarro, che rappresenta un notevole ingombro sul piano di prova, nonché un disturbo al traffico veicolare. La versatilità di questa nuova attrezzatura, ne ha favorito una rapida diffusione.

Il LFWD permette di misurare il Modulo di Deformazione dinamico E_{vd} in MPa.

Il principio di funzionamento è lo stesso del FWD: una massa nota viene fatta cadere più volte su una piastra di carico, posizionata sul piano di prova, permettendo di determinare in modo speditivo la risposta dinamica del terreno; vengono di volta in volta registrati pressioni e cedimenti della pavimentazione [53].

L'apparecchiatura può differenziarsi per dimensioni e forma della massa battente, per l'altezza di caduta, per le dimensioni della piastra di carico e per le posizioni della cella di carico e degli accelerometri (geofoni).

In particolare le tipologie più conosciute sono: Zorn, Terratest e Dynatest.

Il dispositivo Zorn è composto da una piastra di carico rigida, una massa battente e un'apparecchiatura elettronica di acquisizione dati.

La piastra di carico presenta un diametro di 300 mm ed uno spessore di 20 mm, e può essere anche considerata rigida ai fini dei calcoli per la valutazione dei moduli del piano di prova.

Tra la piastra di carico e la massa battente sono presenti un compensatore di inclinazione per condurre prove su piani inclinati, un accelerometro per misurare i cedimenti, una cella di carico per la valutazione dei carichi in gioco ed uno smorzatore a molle (buffer) per modulare la forza impattante; il trasduttore accelerometrico è un sensore che fornisce in output, tramite opportuna interpretazione dei dati acquisiti, l'abbassamento del punto centrale della piastra, nonché la corrispondente velocità di deformazione del suolo [53].

La massa battente ha un peso di 10 Kg, 15 Kg nel caso in cui i moduli previsti siano elevati, ed è libera di scorrere sull'asta di guida che, oltre a garantire la centralità del colpo, consente di uniformare l'altezza di caduta per mezzo della leva di rilascio fissata in corrispondenza dell'impugnatura.

La strumentazione è collegata ad un'apparecchiatura elettronica che permette di acquisire i dati appena rilevati, registrarli e trasferirli tramite chip-card o porta seriale su personal computer.



Fig. 10.20: LFWD Zorn

Fig. 10.21: LFWD Dynatest

La componentistica dell'LFWD Terratest è molto simile a quella dell'LFWD Zorn.

Differentemente dai modelli precedenti, il LFWD Dynatest è dotato di un sistema di

acquisizione dati wireless, evitando la fastidiosa presenza del filo sul campo di misurazione.

Mentre nell'apparecchiatura precedente (Zorn) la deflessione della piastra era misurata da un accelerometro collocato tra il buffer e la piastra di carico stessa, nel Dynatest le deflessioni sono stimate grazie ad un geofono che viene posto a diretto contatto con la superficie attraverso un piccolo foro a centro piastra.

Inoltre anche il materiale usato per distribuire lo stress di contatto sotto la piastra è diverso: nel primo caso è costituito da un tappetino in gomma, mentre nel secondo da una superficie in metallo, e questa differenza può indubbiamente influenzare le misurazioni [53].

Il dispositivo Dynatest include una cella di carico per la registrazione delle time histories degli impulsi effettivamente applicati sotto la piastra. Ciò consente di applicare un impulso specifico impostando l'altezza di caduta, che nello Zorn era fissa, a seconda del tipo di strato indagato.

Per condurre la prova sono sufficienti due operatori: entrambi appoggiano il proprio peso sulla piastra di carico per stabilizzare la piastra stessa sul terreno: mentre il primo si occupa dell'assestamento dei colpi, il secondo annota leggendo sul display wireless dove sono rappresentate la curva dei cedimenti e la curva di carico, apprezzabili ad ogni colpo.

10.8.3.2 Controllo di aderenza e tessitura

Il controllo prestazionale ad alto rendimento delle caratteristiche superficiali, in questo caso aderenza e macrotessitura, viene effettuato con l'uso di metodi tradizionali, che valutano il Coefficiente di Aderenza Trasversale, CAT, l'altezza in sabbia, HS, e il Mean Profile Depth, MPD.

Il CAT è un parametro che definisce il valore dell'aderenza di un pneumatico alla pavimentazione stradale nel caso di superficie bagnata, ed è quindi strettamente legato alla sicurezza stradale; le apparecchiature utilizzate per effettuare la misurazione secondo le indicazioni del capitolato ANAS sono lo SCRIM, il SUMMS e l'ERMES, che come abbiamo visto precedentemente ("Il cammino dei controlli ad alto rendimento") hanno rappresentato un naturale percorso evolutivo nell'analisi delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni. Si è passati difatti dallo SCRIM, che rilevava le sole caratteristiche di aderenza su strada in presenza di acqua, al SUMMS che introduceva anche la possibilità

di valutare la prestazione relativa alla tessitura superficiale, per finire con il più innovativo ed attuale ERMES (SCRIM dell'ANAS, WDM), che riesce a misurare in un solo passaggio aderenza, tessitura e regolarità.

Più nel dettaglio, il CAT, anche conosciuto come Sideway Force Coefficient (SFC), è definito come rapporto tra la forza N agente perpendicolarmente al piano di rotolamento di una ruota che avanza a 60 Km/h con un'angolazione prestabilita di 20° , ed il carico verticale agente sulla ruota stessa; l'apparecchiatura di misurazione (SCRIM) è costituita da un autocarro, ai lati del quale sono collocate due ruote di misura con peso, caratteristiche e pressione di gonfiaggio prestabilite. Un sistema idraulico permette la spruzzatura dell'acqua sulla pavimentazione davanti alla ruota di misura. Nella cabina dell'automezzo è presente un sistema di registrazione dei dati, che comprende anche una stampante ed un registratore, rispettivamente utilizzati per misurazioni su tratti brevi o di elevata lunghezza. Le misurazioni ottenute vanno comunque ricondotte alla temperatura di riferimento di 20°C mediante una semplice formula.

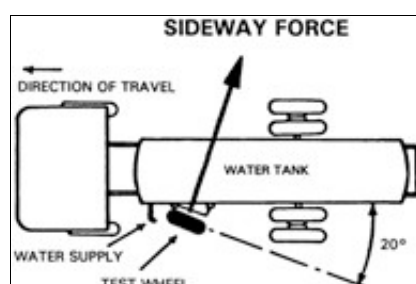


Fig. 10.22: Schema di funzionamento dello SCRIM

Fig. 10.23: SCRIM

Nel SUMMS il valore del CAT viene ricavato allo stesso modo, misurando con una cella di pressione la forza agente perpendicolarmente al piano medio di una ruota di misura dotata di pneumatico liscio standard, mentre tale ruota rotola sulla superficie stradale preventivamente bagnata. Il rapporto percentuale tra tale forza e il valore del carico verticale agente sulla ruota stessa, rappresentano il valore del CAT. Relativamente alla macrorugosità, determinata dall'assortimento granulometrico degli aggregati, la misurazione viene effettuata in velocità con un dispositivo laser montato sullo stesso veicolo; il SUMMS prevede comunque la possibilità di effettuare contemporaneamente entrambe le misurazioni delle caratteristiche superficiali.

Infine l'ERMES della società WDM, riesce in una sola passata, a determinare tutte le caratteristiche superficiali della pavimentazione, grazie alla presenza di attrezzature

supplementari, come la georeferenziazione dei rilievi (gps) e l'acquisizione del filmato video del tracciato stradale; anch'essa monta due ruota di misura per il rilevamento del coefficiente di aderenza trasversale, e due laser accoppiati con due accelerometri per il rilevamento della macrotestitura e regolarità.

L'ANAS fornisce una tabella di valori di accettazione del valore del CAT, per diverse tipologie di materiali della superficie stradale, in relazione a tratte omogenee.



Fig. 10.24: ERMES



Fig. 10.25: Particolare della ruota di misura

L'altro parametro analizzato è la tessitura, che viene valutata attraverso l'indice HS, a sua volta legato all'indice MPD.

Ricordiamo brevemente la differenza che intercorre tra micro e macrotestitura. La microtestitura indica la scabrezza superficiale del singolo aggregato utilizzato nello strato superficiale della pavimentazione e dalla quale “sporge”, che dipende direttamente dalla natura mineralogica e petrografica degli aggregati stessi, subendo gli effetti del clima, delle stagioni e del traffico. La microtestitura ha il compito di “penetrare” la gomma del pneumatico per creare elevate pressioni di contatto a favore dell'aderenza e per rompere il film d'acqua che si interpone tra la strada e il pneumatico, creando un contatto asciutto tra le due superfici; chiaramente se la microtestitura sarà maggiore, saranno garantiti buoni livelli di aderenza in caso di superficie bagnata, a discapito però di una maggior usura delle gomme.

La macrotestitura invece indica l'insieme delle asperità intergranulari del manto di usura; questa caratteristica è invece legata alla dimensione e alla forma degli aggregati, nonché alla loro disposizione relativa. Più tecnicamente è intesa come deviazione della superficie della pavimentazione da una superficie piana di riferimento con dimensioni definite, all'interno di un valore compreso tra 0.5 mm e 50 mm della superficie

analizzata.

Chiaramente sia la micro che la macrotestitura contribuiscono alla rugosità totale della pavimentazione, utile ai fini della sicurezza stradale; difatti entrambe contribuiscono al drenaggio dell'acqua nell'area di contatto tra strada e pneumatico, proprio grazie agli spazi intergranulari che formano dei microcanali, che fungono da serbatoio e/o da percorso di allontanamento per l'acqua stessa.

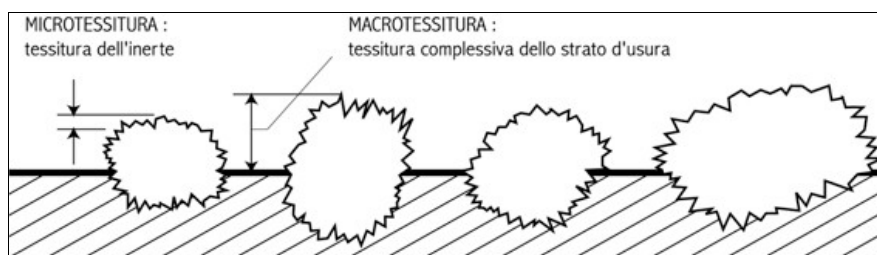


Fig. 10.26: Indicazioni sulla micro e macrotestitura di un inerte

La valutazione della tessitura geometrica HS, intesa come macrotestitura superficiale, viene determinata attraverso una semplice formula nella quale compare il termine MPD, Mean Profile Depth (altezza media di macrotestitura).

L'MPD indica il valor medio della profondità di profilo, calcolata su una distanza di riferimento assegnata, e che viene rilevato mediante un profilometro laser montato su veicolo.

Nell'interpretazione fornita dall'AIPCR, ad esempio, la *profondità media del profilo* è stata identificata con la media fra i punti del profilo ed una retta tangente alla sommità della particella più sporgente nel campione considerato.

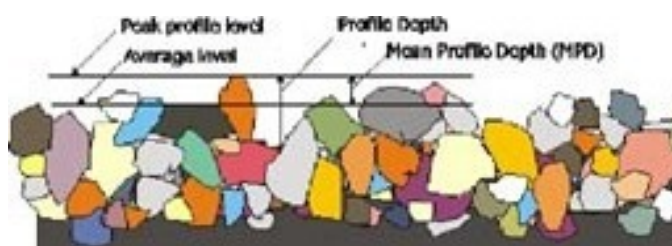
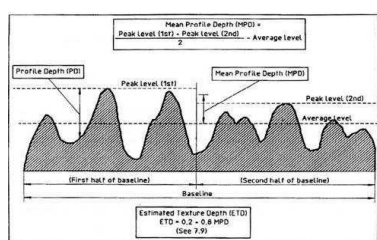


Fig. 10.27: Andamento del Mean Profile Depth

Fig. 10.28: Visualizzazione del MPD

Dalla relazione che intercorre tra MPD e HS, è possibile trovare la misura della macrotestitura, sempre in relazione a tronchi omogenei, di cui le Norme ANAS forniscono valori di riferimento.

10.8.3.3 Controllo di regolarità

Assieme all'aderenza e alla tessitura, la regolarità costituisce un dato prestazionale superficiale.

Questa caratteristica è fondamentale sia per l'utente, in quanto assicura comfort e sicurezza della guida, ma anche per l'ente proprietario della strada, in questo caso l'ANAS, che riesce a pianificare la manutenzione della rete viaria, dagli indiscussi pesi economici.

Le irregolarità del piano viabile, che si identificano con ondulazioni longitudinali e trasversali, depressioni localizzate (buche), avvallamenti, deformazioni trasversali (ormai), fessurazioni e alterazioni delle pendenze, sono spesso dovute ad una cattiva progettazione/costruzione del pacchetto stradale, che ha come diretta conseguenza una deformazione della carreggiata provocata dall'azione del traffico e da quella ambientale.

Le conseguenze sono dei movimenti verticali del veicolo che inducono fenomeni di vibrazione, con una considerevole riduzione del comfort di marcia, ma anche un'influenza sulla condotta di guida e sulla risposta meccanica e dinamica del veicolo, tra cui fenomeni di rollio e beccheggio, aumento degli spazi di frenatura e cattiva tenuta di strada, con perdita del contatto tra ruota e pavimentazione nelle situazioni estreme.

L'IRI, International Roughness Index, l'indice che esprime la suddetta caratteristica superficiale, è definito come l'entità dello scostamento di una superficie pavimentata da un piano ideale, e può essere stimato utilizzando apparecchiature come l'ARAN o l'ERMES.



Fig. 10.29: ARAN



Fig. 10.30: Particolare della barra trasversale

L'ARAN (Automatic Road Analyser) è un veicolo multifunzionale ad alto rendimento che permette non solo di valutare l'IRI, ma anche il profilo longitudinale, gli angoli planimetrici, il profilo trasversale, o parametri caratteristici del tracciato (posizione

viadotti, gallerie, svincoli...).

La prova viene effettuata in continuo e con una velocità compresa tra gli 80 e i 100 Km/h, senza che avvenga alcun contatto diretto con la superficie stradale.

Su una barra posizionata trasversalmente davanti al veicolo ad un'altezza di 40 cm, sono collocate delle sorgenti ultrasoniche con un passo costante, che generano una serie di impulsi di frequenza prefissata, e che vengono riflessi dalla pavimentazione, attivando un sistema di misura di precisione posto sopra le sorgenti stesse. La distanza tra il sensore e la superficie stradale viene calcolata sulla base del tempo intercorso tra il momento in cui l'impulso viene generato ed il momento in cui il sensore riceve l'impulso riflesso: si rileva così la regolarità della sezione trasversale, che non è tuttavia menzionata per il controllo della regolarità nel nuovo documento ANAS [56].

Per la regolarità del profilo longitudinale invece, il veicolo è dotato di rilevatori laser e accelerometri che misurano lo scostamento verticale e registrano l'influenza delle accelerazioni, sempre verticali, sul laser; dall'abbinamento dei due sistemi è possibile rilevare tutte le irregolarità della superficie stradale: i dati acquisiti verranno successivamente elaborati, mediante opportuno modello matematico, e permetteranno di calcolare l'indice IRI [56].

Dell'ERMES invece abbiamo ampiamente parlato in precedenza, in quanto unico veicolo che riesce contemporaneamente a misurare tutti i dati prestazionali superficiali, regolarità inclusa.

L'ANAS fornisce valori di accettabilità dell'indice IRI, previa analisi di tratti omogenei. Ricordiamo anche che l'IRI è legato attraverso una formula, in maniera indirettamente proporzionale, all'indice PSI (Present Serviceability Index, AASHTO 1986), il quale fornisce un'indicazione delle condizioni della pavimentazione stradale ai fini della sicurezza della circolazione, con valori che vanno da 0 (pessime condizioni) a 5 (ottime condizioni) [56].

10.8.3.4 Controllo degli spessori degli strati legati

In ultimo il documento ANAS analizza la misura dello spessore per gli strati bituminosi, che potrà essere effettuata sia con metodi distruttivi (estrazione di carote) che non distruttivi, con apparecchi dotati di Radar Penetrometrico (GPR, Ground Penetrating Radar) opportunamente tarato [42].

Questa tipologia di analisi va indubbiamente a completare il quadro di informazioni ricavato da altri sistemi di analisi della pavimentazione, precedentemente analizzati, e

costituisce d'altra parte una priorità per ogni azione di programmazione della manutenzione di una pavimentazione.



Fig. 10.31: Metodo tradizionale di valutazione dello spessore

Fig. 10.32: Carota di prova

Fig. 10.33: Apparecchiatura THETIS

Una delle apparecchiature più utilizzate è il THETIS, THickness Evaluation Tecnology and Investigation radar System, che dispone di due antenne ad alta frequenza (1,2 Ghz) per il controllo degli strati più superficiali, ed un'antenna da 600 Mhz per il controllo degli strati più profondi.

L'antenna radar emette un segnale elettromagnetico che penetra nella pavimentazione e viene parzialmente riflesso in corrispondenza delle discontinuità delle proprietà dielettriche del mezzo attraversato, che si identificano con le interfacce tra i diversi materiali incontrati (conglomerato bituminoso, misto cementato, fondazione).

Le onde riflesse vengono a loro volta captate dall'antenna e registrate attraverso un sistema automatico di acquisizione dati. Dall'analisi dei radargrammi ricavati, verranno dedotti i valori degli spessori.

Eventuali disturbi ai quali risulta soggetto il segnale, come rumori, attenuazioni, distorsioni e sfasamenti, possono essere limitati mediante opportune tecniche di elaborazione del segnale stesso.

Tuttavia se non è presente sufficiente contrasto tra i due strati (ad esempio se consideriamo due strati di conglomerato bituminoso), la posizione dell'interfaccia potrebbe non essere determinata con sufficiente precisione [42].

10.8.4 Conclusioni

A conclusione del documento ANAS analizzato, sono presenti:

- Tabella Normative/Metodi di prova.
- Appendice alle Linee Guida.

- Appendice alle Norme Tecniche.

Nella Tabella Normative/Metodi di prova sono elencate tutte le normative a cui si è fatto riferimento in tutto il documento, nello specifico soprattutto le UNI EN (di cui già abbiamo avuto modo di discutere nei capitoli precedenti), con il nome della prova stessa.

Nell'Appendice alle Linee Guida viene esposto il "Metodo razionale per la determinazione della vita utile delle pavimentazioni flessibili e semirigide".

Seguono poi l' "Analisi del traffico con calcolo di passaggi di assi equivalenti da 12 t e di anni a partire dal TGM", a cui già abbiamo fatto già riferimento nella prima parte del documento, e "Soluzione per nuove pavimentazioni e presenza di grande traffico".

A conclusione viene esposto il "Programma per il calcolo delle tratte omogenee", l' "Analisi dell'indice strutturale per il controllo della portanza delle pavimentazioni", un "Esempio di calcolo di CLAmix" e indicazioni sulla "Prova Brasiliana (diametrale): calcolo dei parametri" [57].

10.9 Il Test ITSM per la determinazione del modulo di rigidità

Il modulo di rigidità di un conglomerato bituminoso viene definito come l'abilità della miscela, di produrre deformazioni conseguenti all'applicazione di un carico [61].

Relativamente alla sovrastruttura stradale nel suo insieme, il modulo di rigidità rappresenta la capacità di diffondere le deformazioni all'interno del pacchetto stradale e, quindi, di assorbire le azioni del traffico veicolare, in funzione del legame presente tra gli strati; il modulo è quindi direttamente correlato alla capacità dei singoli materiali della pavimentazione di deformarsi sotto carico, ma anche al legame che intercorre tra gli strati stessi.

Per determinare il modulo di rigidità del conglomerato bituminoso in condizioni dinamiche, possiamo avvalerci del Test ITSM, Indirect Tensile Stiffness Modulus, le cui formule e procedure di prova sono descritte dalla *UNI EN 12697-26 Miscela bituminosa-Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo-Rigidità*; gli allegati invece forniscono le specifiche relative alle configurazioni di prova, come ad esempio quella a flessione su 2, 3, 4 appoggi, a trazione indiretta su provini cilindrici, o a trazione-compressione diretta [57].

In particolare la tipologia più diffusa in Italia è quella a trazione indiretta - ITSM, "Test di trazione indiretta su provini cilindrici", esposta nell'allegato C.

Questa prova è menzionata nello "Studio a carattere pre-normativo delle NORME

TECNICHE DI TIPO PRESTAZIONALE PER CAPITOLATI SPECIALI D'APPALTO", del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, negli articoli 4, 5 e 8.

Si tratta per l'appunto di una prova a trazione indiretta di tipo non distruttivo (il provino rimane disponibile per eventuali altre prove) che viene effettuata su provini cilindrici confezionati con miscele differenti; i campioni vengono sottoposti ad uno stato di tensione biassiale, che rispetto ai test di flessione rappresenta meglio le condizioni reali di sollecitazione [7].

La prova consiste nell'applicazione dinamica di un carico lungo il diametro verticale di un provino cilindrico e nella misurazione della deformazione orizzontale.

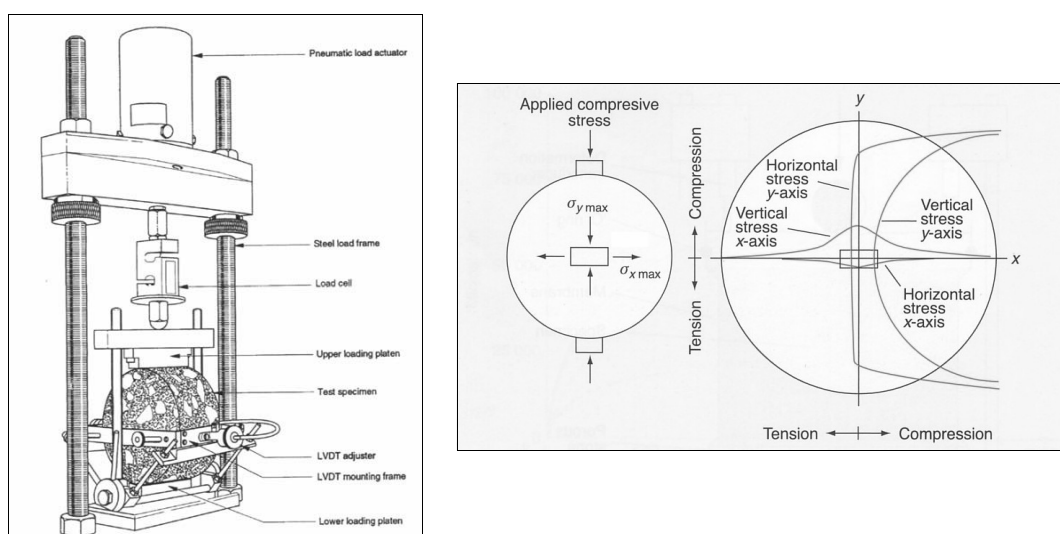


Fig. 10.34: Apparecchiatura per la determinazione dell'ITSM (MATTA)

Fig. 10.35: Distribuzione delle tensioni in un provino cilindrico con indicazione della direttrice di carico

Una forza verticale impulsiva, misurata ad ogni ciclo dalla cella di carico del sistema, viene applicata lungo due direttrici diametralmente opposte mediante un dispositivo pneumatico e distribuita attraverso due barre d'acciaio di dimensioni prefissate, con uguale raggio di curvatura del campione in esame: ciò produce sia tensioni verticali di compressione, sia orizzontali di trazione, che variano lungo i diametri, ma che risultano massimi al centro del provino.

La barra inferiore è fissata saldamente ad un piatto di acciaio, mentre quella superiore è connessa al sistema di carico attraverso una sfera, sempre d'acciaio, che garantisce l'applicazione di una forza assiale.

Un sistema composto da due trasduttori elettrici (LVDT, Linear Variable Differential Transducer) misura lo spostamento diametrale orizzontale massimo del campione,

perpendicolare alla direzione di applicazione del carico [57].

Dopo aver effettuato una prima calibrazione (mediamente con 5 colpi) per determinare il carico ottimale da imporre, si esegue il test vero e proprio: alla temperatura di riferimento di 20°C, una forza verticale impulsiva, con tempo di crescita e valore massimo assegnati dalla normativa, viene applicata sul provino per 5 cicli.

Una volta calcolate le tensioni massime e misurata la deformazione orizzontale massima, applicando la teoria dell'elasticità, è possibile ricavare il modulo di rigidezza, secondo la seguente formula, proposta dalla norma europea EN 12697:2004:

$$S_m = \frac{L}{D \cdot t} \cdot (v + 0,27)$$

S_m = Modulo di rigidezza [MPa];

L = Ampiezza del carico applicato [N];

D = Elongazione misurata lungo il diametro orizzontale [mm];

t = Spessore medio del provino [mm];

v = Coefficiente di Poisson [57];

C'è da specificare che nel calcolo delle deformazioni, non va considerata la quota parte plastica, ossia non restituita immediatamente dal materiale; ciò si traduce graficamente nell'effettuare la misurazione per un'onda di deformazione sul segmento verticale che, dal picco dell'onda, interseca la retta che congiunge il valore iniziale della stessa onda, con il valore iniziale dell'onda successiva.

Difatti durante la prova si accumula deformazione plastica per colpi successivi al primo, di cui bisogna tener debitamente conto, per evitare un'erronea valutazione della sola deformazione elastica.

Dopo aver stimato il modulo ad ogni ciclo, si calcola il valore medio dei risultati.

Si esegue lo stesso test riposizionando il provino nel telaio ruotato di 90°, sollecitando stavolta il diametro ortogonale al precedente: la media dei valori calcolati nelle due posizioni prescelte, indica il modulo di rigidezza del materiale sottoposto a prova [47].

10.10 Il Test ITFT per la determinazione della resistenza a fatica

L'ITFT (Indirect Tensile Fatigue Test) è un test che studia il comportamento a fatica dei conglomerati bituminosi.

Generalmente possiamo dire che la fatica nelle pavimentazioni è rappresentata dal fenomeno di fessurazione; essa è costituita dalla fase di innesco e quella di

propagazione della frattura stessa, provocata dalle deformazioni per trazione negli strati legati, che si generano a causa del carico indotto dal traffico, dalle variazioni di temperatura e dalle procedure di costruzione [57].

In una prima fase si formano delle micro-fratture che si saldano reciprocamente, per poi estendersi sempre di più, fino a diventare delle macro-fratture, che si propagano fino alla sovrastruttura.

La strumentazione utilizzata per la prova a fatica ITFT è il Material Testing Apparatus, meglio conosciuto come MATTA; la sua caratteristica principale è la versatilità, cioè la capacità di effettuare prove di diverso genere in funzione del tipo di telaio utilizzato per il bloccaggio del provino. Le prove che possono essere condotte con questo tipo di apparecchiatura sono la prova a trazione indiretta ITSM, la prova a trazione indiretta a fatica, oppure la prova di compressione diretta.

Il test ITFT è descritto dalla normativa *UNI EN 12697-24 Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Resistenza alla fatica*.

Negli allegati invece sono esposte le specifiche relative alle configurazioni di prova, come ad esempio quella a flessione su 2, 3, 4 punti (appoggi), a trazione-compressione, a trazione indiretta impulsiva, o a flessione con rotazione [57].

Sulla base dei risultati provenienti da prove cicliche, viene disegnata su un grafico la linea a fatica caratteristica del materiale, attraverso una regressione lineare dei punti che corrispondono al criterio di rottura scelto (rottura del provino o decadimento delle sue proprietà elastiche).

I risultati dell'ITFT test sono esprimibili mediante una formula:

$$N_f = C \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^m$$

in cui N_f indica il numero di cicli a rottura, ε_t indica la deformazione dello strato (verticale), C ed m sono costanti che dipendono dal materiale considerato; questa formulazione viene relazionata alle curve di fatica di laboratorio, mentre nel caso si tratti di una legge di fatica a fessurazione in sito viene utilizzata un'espressione diversa, di forma generalizzata valida per i conglomerati bituminosi:

$$N = K_1 \cdot \varepsilon^{-K_2} \cdot E^{-K_3}$$

intendendo con K_1 K_2 K_3 valori di calibrazione, ε la deformazione dello strato considerato, ed E il modulo elastico sempre dello strato considerato. Ricordiamo che i valori dei parametri K sono stimati diversamente a seconda dell'ente e dell'istituto di ricerca considerato.

Seppur il test ITFT sia di facile impiego, sia rappresentativo delle condizioni reali dello stato tensionale biassiale rispetto a quello monoassiale, presenti un'estrema facilità di produrre provini cilindrici in laboratorio ed in sito, e sia contraddistinto da una maggior ripetibilità della prova stessa rispetto ad altre configurazioni a fatica (ad esempio quella flessionale), è caratterizzato anche dal fatto di non poter variare il rapporto esistente tra tensione verticale e tensione orizzontale applicata, di non permettere l'inversione delle tensioni a causa della sua stessa configurazione, e di sottostimare significativamente la resistenza a fatica del materiale stesso, reintegrabile tuttavia con fattori correttivi [57].

Proprio per questi motivi molte volte il test non viene reputato idoneo, e preferito dalle configurazioni di prova 2PB e 4PB, ossia flessione su 2 e 4 appoggi (punti), nelle quali ad esempio l'inversione delle tensioni è possibile.

CAPITOLO 11 - RISANAMENTO PROFONDO DELLA EX SS. 343 "ASOLANA"

11.1 Progetto della pavimentazione

11.1.1 Generalità

A titolo esemplificativo di quanto detto fin'ora, riportiamo i punti chiave di un intervento di risanamento profondo, relativo alla sovrastruttura stradale esistente lungo la ex SS. 343 "Asolana" in località Colorno e S. Polo, eseguito recentemente da parte dell'ANAS.

La pavimentazione esistente, relativamente giovane in quanto "nata" nel 2005, dopo poco tempo dalla sua messa in opera, ha presentato numerosi ammaloramenti, verificatisi nel tratto compreso tra lo Svincolo Sud e il Viadotto sul Torrente Parma, che hanno reso necessario un intervento di manutenzione straordinaria.



Fig. 11.1 - 11.2: Ammaloramenti presenti nella vecchia pavimentazione

Il pacchetto stradale prevedeva uno strato di usura superficiale in conglomerato bituminoso chiuso di 3 cm, un sottostante strato di collegamento ancora in conglomerato bituminoso di 4 cm ed uno strato di base in conglomerato bituminoso di 10 cm, per complessivi 17 cm; la fondazione sottostante agli strati legati era costituita da stabilizzato granulometrico di 35 cm, che completavano i 52 cm della sovrastruttura oggetto d'indagine.

La causa degli ammaloramenti è da ricercarsi proprio nello strato di fondazione: difatti prove di laboratorio hanno confermato la presenza di materiale plastico, sensibile all'acqua, deformabile, e che conseguentemente non garantisce il giusto supporto agli

strati legati sovrastanti.



Fig. 11.3: Carota estratta dalla pavimentazione della SS. 343 nel Marzo 2008

Durante i sopralluoghi del Marzo 2008, sono stati effettuati dei carotaggi e dei pozzetti che hanno confermato la corrispondenza degli spessori delle zone oggetto d'indagine con quelli di progetto; tuttavia lo strato di fondazione non possedeva adeguate caratteristiche meccaniche, come indicato dai risultati delle prove effettuate che vedremo in seguito (indice plastico compreso tra 6 e 9, materiale appartenente ai gruppi A2-4 ed equivalente in sabbia prossimo al 28%): la scarsa qualità del materiale di fondazione ha quindi ridotto notevolmente la portanza complessiva del pacchetto stradale.

Malgrado ciò anche il carico elevato prodotto dal notevole volume di traffico pesante transitante, e forse sottostimato nello studio di progetto precedente, hanno aggravato una situazione di per sé già compromessa, anticipando così i tempi dell'intervento manutentorio straordinario.

La condizione critica in cui versava la pavimentazione è stata confermata dalle analisi numeriche relative allo stato tensionale e deformativo a cui erano sottoposti i vari strati della pavimentazione stessa, e che hanno successivamente permesso di valutarne la vita utile residua.

11.1.2 Relazione descrittiva dell'intervento

La soluzione proposta, di tipo flessibile, è costituita da uno strato di usura superficiale in conglomerato bituminoso chiuso di 3 cm, un sottostante strato di base in conglomerato bituminoso fresato stabilizzato di 17 cm di spessore, per complessivi 20 cm: in relazione agli strati legati è stato previsto un intervento di riciclaggio degli strati esistenti, con la tecnica dell'emulsione bituminosa e cemento; per la fondazione sottostante, invece, è

stata prevista una stabilizzazione in sito a calce e cemento dello spessore di 30 cm, a completamento dei 50 cm di spessore della sovrastruttura.

Le fasi della lavorazione prevedono quindi la rimozione della pavimentazione esistente in conglomerato bituminoso, mediante scarificazione a freddo e stoccaggio in sito del materiale fresato: una parte verrà utilizzata per le successive lavorazioni, mentre il quantitativo eccedente verrà trasportato in deposito.

Successivamente la fondazione esistente sarà trattata a calce, per ridurre la plasticità del materiale; dopo la stesa con apposita macchina spandicalce, verrà effettuata la miscelazione del legante idraulico e del materiale di fondazione tramite fresa, completando il trattamento con la regolarizzazione e compattazione dello strato.

La fondazione stabilizzata a calce sarà successivamente trattata con cemento, steso con macchina spandicalce e successivamente miscelato con il materiale precedentemente stabilizzato a calce. Infine verranno nuovamente effettuate la regolarizzazione e la compattazione dello strato trattato.

Una volta ultimata la stabilizzazione della fondazione esistente, si procederà alla stesa tramite vibrofinitrice dei conglomerati fresati miscelati in impianto, con emulsione bituminosa additivata a cemento, che verranno successivamente regolarizzati e compattati; infine la pavimentazione sarà completata con il rifacimento dello strato di usura e della necessaria segnaletica verticale.

Sono stati inoltre valutati interventi di ripristino localizzati che prevedono esclusivamente la fresatura di parte dei conglomerati e la stesa di un idoneo strato di usura.

11.1.3 Aspetti progettuali: gli obiettivi dell'intervento

L'intervento di manutenzione straordinaria relativa alla SS. 343 "Asolana", è finalizzato a:

- I. Garantire la stabilità strutturale durante la vita utile della pavimentazione stessa, stimata in 20 anni: in tal senso lo stato di sollecitazione sotto carico, calcolato tenendo conto anche delle leggi di fatica al fine di valutare la ripetitività dei carichi stessi, dovrà rientrare nei limiti di accettabilità previsti per la tipologia di materiali utilizzati.
- II. 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: sarà pertanto di fondamentale importanza l'analisi della tessitura dello strato superficiale di usura.

- III. Consentire un ridotto impatto ambientale nonché un risparmio di materie prime pregiate e di risorse di cava: ciò sarà possibile sia perché ci si avvarrà di una tecnologia "a freddo" di stabilizzazione, sia grazie all'utilizzo di materiale fresato proveniente dalla demolizione della vecchia pavimentazione, che verrà per l'appunto stabilizzato a freddo aggiungendo emulsione bituminosa e cemento, per la realizzazione dello strato di base.
- IV. Garantire tempi esecutivi il più possibile brevi e certi, avvalendosi di una tecnologia già consolidata, nonché una facile e ridotta manutenzione ed una buona funzionalità nell'arco della vita utile della sovrastruttura, con l'utilizzo di materiali idonei che possano garantirne la maggiore durabilità possibile.

11.1.4 Le indagini sui materiali esistenti: risultati delle prove di laboratorio (condotte nel 2008)

Le indagini necessarie per la determinazione della miglior soluzione possibile d'intervento, sono state condotte relativamente al terreno di rilevato, allo strato di fondazione esistente, e allo strato "legato", composto da base, binder, usura.

Rilevato

L'analisi sui 3 campioni di rilevato prelevati in 3 diversi punti della pavimentazione ammalorata, e più precisamente nella Sez 89 sinistra Km 2+100 Sud, Sez 206 Nord Km 4+600, e Sez 175 Sud Km 3+600 sinistra, hanno permesso mediante le prove di analisi granulometrica di una terra (CNR B.U. n.23:1971) e di determinazione dei limiti di Atterberg di una terra (CNR UNI 10014:1964), di "classificare" il terreno analizzato (CNR UNI 10006:2002).

La percentuale di materiale passante al setaccio 0,075 UNI è minore del 35% sul totale, caratteristico delle terre ghiaio-sabbiose; inoltre la frazione passante al setaccio 2 UNI è mediamente del 30%, mentre quella relativa al setaccio 0,4 UNI e al setaccio 0,075 UNI si aggira rispettivamente attorno al 20% e al 14%; considerando poi che il limite liquido W_L assume, sempre in termini "medi", il valore 34-35, il limite plastico W_P il valore 31-32, da cui l'indice di plasticità I_P il valore 3, possiamo classificare il materiale oggetto d'indagine come appartenente alla classe granulometrica di tipo A1-a (CNR UNI 10006:2002).

Il materiale analizzato è pertanto di ottima qualità.

Fondazione

Per lo strato di fondazione della sovrastruttura esistente, invece, i risultati delle indagini condotte su 4 campioni di materiale, prelevati nella Sez 44 Nord Km 1+0,50 destra, Sez 89 Sinistra Km 2+100 Sud, Sez 206 Nord Km 4+600 destra e Sez 175 Sud Km 3+600, hanno permesso di identificare uno strato di qualità inferiore rispetto al materiale precedentemente analizzato.



Fig. 11.4 - 11.5 - 11.6: Immagini del materiale di fondazione prelevato nel 2008

Anche in questo caso, come per il rilevato, sono state condotte le prove di analisi granulometrica, determinazione dei limiti di Atterberg e classificazione del terreno oggetto di studio.

La percentuale di materiale passante al setaccio 0,075 UNI è ancora una volta minore del 35%, mentre le frazioni passanti ai setacci 2 UNI, 0,4 UNI e 0,075 UNI sono del 29-31%, del 22-24% e del 12-13%; tuttavia il limite liquido W_L in tre campioni su quattro assume mediamente il valore 28-29, il limite plastico W_P il valore 21, da cui l'indice di plasticità I_p 7-8, che esclude l'appartenenza del materiale analizzato alle classi granulometriche A1 e A3 (per le quali l'indice di plasticità deve essere minore di 6), identificandosi invece con la tipologia A2-4, per la quale l' I_p deve essere minore di 10 e il W_L minore-uguale di 40.

Un campione su 4 tuttavia presenta un W_L di 18, un limite plastico W_P di 16, con conseguente indice di plasticità I_p di 2; la sua classificazione sarà pertanto di tipo A1-a.

Questa situazione mette pertanto in evidenza la diversità dei terreni utilizzati per lo

strato di fondazione, che in accordo con altri test effettuati in seguito sugli stessi campioni, confermeranno le caratteristiche più, o meno buone del materiale analizzato, giustificando anche la "localizzazione" in certi punti della sovrastruttura degli ammaloramenti rilevati.

Su questi stessi campioni (appartenenti alla fondazione) sono state condotte altre prove, per la misura dell'equivalente in sabbia (CNR B.U n.27:1972), per la determinazione della perdita in peso per abrasione L.A. (CNR B.U. 34:1973), dell'umidità ottimale di costipamento e della densità secca (prova Proctor, CNR B.U. n.69:1978, con procedimento AASHTO modificato), ma soprattutto per la determinazione dell'indice di portanza C.B.R. dopo 4 giorni di imbibizione in acqua (CNR UNI n.10009:1964).

Valutando come nei casi precedenti la media dei risultati ottenuti, avremo un valore di equivalente in sabbia indicativa del 28%, una perdita in peso L.A. del 13%, un'umidità ottimale di costipamento dell'11,8% con densità secca massima di 2,234 g/cm³; in particolare il valore della portanza nel caso del campione di classe A1 è del 56%, il valore medio della portanza sui 4 campioni è del 49,5%, mentre la media sui soli 3 campioni di classe A2-4 è del 47% circa. Generalmente sono accettati valori di portanza non minori di 50.

Conglomerato bituminoso di usura, di collegamento (binder) e di base

La parte superiore della sovrastruttura stradale esistente è costituita da un doppio strato di conglomerato bituminoso prodotto e steso a caldo (in modo tradizionale), di cui a sua volta la parte inferiore è costituita da uno strato di collegamento (binder), mentre la parte superiore è costituita da uno strato di usura.

Sono stati prelevati dalla vecchia pavimentazione 4 campioni di conglomerato bituminoso tipo Base-Binder-Usura, sottoforma di carote, nelle Sez 44 Nord Km 1+0,50, Sez 89 sinistra Km 2+100 Sud, Sez 206 Nord Km 4+600 e Sez 175 Sud Km 3+600.

Viene inizialmente svolta una prova per la "Determinazione del peso di volume della miscela di aggregati lapidei e bitume o catrame" (CNR B.U. n.40:1973) di ogni singolo strato (Base, Binder, Usura), condotta su campioni di conglomerato bituminoso tipo Base+Binder+Usura sottoforma di carota.

Successivamente si effettua un'analisi granulometrica su campioni di conglomerato bituminoso rispettivamente di tipo base, di tipo binder e di tipo usura, ciascuno dei quali è stato ottenuto dal mix dei 4 strati di base, dei 4 strati di binder e dei 4 strati di usura, ottenuti dalle carote precedentemente analizzate, per stabilire se la miscela scarificata

abbia una composizione granulometrica appartenente al fuso di progetto, o debba eventualmente essere reintegrata con aggregati nuovi; vengono poi svolte le prove per la "Determinazione del contenuto di legante di miscele di bitume ed aggregati lapidei" (CNR B.U. n.38:1973) e per la valutazione della "Massa volumica apparente dei granuli" (CNR B.U. n.63:1978).

Dall'unione dei precedenti risultati e assumendo un valore predefinito per il peso specifico del bitume, è possibile individuare la percentuale dei vuoti presenti nelle carote, e quindi nei vari strati del conglomerato posto in opera, delle miscele analizzate (CNR B.U. n.39:1973), mediante la seguente formula:

$$v = 100 - \gamma \cdot \left(\frac{b_c}{\gamma_b} + \frac{100 - b_c}{\gamma_a} \right)$$

intendendo con:

γ = il peso di volume della miscela;

b_c = la percentuale di legante riferita al peso della miscela;

γ_b = il peso specifico del legante (valore assumibile 1,02 - 1,04 g/cm³);

γ_a = il peso specifico dei granuli dell'aggregato.

Mediamente la percentuale dei vuoti è all'incirca dell'8,3% per lo strato di base, del 7,5% per lo strato di binder e del 6,8% per lo strato di usura.

Dai risultati delle prove condotte potremmo concludere che nel complesso gli strati legati hanno ancora delle buone caratteristiche, e ciò permette di valutarne il possibile riutilizzo tramite un intervento di riciclaggio.

11.1.5 La soluzione progettuale proposta

La soluzione progettuale proposta prevede, come nella pavimentazione precedente, una soluzione di tipo flessibile costituita da uno strato di usura superficiale in conglomerato bituminoso chiuso di 3 cm, un sottostante strato di base in conglomerato bituminoso fresato stabilizzato di 17 cm di spessore per complessivi 20 cm; al di sotto degli strati legati è previsto un intervento di "rafforzamento" mediante la realizzazione di una fondazione in terra stabilizzata in sito a calce e cemento dello spessore di 30 cm, che vanno a completare un pacchetto stradale di 50 cm complessivi (di spessore).

La vecchia pavimentazione in conglomerato bituminoso verrà quindi rimossa mediante apposite scarificatrici a freddo, ed il materiale fresato necessario per le successive lavorazioni verrà stoccato per il suo riutilizzo, mentre la quantità eccedente verrà

trasportata in depositi specifici.

La superficie di fondazione verrà quindi preventivamente trattata a calce, per ridurre la plasticità del materiale; si provvederà alla posa di ossido di calcio ("calce viva", circa 1-1,5% del peso dell'inerte) o idrossido di calcio ("calce spenta", circa 2-2,5% del peso dell'inerte) con apposita macchina spandicalce, alla successiva miscelazione con materiale di fondazione grazie all'utilizzo di una fresa, e alla finale regolarizzazione e compattazione dello strato.

In seguito lo stesso materiale verrà trattato a cemento, similmente steso con macchina spandicalce (in ragione del 2-2,5% circa) e successivamente miscelato con il materiale stabilizzato a calce. Lo strato verrà nuovamente regolarizzato e compattato.

Questo tipo di intervento determina importanti cambiamenti delle caratteristiche meccaniche della terra trattata, già dopo 7 giorni di maturazione: difatti si verifica un notevole aumento dell'indice C.B.R. post-saturazione, ed un incremento sia della resistenza a compressione che a trazione (sia indiretta che per flessione).

Nell'esecuzione dell'intervento di risanamento profondo si è fatto esplicito riferimento alle Linee Guida ANAS 2008 "Gestione delle Pavimentazioni Stradali".

Completata quindi la stabilizzazione della fondazione esistente, si proseguirà con la stesa tramite vibrofinitrice dello strato di base, costituito da conglomerato bituminoso riciclato a freddo in impianto con la tecnica dell'emulsione bituminosa (modificata) e cemento, per la cui realizzazione si è fatto esplicito riferimento alle "Linee Guida di Progetto ed alle Norme Tecniche Prestazionali" dell'ANAS (Aprile 2008).

Con questa metodologia si ottiene un materiale che garantisce una buona resistenza a rottura per fatica ed un'elevata rigidità, pur conservando la capacità di auto-riparazione e la flessibilità tipiche di uno strato legato a bitume.

Per l'esecuzione dell'intervento ci si avvarrà di idonee attrezzature che permettono di miscelare il materiale bituminoso fresato con emulsione bituminosa modificata e cemento, eventuali inerti freschi, additivi ed acqua, omogeneizzare, stendere e compattare il conglomerato ottenuto.

Una volta regolarizzato e compattato quest'ultimo strato, la pavimentazione potrà essere completata con il rifacimento dello strato di usura.

11.1.6 Generalità sul programma Bisar e definizione dei moduli elastici e di Poisson da utilizzare

Il modello di calcolo impiegato per completare lo studio della sovrastruttura, è il

programma BISAR della Shell, con il quale è possibile calcolare tensioni, deformazioni e deflessioni in un punto qualsiasi di un multistrato elastico soggetto a carichi circolari in superficie.

La sovrastruttura stradale viene schematizzata come un insieme di strati sovrapposti ed appoggiati su un semispazio elastico: il sottofondo. Le ipotesi che si fanno sul multistrato sono le seguenti:

- la sovrastruttura è costituita da strati orizzontali che presentano spessore uniforme su tutta la larghezza;
- gli strati hanno dimensione illimitata nel piano orizzontale e spessore finito, ad eccezione del sottofondo che viene considerato come semispazio illimitato;
- il materiale che costituisce ogni strato viene considerato omogeneo, isotropo e perfettamente elastico ed è quindi caratterizzato dalle costanti E , modulo elastico di Young, e ν , coefficiente di Poisson;
- grazie alla perfetta aderenza fra i vari strati non vi è possibilità di scorrimento sui piani orizzontali.

Nella descrizione dei materiali in opera condotta nei paragrafi precedenti, si è portata particolare attenzione alla stima della loro qualità, per la successiva indagine sullo stato tensionale e deformativo della vecchia pavimentazione, e per un corretto dimensionamento della nuova sovrastruttura.

Dalla precedente analisi e considerando le caratteristiche dei "nuovi" materiali che andranno posti in opera, è possibile ipotizzare i valori dei parametri di deformabilità E (modulo di deformazione) e ν (coefficiente di Poisson) che caratterizzano ogni strato della pavimentazione, purché il materiale costituente, come accennato poco fa, sia considerato omogeneo, isotropo e perfettamente elastico.

La buona qualità del materiale appartenente al sottofondo-rilevato ha permesso, ad esempio, di ipotizzare un modulo di deformazione $E_0 = 80$ MPa e un coefficiente di Poisson $\nu_0 = 0,40$; per lo strato di fondazione esistente, tenendo conto dei limiti precedentemente descritti del materiale, sono stati assunti i valori $E_1 = 50$ MPa e $\nu_1 = 0,45$.

Considerando poi le buone caratteristiche degli strati di usura e di collegamento (binder), e che la loro composizione granulometrica è quasi totalmente appartenente al fuso di progetto, i valori dei parametri di deformabilità considerati sono $E_4 = 2500$ MPa

e $\nu_4 = 0.35$; chiaramente essendo le caratteristiche reologiche del conglomerato bituminoso (CB) notevolmente influenzate dalla temperatura, il valore del modulo precedentemente indicato è stato stimato sulla base di una temperatura di esercizio di 20°C, ottenuta dalla media delle temperature della pavimentazione previste durante l'arco dell'anno.

Infine dai risultati delle prove condotte sul conglomerato di base, ed in particolar modo dalla sua analisi granulometrica, è stato possibile assumere per il modulo e per il coefficiente i valori $E_5 = 2000$ MPa e $\nu_5 = 0.35$.

Relativamente agli interventi di ripristino che sono stati effettuati sulla pavimentazione, e nello specifico di risanamento profondo, si è tenuto conto dei limiti derivanti dall'utilizzo di una miscelazione ternaria di terreno presente in sito con ridotte quantità di calce e cemento: sono stati dunque considerati i valori $E_2 = 600$ MPa e $\nu_2 = 0,20$; le buone caratteristiche meccaniche offerte invece dal conglomerato bituminoso fresato, stabilizzato con emulsione bituminosa e cemento, hanno permesso di assumere i valori $E_3 = 2200$ MPa e $\nu_3 = 0,35$.

Dopo aver quindi ipotizzato i parametri di deformabilità (E , ν) della sovrastruttura esistente, *SV1*, e della soluzione progettuale proposta, *SV2*, unitamente agli spessori considerati in fase di dimensionamento e adottando per entrambe gli stessi carichi, è stato possibile valutare lo stato tensionale e deformativo a cui sono sottoposti i vari strati che compongono la sovrastruttura (ai fini delle successive verifiche), prendendo in considerazione 14 punti significativi della pavimentazione; è stato inoltre possibile verificarne la vita utile, considerando i cicli di carico a cui la pavimentazione stessa era sottoposta (in termini di Assi Standard Equivalenti) e le leggi di fatica in relazione ai materiali stradali impiegati.

11.1.7 Analisi del traffico per la valutazione del carico

Per effettuare una corretta analisi dei carichi di una pavimentazione, è necessario conoscere il numero, il tipo e la frequenza dei veicoli che transiteranno sulla sovrastruttura durante la sua vita utile, con particolare attenzione ai veicoli pesanti, da cui è possibile ricavare il carico trasmesso dagli assi alla pavimentazione stessa.

Si è inizialmente considerato come asse singolo di riferimento (E.S.A.: Equivalent Standard Axle) l'asse avente carico massimo da 130 kN, valutando successivamente il carico per ogni coppia di ruote gemellate e per ogni ruota singola, nonché la loro pressione di gonfiaggio.

È stato poi determinato il Traffico Giornaliero Medio (TGM) massimo, calcolato sull'asse principale per ogni direzione di marcia, con stime effettuate per il 2008, per il 2018 e per il 2028, ossia ogni dieci anni, per tutto il tempo della vita utile della sovrastruttura, assunta pari a 20 anni. Ipotizzando poi una percentuale di traffico pesante del 10% e considerando che i giorni lavorativi annuali sono all'incirca 240, vengono calcolati il numero dei veicoli pesanti che transiteranno durante l'arco dell'anno nei tre anni di riferimento (2008, 2018, 2028), per stimare infine il numero totale di veicoli pesanti ed il numero totale di assi equivalenti nell'intera vita utile della pavimentazione (che nel nostro caso risulta essere **3.939.000** assi equivalenti da **130 kN**).

11.1.8 Verifiche

In base ai risultati tenso-deformativi in punti specifici della pavimentazione, ottenuti dal programma Bisar, vengono infine effettuate le verifiche strutturali e funzionali e le verifiche a fatica durante l'intera vita utile della pavimentazione, in relazione ai cicli di carico espressi in termini di Assi Standard Equivalenti (come indicato nel paragrafo precedente).

Nel primo caso (verifiche strutturali e funzionali) vengono analizzate:

- la deflessione massima in superficie per garantire un'adeguata portanza;
- la deformazione specifica massima nel conglomerato bituminoso;
- la tensione massima nel conglomerato bituminoso superficiale (usura+binder per SV1, solo usura per SV2, e base per entrambe) nei casi di compressione e trazione;
- la tensione radiale massima di trazione (rispetto alla tensione di rottura per trazione) per una terra stabilizzata a calce e cemento;
- il controllo della deformazione verticale alla sommità del sottofondo per evitare deformazioni plastiche di fondazione.

Nel secondo caso (verifiche a fatica) vengono effettuate le verifiche a fatica del conglomerato bituminoso (usura+binder per SV1, solo usura per SV2, e base per entrambe), della terra stabilizzata a calce e cemento e del sottofondo (in quest'ultimo caso sia in termini tensionali che deformativi).

11.2 Progetto delle miscele elaborate per l'intervento di Colorno

L'esecuzione dell'intervento di risanamento proposto, è stata condotta dalla CGS Consolidamenti SPA (STS Mobile), che ha elaborato uno studio di formulazione sia per

il conglomerato bituminoso riciclato a freddo in impianto con emulsione modificata, sia per la fondazione con terreno stabilizzato con leganti idraulici.

11.2.1 Studio di formulazione: fondazione con terreno stabilizzato con leganti idraulici

Il presente studio è stato condotto in accordo con le "Linee Guida di Progetto e Norme Tecniche Prestazionali" dell'ANAS SPA, per relazionare in merito alle caratteristiche tecnologiche dei materiali utilizzati per l'intervento.

11.2.1.1 Generalità sulla stabilizzazione dei terreni

Il suolo è fisicamente composto da 5 elementi, ghiaia, sabbia, limo, argilla e materiale organico, che si combinano tra loro e determinano il carattere del suolo stesso a seconda della loro presenza in termini percentuali.

La materia organica ha effetti sempre e comunque negativi, mentre le terre coesive presentano una resistenza decrescente a fronte di un maggior contenuto di acqua, il che le rende meno adatte per l'utilizzo stradale; tuttavia le terre generalmente raggiungono la massima stabilità e densità nel momento in cui la compattazione avviene con una quantità ottimale di acqua.

Proprio per questo motivo vengono effettuati interventi di stabilizzazione che preservano la maggior parte delle proprietà dei suoli, evitando che siano alterate eccessivamente dall'acqua, e migliorandone tra l'altro le caratteristiche di portanza.

Il risultato di questa tipologia di intervento, consiste soprattutto nella stabilità meccanica che il terreno raggiunge, ossia la resistenza sotto carico a qualsiasi spostamento laterale, che si ottiene portando i vari componenti della miscela alle giuste proporzioni.

La stabilizzazione può essere effettuata per qualunque strato della sovrastruttura, dal sottofondo alla base, ma anche per più strati qualora la situazione lo richieda.

Le metodologie sono tre:

- ✓ miscelazione in sito;
- ✓ impianto mobile;
- ✓ impianto fisso o centrale.

Chiaramente ogni intervento è diverso dall'altro, tuttavia ci si avvale di operazioni preliminari identiche per tutti i casi: si considera pertanto l'analisi delle terre da stabilizzare per valutarne i difetti, si effettua la scelta del legante più idoneo nonché la quantità percentuale di utilizzo, se ne verifica la disponibilità in sito sia dal punto di

vista logistico che economico e si considerano le condizioni ambientali di posa.

Dopo aver determinato lo spessore dello strato da trattare e l'umidità ottimale di costipamento, lo studio proseguirà in relazione alle fasi operative dell'intervento, ovvero al controllo topografico delle quote e dei bordi, all'esame delle condizioni di traffico e delle possibili deviazioni nel corso dei lavori, e all'analisi delle modalità esecutive (posa in opera) in base alla disponibilità dei mezzi nel periodo scelto e al programma generale dei lavori.

Chiaramente poi gli accorgimenti da prendere entreranno maggiormente nello specifico, a seconda della metodologia utilizzata.

Nel caso di miscelazione in sito, ad esempio, la procedura prevede l'utilizzo di un "treno di macchine" che lavorano in successione: preparano lo strato livellandolo, sagomandolo ed eliminando qualsiasi oggetto che possa depotenziare l'intervento (sassi, radici, cespugli), scarificano e polverizzano la pavimentazione, eseguono lo spandimento del legante idraulico utilizzato, effettuano il mescolamento con la terra e l'acqua di aggiunta ottimale; l'operazione si conclude con il costipamento dello strato mediante rulli di tipo e peso adatti alla situazione e con la posa di un manto di protezione.

11.2.1.2 La stabilizzazione a cemento

Il cemento esercita sul materiale da trattare due importanti azioni:

- limita gli inconvenienti provocati dall'eccesso di acqua presente nelle terre coesive, riducendone la plasticità ed esercitando quindi un'azione "correttiva";
- esplica un'azione legante sul materiale trattato; ricordiamo tuttavia che le terre maggiormente predisposte a questo tipo di trattamento sono poco argillose, come limi, sabbie o misti granulari, escludendo inoltre le terre ricche di sali (soprattutto solfati) e quelle contenenti più del 3% di sostanze organiche.

Il legante di maggior impiego per questo tipo di trattamento è il cemento normale 325; l'acqua utilizzata nel processo non deve contenere sostanze organiche, argille o sali, che potrebbero alterare la presa del legante.

Le analisi di laboratorio da condurre sono relative a:

- l'identificazione del terreno (analisi granulometrica, limiti di Atterberg, percentuale di materia organica e solfati), per stabilire se il materiale è idoneo o meno al trattamento;
- prove di costipamento, che permettono di analizzare il comportamento del

terreno con diverse percentuali di legante, nonché di definire la condizione di umidità ottimale (OMC, Optimum Moisture Content) e la massima densità del materiale, mediante la prova Proctor modificata;

- prove di compressione in relazione alla quantità di cemento utilizzata: in realtà diversamente dalla stabilizzazione con bitumi, non esiste un ottimale del legante oltre il quale si ha un peggioramento delle caratteristiche della miscela, ma anzi, entro certi limiti (ricordiamo che un eccesso di cemento accentua il fenomeno del ritiro, provocando fessurazioni) ad un aumento di legante corrisponde un aumento della resistenza meccanica: saranno solo considerazioni economiche a limitarne la percentuale di utilizzo al minimo quantitativo che permetta di raggiungere gli scopi richiesti.

11.2.1.3 La stabilizzazione a calce

La calce aerea o calce comune, più economica del cemento, ha origine dal calcare, una pietra che contiene carbonato di calcio e che se riscaldata ad alta temperatura, si dissocia formando ossido di calcio.

La calce aerea può essere suddivisa in calce 'viva', costituita prevalentemente da ossido di calcio (CaO), e calce 'idrata', o 'spenta', costituita prevalentemente da idrossido di calcio (Ca(OH)_2); la calce spenta si ottiene dalla calce viva a seguito della cosiddetta operazione di spegnimento eseguita con getti d'acqua, con la quale l'ossido di calcio si trasforma in idrossido di calcio.

Per questioni di sicurezza e praticità viene più frequentemente utilizzata la calce spenta per stabilizzare terre molto plastiche, ottenendo così notevoli vantaggi:

- diminuzione della plasticità, con aumento dell'indice plastico (il limite liquido varia poco) e conseguente diminuzione dell'IP fino al 40%;
- diminuzione dell'attitudine della terra a modificare il proprio volume;
- aumento del limite di ritiro;
- aumento dell'ottimale di acqua di compattazione (la curva Proctor si sposta verso destra), consentendo di stabilizzare terre anche molto umide come quelle argillose, ma ottenendo di contro una diminuzione della densità massima;
- appiattimento della curva Proctor, che facilita il costipamento in quanto si allarga la fascia dell'OMC, ma solo nel caso in cui l'IP sia superiore a 10 (terre di tipo A-6, A-7): in caso contrario la tendenza è opposta;
- aumento della resistenza della terra per azione cementante della calce.

Generalmente questi effetti si manifestano dai 3 ai 14 giorni dopo l'esecuzione del trattamento, mentre per l'ultimo punto sono necessari alcuni mesi.

Relativamente ai materiali trattati a calce, possiamo distinguere un comportamento a breve e a lungo termine.

11.2.1.3.1 Comportamento a breve termine

A breve termine si verifica innanzitutto il fissaggio chimico dell'acqua: la molecola di ossido di calcio presenta infatti una particolare affinità ad unirsi alle molecole d'acqua, formando idrossido di calcio; la reazione, fortemente esotermica, causa l'evaporazione del fluido e la sensibile riduzione del contenuto di umidità del materiale trattato, che viene conseguentemente "asciugato".

Un altro meccanismo che si sviluppa a breve termine è lo scambio cationico e la conseguente flocculazione delle particelle di argilla, che si verifica nel momento in cui gli ioni liberi in soluzione si "scambiano" con particolari ioni del terreno (sodio monovalente, idrogeno e potassio), determinando nella prima ora la formazione di importanti legami tra le particelle disperse di argilla, che si uniscono e facilitano le operazioni di miscelazione e compattazione.

Come accennato prima nel complesso si verificherà la diminuzione dell'IP, uno schiacciamento e spostamento verso destra della curva Proctor (l'ottimo di densità secca, peraltro diminuita per effetto dell'aumento dell'indice dei vuoti, si otterrà quindi con una percentuale di umidità maggiore); inoltre si riscontrerà una modifica della distribuzione granulometrica a causa della flocculazione delle particelle di argilla, una riduzione del rigonfiamento e del ritiro per la formazione di legami pressoché stabili che ostacolano le variazioni di volume, ma soprattutto un aumento dell'indice C.B.R. da 4 a 10, dopo solo due ore.

11.2.1.3.2 Comportamento a lungo termine

A lungo termine si sviluppa una reazione di cementazione tra il calcio disponibile della calce e particolari componenti presenti nel terreno (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), dando origine a silicati e alluminati di calcio molto stabili che si comportano come un cemento naturale di tipo Portland: il comportamento più o meno reattivo sarà differente a seconda della tipologia specifica di argilla presente nel terreno (caolinite, montmorillonite e illite).

Gli effetti che si verificano sulla miscela a lungo termine, a seguito di tali meccanismi, sono riassumibili in:

- aumento della resistenza a trazione e compressione;
- incremento della resistenza a taglio, sia per il contributo fornito dalla coesione che dall'aumento dell'angolo di resistenza;
- aumento del modulo di elasticità e del valore del coefficiente di Poisson;
- incremento della resistenza a fatica;
- miglioramento della durabilità sotto l'azione dell'acqua e del gelo.

Bisogna tener presente però la possibile reazione indesiderata di carbonatazione, che può avvenire o nel caso in cui il quantitativo di legante sia eccessivo, oppure quando il terreno non ha una "sufficiente" quantità di argilla necessaria per questo tipo di trattamento: in questa situazione infatti la calce aggiunta, anziché reagire col terreno da trattare, si lega all'anidride carbonica presente nell'aria o nel terreno stesso, e forma carbonato di calcio CaCO_3 , sostanza plastica che porterebbe inevitabilmente al peggioramento del materiale trattato, diminuendo la resistenza del terreno stesso.

11.2.1.4 Operazioni di cantiere per una stabilizzazione a calce e/o cemento

Le fasi operative per un trattamento a calce, consistono in:

- a) scarificazione e sminuzzamento del terreno: bisogna preliminarmente asportare l'eventuale strato di terra vegetale con relativa vegetazione, frantumare e sminuzzare eventuali zolle (eliminando anche inerti non idonei, come radici, residui legnosi ed erbosi, pericolosi per le macchine miscelatrici), e portare il terreno in sito alle livellette e alle pendenze di progetto; successivamente lo strato da stabilizzare dovrà essere scarificato e polverizzato per la larghezza e lo spessore previsti;
- b) spandimento della calce; può essere effettuato con calce stoccata in sacchi, con calce sfusa per mezzo di uno spanditore semovente, oppure mediante idonei miscelatori di cantiere nei quali viene aggiunto il terreno e la quantità di calce desiderata (in quest'ultimo caso si ottiene la miglior omogeneizzazione possibile). Chiaramente per ogni tecnica seguita bisognerà portare particolare attenzione alla quantità di calce da distribuire per unità di superficie, nonché ad uno spandimento idoneo ed omogeneo;
- c) sminuzzamento, miscelazione e spandimento dell'acqua: la macchina mescolatrice provvederà a sminuzzare e a miscelare il terreno da trattare, finché tutte le zolle saranno ridotte a dimensioni di pochi cm; lo spandimento dell'acqua dovrà avvenire contestualmente alla miscelazione e non direttamente

sulla calce. La qualità finale della lavorazione sarà desumibile visivamente sia per l'assenza di zone in cui la calce non sia amalgamata al terreno, sia per l'omogeneità del colore della miscela;

d) compattazione delle miscele e finitura degli strati.

Dopo almeno 24 ore si proseguirà con le stesse modalità all'esecuzione del trattamento a cemento, del terreno precedentemente trattato a calce.

Durante le fasi operative bisogna sempre tener presente l'idoneità delle condizioni atmosferiche, evitando forti piogge e temperature del terreno prossime allo zero, per ottenere un'esecuzione a regola d'arte dell'intervento.

In particolare il Capitolato afferma, riferendosi alla lavorazione a calce, "*Le varie fasi operative non devono mai essere effettuate in condizioni ambientali ed atmosferiche avverse quali pioggia e temperatura ambiente non compresa tra 5°C e 35°C*", mentre riferendosi a quella a cemento, "*La lavorazione non dovrà di norma essere eseguita con temperature ambiente inferiori a 10°C e superiori a 35°C e mai sotto la pioggia*".

11.2.1.5 Le indagini condotte sul terreno di fondazione

Per effettuare uno studio della miscela ottimale necessaria per l'intervento di stabilizzazione in sito a calce e cemento, sono stati prelevati dei campioni del terreno naturale di fondazione; le prove successivamente effettuate hanno condotto alla classificazione del terreno attraverso l'analisi granulometrica e la valutazione dei limiti di Atterberg, alla definizione della percentuale di umidità ottima di costipamento e della massima densità (secca) mediante costipamento Proctor, e alla valutazione della portanza della pavimentazione attraverso la valutazione dell'indice C.B.R. dopo 4 giorni di imbibizione.

I materiali prelevati in sito sono stati classificati come A2-4, ovvero "Ghiaia e sabbia limosa o argillosa".

Riportiamo qui di seguito la classificazione del terreno di fondazione tal quale relativo a 4 prelievi:

<i>Prelievo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Ubicazione del prelievo</i>	<i>Km 0+100 dir.MN</i>	<i>Km 0+600 dir MN</i>	<i>Km 1+100 dir. MN</i>	<i>Km 1+600 dir MN</i>
<i>Classificazione</i>	<i>A2-4</i>	<i>A2-4</i>	<i>A2-4</i>	<i>A2-4</i>
<i>Limite Liquido [%]</i>	<i>25,4</i>	<i>26,3</i>	<i>26</i>	<i>27</i>
<i>Limite Plastico [%]</i>	<i>17,2</i>	<i>18,6</i>	<i>19</i>	<i>19,9</i>
<i>Indice Plastico [%]</i>	<i>8,2</i>	<i>7,7</i>	<i>7</i>	<i>7,1</i>
<i>Indice di Gruppo [IG]</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>

Tab. 11.1: Classificazione del terreno di fondazione tal quale

Lo studio Proctor della curva di costipamento ottenuta con modalità AASHTO Mod., ha poi permesso di determinare l'umidità ottimale di costipamento e la massima densità del materiale tal quale:

$W_{opt}: 5,2\%$ $\gamma_{max}: 1,83 \text{ g/cm}^3$

Tab. 11.2: Valori di W_{opt} e γ_{max}

L'indice di portanza C.B.R. valutato su un provino compattato in conformità alla Norma CNR UNI 10009, dopo 4 giorni di imbibizione, ha invece restituito i seguenti valori:

$CBR: 23,56\%$ $Rigonfiamento: 0,38\%$

Tab. 11.3: C.B.R. e Rigonfiamento

11.2.1.6 Il Mix Design del terreno di sottofondo e la scelta del legante idraulico di stabilizzazione

Sulla base delle indagini condotte preliminarmente, sono state eseguite operazioni di mix design della miscela per la stabilizzazione del terreno di fondazione in sito.

Dopo aver classificato il terreno analizzato, si è passati alla scelta del legante idraulico da utilizzare, optando per una stabilizzazione a calce e cemento.

Per la determinazione del corretto dosaggio di legante idraulico da aggiungere in funzione delle caratteristiche del terreno di fondazione, si è effettuata la prova del

Contenuto Iniziale di Calce (C.I.C.), ovvero della percentuale minima di calce necessaria allo sviluppo della reazione chimica stabilizzante, che ha portato alla scelta del quantitativo dell'**1,5%**, in base al PH 12,36 ottenuto, relativo alla miscela finale dopo il trattamento.

Successivamente sono state eseguite le prove per la determinazione dell'indice C.B.R. relativo al materiale precedentemente stabilizzato, su un provino confezionato con il dosaggio di calce appena individuato (1,5%) ed il contenuto di acqua ottimale, come richiesto dal Capitolato Speciale d'Appalto, ottenendo il seguente valore:

	W_{opt} [%]	Calce [%]	C.B.R. / Rigonfiamento [%]	CSA [%]
<i>Provino 1</i>	5,2	1,5	74,8 0,24	50,0 1,0

Tab. 11.4: Indice di portanza della miscela Terra-Calce

Ricordiamo che "L'indice di portanza C.B.R. dopo quattro giorni di imbibizione in acqua non deve essere minore di 50" (CSA).



Fig. 11.7: Esempio di spandimento della calce effettuato in data 28-07-2010

Riportiamo qui di seguito alcuni risultati di altri test effettuati per la valutazione dell'indice C.B.R. (tutti ampiamente soddisfatti in quanto > 50), dopo 7 giorni di stagionatura e 4 di imbibizione, condotti su provini costipati in laboratorio col metodo Proctor Mod. e con materiale proveniente dalla fondazione stradale stabilizzata a calce:

Prelievo	1	2	3
Ubicazione del prelievo	Km 0+960 dir.PR	Km 1+100 dir MN	Km 0+200 dir. MN
Data del prelievo	27/07/10	27/07/10	29/07/10
W_{opt}	7,2%	9,3%	8,6%
γ_{max}	2,17 g/cm ³	2,19 g/cm ³	2,16g/cm ³
Rigonfiamento dopo imbibizione di 96 ore	0	0	0
C.B.R.	108%	147%	74%

Tab. 11.5: Valori dell'indice C.B.R. relativi a tre diversi prelievi

È interessante notare come l'indice C.B.R. relativo al prelievo 3 (Km 0+200 dir. MN) effettuato in data 29/07/2010, sia stato poi testato in tre diverse date ed abbia mostrato di volta in volta un valore maggiore, a conferma del fatto che la stabilizzazione a calce conferisca dei miglioramenti significativi, anche a breve termine:

<i>Prelievo 3 (Km 0+200) del 29/07/2010</i>			
Data della Consegna	29/07/10	26/08/10	30/08/10
C.B.R	74%	96%	102%

Tab. 11.6: Valori dell'indice C.B.R. relativi allo stesso prelievo

Dopo aver dunque individuato il corretto dosaggio di calce, si è determinato il quantitativo ottimale di cemento da aggiungere alla miscela precedentemente trattata. Come richiesto dal Capitolato, di cui riportiamo un estratto,

“Ai fini della determinazione delle % di cemento e umidità ottima si dovranno realizzare provini con pressa giratoria a n° giri 180 con le seguenti caratteristiche:

Caratteristiche provini giratoria

<i>Pressa giratoria</i>		
<i>Pressione verticale</i>	<i>[Kpa]</i>	<i>600± 3</i>
<i>Angolo di rotazione</i>	<i>[rpm]</i>	<i>1,25± 0,02</i>
<i>Velocità di rotazione</i>	<i>[giri/min]</i>	<i>30</i>
<i>Diametro provino</i>	<i>[mm]</i>	<i>150</i>
<i>Compattazione</i>	<i>[giri]</i>	<i>180</i>

Tab. 11.7: Caratteristiche di compattazione dei provini con pressa giratoria

Caratteristiche di resistenza

	<i>3 gg</i>	<i>7 gg</i>	<i>Dimensioni provini</i>
<i>Rt 25°C (N/mm²)</i>	<i>0,20 – 0,45</i>	<i>0,25-0,50</i>	<i>Diametro 150mm Altezza 100-130 mm</i>
<i>Compressione semplice 25° C (N/mm²)</i>	<i>1,3 – 3,5</i>	<i>2,0 – 5,0</i>	<i>Diametro 150mm Altezza 160-200 mm</i>

Tab. 11.8: Caratteristiche di resistenza dei provini

I provini vanno maturati a 40°C e termostati a 25°C per 4 ore prime del test di rottura". Per determinare la percentuale ottimale di cemento e dell'acqua di compattazione, sono stati realizzati 6 provini con pressa giratoria, con le modalità indicate precedentemente, considerando tutte le possibili combinazioni che si ottengono utilizzando diverse percentuali di acqua (5%, 6% e 7%) e di cemento (2%, 3%, 4%).

Successivamente i 6 provini sono stati fatti maturare e rotti (a 3 o a 7 giorni dalla maturazione), rispettivamente 3 a compressione semplice (CNR B.U. 29) e 3 a trazione indiretta (CNR B.U. 94), stimando di volta in volta i valori di resistenza R_c ed R_t .

Nel nostro caso, conducendo le prove di rottura a 3 giorni dalla maturazione, e con la seguente composizione del mix design della miscela per la stabilizzazione del terreno,

Terreno di Fondazione + 1,5% di calce viva (CaO) e 2% di cemento

Tab. 11.9: Mix Design della miscela

sono stati ottenuti i seguenti risultati "ottimali" (ossia i valori "medi" della resistenza a compressione e della resistenza a trazione indiretta del mix considerato, sono risultati essere i migliori rispetto ad altre composizioni):

<i>Miscela Terra - Calce - Cemento</i>		
<i>Resistenza a Trazione indiretta – CNR B.U. 94</i>		
<i>Provino</i>	<i>Carico di rottura [N]</i>	<i>Rt [MPa]</i>
<i>1</i>	<i>13012</i>	<i>0,43</i>
<i>2</i>	<i>12947</i>	<i>0,42</i>
<i>3</i>	<i>13265</i>	<i>0,43</i>
<i>Limiti CSA</i>		<i>0,20 – 0,45</i>
<i>Resistenza a Compressione – CNR B.U. 29</i>		
<i>Provino</i>	<i>Carico di rottura [N]</i>	<i>Rc [MPa]</i>
<i>1</i>	<i>61492</i>	<i>3,46</i>
<i>2</i>	<i>60954</i>	<i>3,43</i>
<i>3</i>	<i>61023</i>	<i>3,43</i>
<i>Limiti CSA</i>		<i>1,3 – 3,5</i>

Tab. 11.10: Caratterizzazione meccanica del terreno stabilizzato a cemento



Fig. 11.8: Superficie di fondazione stabilizzata a cemento prima delle posa

Riportiamo qui di seguito alcuni risultati relativi alle prove di compressione e trazione indiretta a 7 giorni dalla maturazione, condotte su 6 provini confezionati con materiale

stabilizzato a calce e cemento, appartenente a prelievi diversi (nei rapporti di prova sono state anche indicati i valori dell'umidità di costipamento media e della densità secca media). Chiaramente essendo tutti i valori di resistenza compresi nei limiti del CSA, lo saranno conseguentemente anche i loro "valori medi": le verifiche sono dunque soddisfatte.

<i>Miscela Terra - Calce - Cemento</i>								
<i>Prelievo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Resistenza a Trazione indiretta – CNR B.U. 94</i>								
<i>Provino</i>								
<i>1</i>	<i>0,31</i>	<i>0,34</i>	<i>0,32</i>	<i>0,34</i>	<i>0,33</i>	<i>0,35</i>	<i>0,33</i>	<i>0,32</i>
<i>2</i>	<i>0,33</i>	<i>0,27</i>	<i>0,30</i>	<i>0,35</i>	<i>0,30</i>	<i>0,33</i>	<i>0,35</i>	<i>0,33</i>
<i>3</i>	<i>0,33</i>	<i>0,32</i>	<i>0,33</i>	<i>0,32</i>	<i>0,32</i>	<i>0,35</i>	<i>0,33</i>	<i>0,33</i>
<i>Limiti CSA 0,25 – 0,50 a 7 giorni</i>								
<i>Resistenza a Compressione – CNR B.U. 29</i>								
<i>Prelievo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>Provino</i>								
<i>4</i>	<i>2,7</i>	<i>2,6</i>	<i>2,6</i>	<i>2,5</i>	<i>2,7</i>	<i>2,6</i>	<i>2,5</i>	<i>2,6</i>
<i>5</i>	<i>2,8</i>	<i>2,6</i>	<i>2,5</i>	<i>2,6</i>	<i>2,5</i>	<i>2,7</i>	<i>2,6</i>	<i>2,5</i>
<i>6</i>	<i>2,6</i>	<i>2,7</i>	<i>2,5</i>	<i>2,6</i>	<i>2,7</i>	<i>2,7</i>	<i>2,6</i>	<i>2,5</i>
<i>Limiti CSA 2 – 5 a 7 giorni</i>								

Tab. 11.11: Risultati relativi alle prove di compressione e trazione indiretta a 7 giorni

Definito quindi il mix design di progetto, vengono effettuate tutte le fasi lavorative dell'intervento di stabilizzazione, concludendo con la compattazione "con rullo monotamburo vibrante di almeno 19 ton preferibilmente accoppiato ad un rullo gommato di almeno 14 ton".

Infine, relativamente ai controlli in corso d'opera, il Capitolato prevede "prove di carico con piastra con diametro di 300mm a 7 gg di maturazione nell'intervallo di carico compreso tra 0,25 MPa e 0,35 MPa - primo ciclo di carico" per la determinazione di

Md sulla fondazione stabilizzata a calce e cemento, che deve risultare superiore a 80 MPa.

Si riportano qui di seguito alcuni risultati della prova per valutare il Modulo di deformazione (tutti ampiamente soddisfatti in quanto > 80), relativi sia alla fondazione stabilizzata a calce e cemento, sia al misto cementato utilizzato in alcuni tratti (nei rapporti di prova sono state anche indicate la Temperatura e l'Umidità dell'aria in °C della zona di prova):

<i>Fondazione stabilizzata a calce e cemento</i>				
<i>Posizione</i>	<i>Km 1+1670 corsia MN</i>	<i>Km 1+370 corsia PR</i>	<i>Km 0+900 corsia MN</i>	<i>Km 0+500 corsia PR</i>
<i>Md [MPa]</i>	<i>1500,0</i>	<i>214,3</i>	<i>333,3</i>	<i>600,0</i>
<i>Fondazione stabilizzata a calce e cemento</i>				
<i>Posizione</i>	<i>Tratto 3 da inizio rotatoria tratto MN + 97 m corsia dir MN</i>	<i>Tratto 4 tra le rotatorie corsia direzione PR</i>	<i>Tratto 1 direzione MN</i>	<i>Tratto 4 tra le rotatorie corsia direzione PR</i>
<i>Md [MPa]</i>	<i>214,3</i>	<i>176,5</i>	<i>272,7</i>	<i>100,0</i>

Tab. 11.12: Valori del modulo di deformazione ottenuti in diverse posizioni per la fondazione stabilizzata a calce e cemento

<i>Misto cementato</i>					
<i>Posizione</i>	<i>Tratto svincolo Sud corsia dir PR 0+500</i>	<i>Corsia dir MN 0+300</i>	<i>Corsia dir MN 0+100</i>	<i>A metà del tratto ad una corsia</i>	<i>A metà del tratto ad una corsia</i>
<i>Md [MPa]</i>	<i>120,0</i>	<i>200,0</i>	<i>214,3</i>	<i>600,0</i>	<i>300,0</i>

Tab. 11.13: Valori del modulo di deformazione ottenuti in diverse posizioni per il misto cementato di fondazione (presente solo in alcuni tratti)

11.3 Studio di formulazione: conglomerato bituminoso riciclato a freddo in impianto con emulsione bituminosa modificata

11.3.1 Generalità

Nell'intervento di ripristino della pavimentazione oggetto di studio, dopo aver condotto il trattamento di stabilizzazione a calce e cemento visto precedentemente, si è provveduto a realizzare uno strato di collegamento con conglomerato bituminoso

riciclato a freddo in impianto, con emulsione bituminosa modificata.

Il presente studio, in accordo con le "Linee Guida di Progetto e Norme Tecniche Prestazionali" dell'ANAS SPA, sintetizza i punti chiave dell'attività sperimentale condotta per determinare le caratteristiche della miscela da utilizzare per l'intervento.



Fig. 11.9: Fresato proveniente dalla scarifica della vecchia pavimentazione



Fig. 11.10: Impianto di produzione CGS

La miscela è costituita dal materiale fresato bituminoso proveniente dalla vecchia pavimentazione (le cui caratteristiche come abbiamo avuto modo di vedere erano ancora molto buone) con l'aggiunta di inerti lapidei vergini, il tutto impastato in impianto con cemento, emulsione bituminosa ed acqua.

La scelta dell'impianto fisso è stata dettata dall'esigenza di garantire una buona uniformità al conglomerato finale.

La tecnica produttiva utilizzata, prettamente a freddo e dagli indiscussi vantaggi ambientali ed economici, permette di eseguire la miscelazione a temperatura ambiente: il fresato viene dunque preventivamente selezionato mediante vagliatura e dopo aver dosato opportunamente tutti i componenti, viene miscelato in continuo.

Il conglomerato finale ottenuto viene successivamente caricato su appositi mezzi, trasportato in cantiere e steso con macchina vibrofinitrice, realizzando uno strato finito perfettamente sagomato, senza sgranamenti o fessurazioni, e privo di difetti dovuti alla segregazione degli elementi litoidi più grossolani; la posa in opera, così come appena descritta, garantisce ottime caratteristiche di planarità della superficie di stesa.

Subito dopo ha inizio la fase di compattazione mediante l'impiego di un rullo metallico di almeno 19 ton e di un rullo gommato con carico statico maggiore di 18 ton.

11.3.2 I Materiali costituenti e loro qualificazione

Il *legante* utilizzato per l'intervento di riciclaggio è costituito da un'emulsione bituminosa con le seguenti caratteristiche:

<i>Emulsione bituminosa modificata</i>		
<i>Caratteristiche</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori</i>
<i>Contenuto d'acqua</i>	<i>% in peso</i>	≤ 40
<i>Contenuto di bitume</i>	<i>% in peso</i>	≥ 60
<i>Grado di acidità (PH)</i>		2 – 4
<i>Sedimentazione a 7 gg</i>	<i>%</i>	< 10
<i>Caratteristiche del bitume estratto</i>		
<i>Penetrazione a 25°C</i>	<i>dmm</i>	50 – 70
<i>Punto di rammollimento</i>	<i>°C</i>	55 – 75
<i>Punto di rottura Fraass</i>	<i>°C</i>	≤ -10
<i>Ritorno elastico</i>	<i>%</i>	≥ 55

Tab. 11.14: *Emulsione bituminosa modificata*

La materia prima secondaria utilizzata è il conglomerato bituminoso proveniente dalla scarifica degli strati legati (base, binder, usura) della vecchia pavimentazione.

Affinché la miscela finale raggiunga le caratteristiche tecniche ottimali (granulometria, resistenza, portanza), è tuttavia necessario prevedere l'utilizzo di *aggregati di integrazione*, nello specifico aggregati frantumati di cava, nella percentuale massima del 30%.

Il trattamento comporta anche l'aggiunta del *cemento* nella miscela: l'impiego di questo additivo, permette infatti sia di regolare al meglio i tempi di maturazione della miscela stessa, eliminando l'acqua di compattazione tramite un processo di idratazione, sia di identificarsi come un importante integratore della frazione fine.

Generalmente viene utilizzato il cemento 325, di tipo Portland, d'altoforno o pozzolonico, con una percentuale di dosaggio ottimale in funzione dell'umidità presente nel materiale da riciclare.

L'*acqua* impiegata deve essere pura ed esente da sostanze organiche.

La *miscela* finale, ottenuta dal materiale fresato, unito agli aggregati vergini di integrazione, deve avere una composizione granulometrica appartenente al seguente

fuso di progetto, come indicato nel Capitolato:

<i>Apertura setacci (mm)</i>	<i>Fuso</i>	
<i>31,5</i>	<i>100</i>	<i>100</i>
<i>20</i>	<i>68</i>	<i>92</i>
<i>14</i>	<i>50</i>	<i>75</i>
<i>8</i>	<i>36</i>	<i>60</i>
<i>4</i>	<i>25</i>	<i>48</i>
<i>2</i>	<i>18</i>	<i>38</i>
<i>0,25</i>	<i>8</i>	<i>20</i>
<i>0,125</i>	<i>5</i>	<i>14</i>
<i>0,063</i>	<i>4</i>	<i>9</i>

Tab. 11.15: Granulometria del fuso di progetto

11.3.3 Studio della miscela di progetto: il Mix Design

Per definire i dosaggi "ottimali" dei materiali utilizzati nella miscela oggetto di studio, ossia materia prima secondaria, aggregati di integrazione, emulsione, cemento e acqua, si deve innanzitutto procedere a:

- caratterizzare il materiale che si intende utilizzare nella miscela, determinando in particolar modo la curva granulometrica della materia prima secondaria tal quale (post-estrazione) e degli aggregati vergini di integrazione;
- definire la curva granulometrica di progetto.

Dopo aver effettuato dei sondaggi, è stata per l'appunto condotta un'analisi granulometrica sul fresato proveniente dalla vecchia pavimentazione e sugli aggregati di integrazione, sabbia nello specifico, che hanno fornito i seguenti valori:

<i>Setacci UNI EN</i>	<i>Massa trattenuta % Fresato</i>	<i>Massa trattenuta % Sabbia 0/4</i>	<i>Massa trattenuta % Cemento</i>
31,5	0,0	0,0	0,0
20	13,2	0,0	0,0
12,5	19,7	0,0	0,0
8	17,6	0,0	0,0
4	12,6	2,2	0,0
2	11,0	19,5	0,0
0,25	8,6	60,7	0,0
0,125	5,6	8,1	0,0
0,063	6,7	5,1	0,0
<i>fondo</i>	5,0	4,4	100,0
<i>Massa TOT trattenuta %</i>	100,0	100,0	100,0

Tab. 11.16: Analisi granulometrica condotta sul fresato, sulla sabbia e sul cemento
È stato poi definito l'assortimento granulometrico derivante da un opportuno dosaggio correttivo di aggregati vergini, che ha condotto al seguente risultato,

88,5% Fresato + 10% di Sabbia 0/4 + 1,5% di cemento

Tab. 11.17: Dosaggio ottimale di fresato, sabbia e cemento

il cui Mix finale è rappresentato dalle seguenti percentuali di massa trattenuta ai setacci, massa trattenuta cumulativa e massa passante, dimostrando così di appartenere al fuso granulometrico di progetto:

<i>Setacci UNI EN</i>	<i>Massa trattenuta %</i>	<i>Massa trattenuta (cumulativa) %</i>	<i>Massa passante %</i>	<i>Fuso di progetto</i>	
31,5	0,0	0,0	100,0	100	100
20	11,7	11,7	88,3	68	92
14	17,4	29,1	70,9	50	75
8	15,6	44,7	55,3	36	60
4	11,4	56,1	43,9	25	48
2	11,7	67,7	32,3	18	38
0,25	13,7	81,4	18,6	8	20
0,125	5,8	87,2	12,8	5	14
0,063	6,4	93,6	6,4	4	9
<i>fondo</i>	6,4	100,0	0,0		

Tab. 11.18: Analisi granulometrica del Mix finale di progetto

Ricordiamo che la scelta di una formulazione ben precisa della miscela, nasce dall'esigenza di conferire al conglomerato le migliori caratteristiche di resistenza possibili, che dovranno rientrare in un intervallo di valori predefinito.

A tal fine devono essere confezionati 6 provini mediante l'uso della pressa giratoria, come prescritto dal Capitolato, secondo le seguenti modalità:

<i>Pressa giratoria</i>		
<i>Pressione verticale</i>	<i>[Kpa]</i>	<i>600± 3</i>
<i>Angolo di rotazione</i>	<i>[rpm]</i>	<i>1,25± 0,02</i>
<i>Velocità di rotazione</i>	<i>[giri/min]</i>	<i>30</i>
<i>Diametro provino</i>	<i>[mm]</i>	<i>150</i>
<i>Compattazione</i>	<i>[giri]</i>	<i>180</i>

Tab. 11.19: Caratteristiche di compattazione dei provini con pressa giratoria

I sei provini sono stati confezionati considerando delle particolari combinazioni, che si ottengono utilizzando diverse percentuali di acqua (4%, 5%, 6%), di cemento (0,5%, 1%, 1,5%) ed emulsione (2%, 3%, 4%), come descritto sempre nel Capitolato (le percentuali sono da intendersi in peso sulla miscela degli inerti); successivamente i 6 provini sono stati rotti (dopo una maturazione di 3 giorni), rispettivamente 3 a compressione semplice e 3 a trazione indiretta (Indirect Tensile Strength).

Le resistenze di riferimento di ciascuna "combinazione" sono state valutate come "media" delle resistenze dei 3 provini rotti per ciascun tipo di prova (a compressione e a trazione) dopo 3 gg di maturazione.

La miscela che possiede le migliori caratteristiche di resistenza, in base ai seguenti valori di riferimento, rappresenta il Mix Design di progetto:

	<i>3 gg</i>	<i>Dimensioni provini</i>
<i>ITS 25°C (GPa · 10⁻³)</i>	<i>0,32 – 0,55</i>	<i>Diametro 150mm Altezza 100-130 mm</i>
<i>Compressione semplice 25° C (GPa · 10⁻³)</i>	<i>1,2 – 2,5</i>	<i>Diametro 150mm Altezza 160-200 mm</i>

Tab. 11.20: Requisiti meccanici di accettazione della miscela finale

"I provini andranno maturati a 40°C e termostati a 25°C per 4 ore prima del test di rottura".

La formulazione ottimale dei materiali che ha permesso di raggiungere i migliori valori di resistenza, con $R_t = 0,51 \text{ MPa}$ e $R_c = 1,95 \text{ MPa}$ (intesi come valori medi), è la seguente:

4% emulsione bituminosa modificata + 1,5% di cemento + 5% di acqua

Tab. 11.21: Mix Design

ovvero il *Mix design di progetto*.

Dopo aver verificato che le caratteristiche più importanti dell'emulsione bituminosa modificata utilizzata nell'intervento, rispondessero alle prescrizioni di progetto (CSA), ossia relative al contenuto di legante (UNI EN 1428), alla penetrazione a 25°C (UNI EN 1426) ed al punto di rammollimento (UNI EN 1427), sono stati condotti dei test per la "Determinazione della resistenza a trazione indiretta" R_t (UNI EN 12697-31): la prova è stata condotta a 25°C (Norma interna Società Autostrade) su 3 provini costipati con pressa giratoria (secondo le già citate modalità di Capitolato) a 180 giri, maturati in stufa a 40°C per 3 giorni e appartenenti a campioni diversi (numereremo i campioni da 1 a 7 dal primo all'ultimo prelievo, ciascuno dei quali è stato effettuato in giornate diverse, dal 2 Agosto al 6 Settembre 2010); vengono qui di seguito riportati alcuni risultati, tutti soddisfacenti i limiti di accettabilità del Capitolato:

	$R_t \text{ N/mm}^2$						
<i>Campione</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>Provino 1</i>	0,41	0,46	0,45	0,37	0,38	0,41	0,41
<i>Provino 2</i>	0,42	0,44	0,42	0,37	0,38	0,40	0,42
<i>Provino 3</i>	0,40	0,48	0,42	0,38	0,38	0,40	0,41
<i>Media</i>	0,41	0,46	0,43	0,37	0,38	0,40	0,41
<i>Valori di riferimento del CSA 0,32 – 0,55</i>							

Tab. 11.22: Valori di resistenza a trazione indiretta

Nei rapporti di prova sono anche indicati: le dimensioni del provino confezionato (altezza h - diametro D), il carico a cui è stato sottoposto, i parametri di deformabilità di compressione a rottura e di trazione indiretta a rottura (P_{Dc} e P_{Dt}), le deformazioni unitarie di compressione a rottura e di trazione indiretta a rottura (D_c/D e D_t/D), ed il coefficiente di trazione indiretta (CTI).

Alcune delle prove condotte successivamente sono state la UNI EN 12697-1 (metodi B.1.2 + B.2.1) "Quantità di legante", con lo scopo di determinare il quantitativo percentuale di bitume presente nella miscela (separando il legante dall'aggregato litico nel campione di miscela bituminosa prelevato all'uscita dell'impianto) e di poter eseguire eventuali altre prove sugli aggregati: successivamente viene infatti condotta un'analisi di tipo granulometrico, secondo le modalità indicate nella UNI EN 12697-2, i cui valori sono riportati nei rapporti di prova, di cui mostriamo alcuni risultati:

	1	2	3	4	5	6	7
<i>Percentuale di bitume riferita all'inerte</i>	5,60	5,80	6,04	6,55	6,20	6,44	6,69
<i>Percentuale consigliata di bitume, riferita al peso della miscela: 5,5-6%</i>							
<i>Percentuale di bitume riferita alla miscela</i>	5,31	5,48	5,69	6,14	5,84	6,05	6,27

Tab. 11.23: Percentuale di bitume presente nella miscela

Considerando che la percentuale di emulsione bituminosa del mix design è indicativamente del 4%, ed essendo l'emulsione in oggetto composta dal 60% di legante, la quantità di bitume in essa contenuta sarà del 2,5% circa; se poi valutiamo anche il fatto che la percentuale di legante proveniente dal materiale di recupero sarà all'incirca del 3-3,5%, avremo in totale una percentuale di bitume di progetto del 5,5-6% riferiti alla miscela: i valori indicati nella tabella precedente rispettano pertanto i limiti di accettabilità.

Dai risultati delle prove relative all'analisi granulometrica della miscela (che in questa sede non riporteremo), possiamo notare come il materiale litico sia leggermente "fuori fuso"; in particolar modo nei 7 campioni analizzati (gli stessi utilizzati per le altre prove, di resistenza e per la determinazione della quantità di bitume) la percentuale di materiale passante, relativo ai setacci dal 2 al 20, è maggiore di quanto previsto in fase di progettazione; inoltre in 2 casi su 7 anche il materiale passante al setaccio 0,25 non rispetta le prescrizioni. Ciò si traduce nella presenza di una maggior quantità di materiale fine, rispetto al dovuto, nella nostra miscela finale, e che potrebbe avere come diretta conseguenza una diminuzione della resistenza del conglomerato stesso, una volta posto in opera. Probabilmente nello studio di progetto si sarebbe dovuta valutare una maggior quantità di inerti grossolani, come la sabbia e il pietrischetto. Tuttavia dai risultati dei test relativi alle resistenze, effettuati su 3 provini di 7 diversi campioni (vedi

Tab. 11.22) non si riscontrano dei valori insufficienti o comunque bassi, a dimostrazione del fatto che, nonostante il fuso granulometrico non fosse stato rispettato appieno, le caratteristiche meccaniche del conglomerato finale non erano state compromesse.

In seguito al confezionamento in impianto e dopo aver opportunamente bagnato la superficie di posa (precedentemente stabilizzata a cemento), la miscela viene stesa con macchina vibrofinitrice e compattata mediante l'impiego di un rullo metallico di almeno 19 ton e di un rullo gommato con carico statico maggiore di 18 ton.

Per la stesa dello strato superiore si dovrà attendere il giorno successivo (o almeno 6-8 ore nel caso di esigenze operative improrogabili).



Fig. 11.11: La superficie di posa viene bagnata



Fig. 11.12: Stesa con macchina vibrofinitrice



Fig. 11.13: Compattazione con rullo vibrante e gommato

12.3 Lo strato di Usura finale

Dopo la stabilizzazione a calce e a cemento, e dopo aver posto in opera il conglomerato bituminoso rigenerato a freddo con emulsione modificata, l'intervento si è concluso con la stesa di un tappeto di usura di 3 cm, sempre in conglomerato bituminoso, ma prodotto a caldo.



Fig. 11.14 - 11.15: Immagini dello strato di usura in fase di compattazione e alla fine dell'intervento

A seguire verranno mostrati i requisiti necessari per uno strato di usura "normale" e "modificato", relativamente alle prove di "Analisi granulometrica" (UNI EN 12697-2), "Quantità di legante" (UNI EN 12697-1), "Determinazione delle resistenza a trazione Indiretta" (UNI EN 12697-23 su provini compattati con pressa giratoria), "Determinazione dei vuoti residui mediante compattatore giratorio" (UNI EN 12697-31 e UNI EN 12697-8), secondo le prescrizioni del Capitolato di riferimento ANAS, nonché i risultati delle prove in nostro possesso.

<i>Apertura setacci (mm)</i>	<i>Fuso B</i>	
16	--	
12,5	100	
8	90	100
4	44	64
2	28	42
0,5	12	24
0,25	8	18
0,063	6	10

Tab. 11.24: Fuso di progetto per uno strato di usura di tipo B

Ricordiamo che per un'usura di tipo A gli spessori sono compresi tra 4 e 6 cm, mentre per un'usura di tipo B lo spessore è di 3 cm, come nel nostro caso.

La percentuale di bitume, riferito alla miscela, deve essere del **4,5%-6,1%**; si riportano qui di seguito i valori ottenuti dalle verifiche relative alle prove effettuate, dopo aver visionato i rapporti di prova della UNI EN 12697-2 e UNI EN 12697-1, mettendo in evidenza eventuali riscontri negativi con il CSA:

Prelievo (Normale) n.	% di bitume riferita all'inerte	Valori CSA della % di bitume riferita alla miscela	% di bitume riferita alla miscela	Rispetta il fuso granulometrico di progetto?		
				SI o NO	Discrepanze dal fuso in caso negativo	
					Risultato di prova %	Prescrizione di Capitolato
1	5,02	4,5 – 6,1 tutti rispettati	4,78	NO	65,6 (S.4)	44 – 64 (S.4)
					44,5 (S.2)	28 – 42 (S.2)
3	5,14		4,89	SI		
5	5,09		4,84	NO	65,1 (S.4)	44 – 64 (S.4)
7	5,20		4,94	SI		
9	5,05		4,80	NO	42,4 (S.2)	28 – 42 (S.2)
11	5,03		4,79	SI		
13	4,96		4,72	SI		
15	5,02		4,78	SI		
17	5,16		4,91	NO	64,2 (S.4)	44 – 64 (S.4)
		42,8 (S.2)			28 – 42 (S.2)	
Prelievo (Modificato) n.						
1	5,31	4,5 – 6,1 tutti rispettati	5,04	NO	43,2 (S.2)	28 – 42 (S.2)
3	5,21	4,5 – 6,1 tutti rispettati	4,95	SI		

Tab. 11.25: Analisi granulometrica e % di bitume

I provini per la determinazione della resistenza meccanica vengono confezionati con pressa giratoria, secondo le seguenti modalità:

Pressa giratoria		
Pressione verticale	[Kpa]	600± 3
Angolo di rotazione	[rpm]	1,25± 0,02
Velocità di rotazione	[giri/min]	30
Diametro provino	[mm]	100

Tab. 11.26: Modalità di confezionamento dei provini

La verifica della % dei vuoti, rispetto ai seguenti valori di riferimento, viene condotta a

tre livelli di n° giri: N_1 (iniziale), N_2 (medio) e N_3 (finale):

	Usura A e B			% di vuoti (V_m UNI EN 12697-8)
	TQ	SF	HD	
N_1	10	10	10	11 – 15
N_2	120	130	140	3 – 6
N_3	210	220	230	≥ 2

Tab. 11.27: Numero di giri di riferimento con le relative % dei vuoti

Le miscele risultanti dallo studio/verifica mediante pressa giratoria (compattate a N_3) devono essere successivamente testate a trazione diametrale a 25°C; si valutano pertanto i parametri R_t (resistenza a trazione indiretta) e CTI (coefficiente di trazione indiretta), i cui valori di riferimento sono:

	Miscela con bitume TQ	Miscela con bitume SF e HD
R_t ($GPa \cdot 10^{-3}$)	0,72 – 1,40	0,95 – 1,70
CTI ($GPa \cdot 10^{-3}$)	≥ 65	≥ 75

Tab. 11.28: Limiti di accettabilità per la R_t e il CTI

Riportiamo dunque alcuni dei risultati più significativi delle prove sopracitate, come la prova a trazione indiretta e la determinazione della % dei vuoti (tutte ampiamente soddisfatte), condotte su 9 prelievi di tipo normale e due prelievi di tipo modificato; si tenga sempre presente che i valori indicati di R_t e di CTI, sono da intendersi come valori “medi” (calcolati cioè come media delle resistenze di 3 provini distinti).

Anche la percentuale dei vuoti riportata è stata calcolata come media su 3 provini costipati a 10, 120 e 210 giri, nel caso di bitume TQ, e a 10, 140 e 230, nel caso di bitume Hard.

<i>Prelievo (Normale) n.</i>	R_t	<i>CTI</i>	<i>% Vuoti a 10 giri</i>	<i>% Vuoti a 120 giri</i>	<i>% Vuoti a 210 giri</i>
1	1,87	147,8	10,8	3,4	2,7
3	1,83	145,0	10,7	3,9	2,8
5	1,76	140,3	11,3	3,5	3,1
7	1,85	145,2	10,6	3,3	2,9
9	1,86	141,5	10,4	3,0	2,5
11	1,81	140,3	10,6	3,4	2,6
13	1,92	149,5	10,5	3,1	2,8
15	1,85	141,6	11,3	3,5	3,1
17	1,77	137,0	10,8	3,5	2,8
Valori CSA	0,72 – 1,40	≥ 65	11 – 15	3 – 6	≥ 2.0
<i>Prelievo (Modificato) n.</i>	R_t	<i>CTI</i>	<i>% Vuoti a 10 giri</i>	<i>% Vuoti a 140 giri</i>	<i>% Vuoti a 230 giri</i>
1	2,11	142,2	10,6	3,4	3,1
3	2,05	147,4	10,7	2,9	2,6
Valori CSA	0,95 – 1,70	≥ 75	11 – 15	3 – 6	≥ 2.0

Tab. 11.29: Risultati delle prove a trazione indiretta e per la determinazione della percentuale dei vuoti.

La compattazione dello strato di usura, infine, deve avvenire con i mezzi più adatti per questo tipo di lavorazione, e a riprova del buon uso dei sistemi utilizzati, la percentuale dei vuoti presenti in opera (rilevabile dai carotaggi) deve essere compresa nei seguenti limiti:

<i>Lavorazione</i>	<i>% dei vuoti (Vm) UNI EN 12697-8</i>	
	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Usura A e B</i>	3	8

Tab. 11.30: Percentuali di vuoti Min e Max relative allo strato di usura

Riportiamo qui di seguito alcuni dei risultati ottenuti dai carotaggi effettuati sulla pavimentazione in due diverse date.

<i>Prelievo del 23/09/2010</i>		<i>Prelievo del 28/10/2010</i>	
<i>Provini (Carota)</i>	<i>% Vuoti Singola carota</i>	<i>Provini (Carota)</i>	<i>% Vuoti Singola carota</i>
<i>1 - Tappeto</i>	<i>7,4</i>		
<i>1 - Riciclato</i>	<i>7,3</i>		
<i>4 - Tappeto</i>	<i>8,1</i>		
<i>4 - Riciclato</i>	<i>8,6</i>		
<i>6 - Tappeto</i>	<i>8,6</i>	<i>6A - Tappeto</i>	<i>8,4</i>
<i>6 - Riciclato</i>	<i>8,5</i>		
<i>8 - Tappeto</i>	<i>9,2</i>	<i>8A - Tappeto</i>	<i>7,9</i>
<i>8 - Riciclato</i>	<i>8,3</i>		
<i>10 - Tappeto</i>	<i>9,4</i>	<i>10A - Tappeto</i>	<i>7,6</i>
<i>10 - Riciclato</i>	<i>9,1</i>		
<i>11 - Tappeto</i>	<i>8,4</i>	<i>11 A - Tappeto</i>	<i>6,5</i>
<i>11 - Riciclato</i>	<i>7,9</i>		
<i>% dei vuoti (Vm) secondo il CSA (strato di usura) 3 - 8</i>			

Tab. 11.31: Percentuale dei vuoti individuata a seguito dei carotaggi

Sono stati evidenziati in giallo i valori che non rientrano nel livello di accettabilità del Capitolato.

11.5 Programma Bisar ed esempio di calcolo

11.5.1 Generalità

Come accennato precedentemente (Par. 11.1.6) con il programma Bisar (della Shell) è possibile calcolare tensioni, deformazioni e deflessioni in un punto qualsiasi di un multistrato elastico, soggetto ad uno o più carichi circolari in superficie, ipotizzando che gli sforzi si distribuiscano uniformemente sull'area di contatto ruota-pavimentazione.

Il programma valuta gli effetti prodotti dalle tensioni verticali ed orizzontali, e, considerando la rigidità elastica tangenziale (shear spring compliance), stima l'entità dello slittamento fra gli strati e le possibili conseguenze. L'azione simultanea di vari carichi produce degli effetti che possono essere considerati come somma di ogni singolo effetto prodotto da ciascun carico, valutato separatamente.

Le posizioni in cui vogliamo calcolare le tensioni, deformazioni e deflessioni sono

individuati attraverso un sistema di coordinate cartesiane, il cui centro è posizionato nell'intersezione tra l'asse di simmetria relativo alle due ruote e la superficie stradale.

Nel nostro caso consideriamo un valore di carico per l'asse standard di 130 kN, ovvero 65 kN per ogni coppia di ruote, da cui 32,5 kN per ogni singola ruota; valutiamo poi una pressione di gonfiaggio della ruota stessa di 0,75 MPa, ossia di 7,5 Kg/cm² (generalmente si assumono valori compresi tra 0,75 MPa e 0,80 MPa).

I carichi di traffico che agiscono sulla pavimentazione si identificano con i carichi verticali trasmessi dalle ruote dei veicoli alla pavimentazione, ipotizzando che si distribuiscano uniformemente attraverso superfici circolari.

In figura viene rappresentata la schematizzazione del pacchetto stradale.

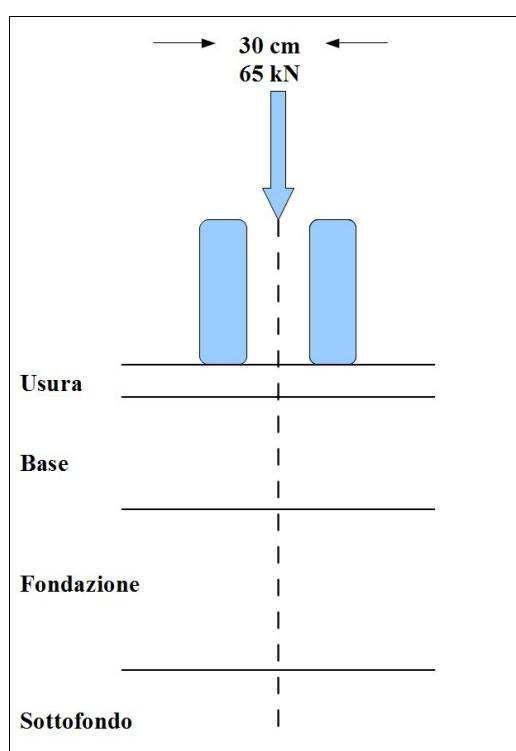


Fig. 11.16: Schematizzazione del pacchetto stradale

La formula di Down, che ci ha poi permesso di calcolare l'area d'impronta s , è la seguente:

$$P = s^2 p \pi$$

considerando:

P = Carico agente su ogni ruota, espresso in MPa oppure in kg/cm²;

s = Raggio dell'area d'impronta, come si evince dalla figura;

p = Pressione di gonfiaggio del pneumatico, espresso in MPa oppure in kg/cm².

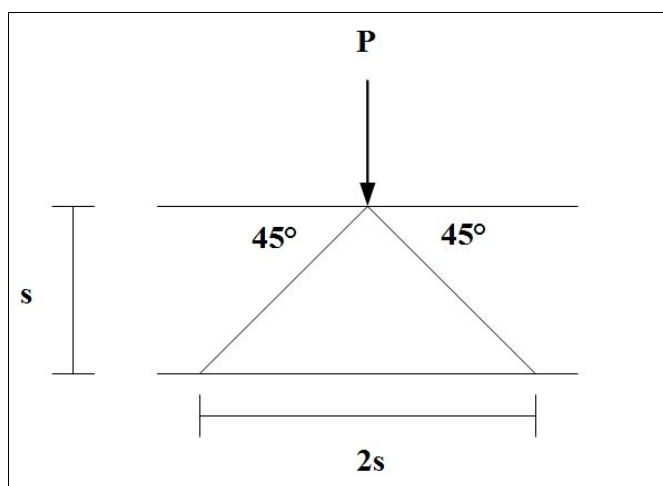


Fig. 11.17: Raggio dell'area d'impronta

Considerando quindi un carico di 32,5 kN (3250 kg/cm²) e una pressione di gonfiaggio di 0,75 MPa (7,5 kg/ cm²), otterremo per il raggio il seguente valore: **s = 11,74 cm.**

Riassumiamo dunque le caratteristiche del nostro pacchetto stradale, che andremo successivamente ad inserire nel programma di calcolo:

<i>Pavimentazione post intervento</i>			
<i>Asse standard 130 kN</i>	<i>Carico per coppia di ruote 65</i>		<i>Carico per singola ruota 32,5 kN</i>
<i>Strato</i>	<i>Modulo di deformazione [MPa]</i>	<i>Coefficiente di Poisson v</i>	<i>Pressione di gonfiaggio 0,75MPa</i>
<i>Usura</i>	2500	0,35	<i>Forza agente 32,5 kN</i>
<i>Base</i>	2200	0,35	
<i>Fondazione stabilizzata</i>	600	0,20	<i>Raggio dell'area d'impronta 11,74 cm</i>
<i>Sottofondo</i>	80	0,40	

Tab. 11.32: Valori caratteristici della pavimentazione in oggetto

11.5.2 Fase di inserimento dati nel programma e "Block Report" finale

Dopo aver aperto il programma Bisar, le schermate relative all'inserimento dati sono 3.

Schermata 1

Nella prima schermata "Loads", che vediamo nella figura qui di seguito, per "Load Number" intendiamo il numero del carico applicato, rispettivamente 1 o 2, ciascuno dei quali è riferito alla singola ruota appartenente alla coppia di ruote considerata.

Il carico agente su ciascuna ruota, il "Vertical Load", sarà pari a 32,5 kN, mentre il raggio dell'area di impronta, il "Radius", sarà uguale al valore prima determinato, di 11,74 cm.

Il centro del sistema cartesiano di riferimento, come accennato prima, sarà considerato nell'intersezione tra l'asse di simmetria relativo alle due ruote e la superficie stradale; ipotizzando invece che la distanza tra gli assi di simmetria di ciascuna delle due ruote sia di 0,30 m (che valuteremo sull'asse x), le coordinate dei punti di contatto (x, y) tra il carico e la pavimentazione saranno rispettivamente (+0,15,0) e (-0,15,0).

I carichi orizzontali "Horizontal Load" con le relative direzioni di applicazione "Shear Direction" saranno invece posti uguali a zero.

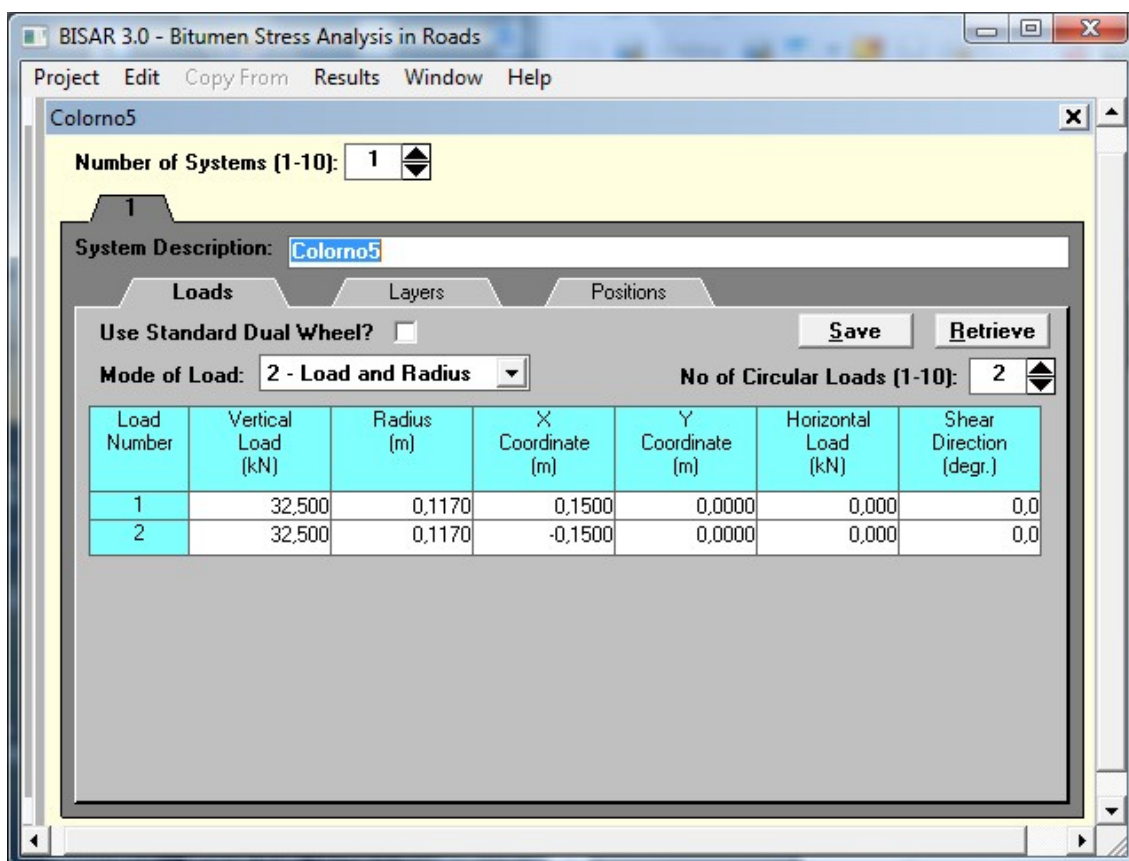


Fig. 11.18: Schermata 1

Schermata 2

Nella seconda schermata "Layers", andrà inserito il numero degli strati che costituisce la pavimentazione "N° of Layers", che nel nostro caso sarà uguale a 4 (Usura, Base, Fondazione, Sottofondo), con i relativi spessori espressi in metri "Thickness", i moduli elastici "Modulus of elasticity" ed i coefficienti "Poisson's Ratio"; tutti i precedenti valori caratterizzano ciascuno strato della pavimentazione. In particolare per i moduli e i coefficienti utilizzeremo i valori stimati nel paragrafo 11.1.6.

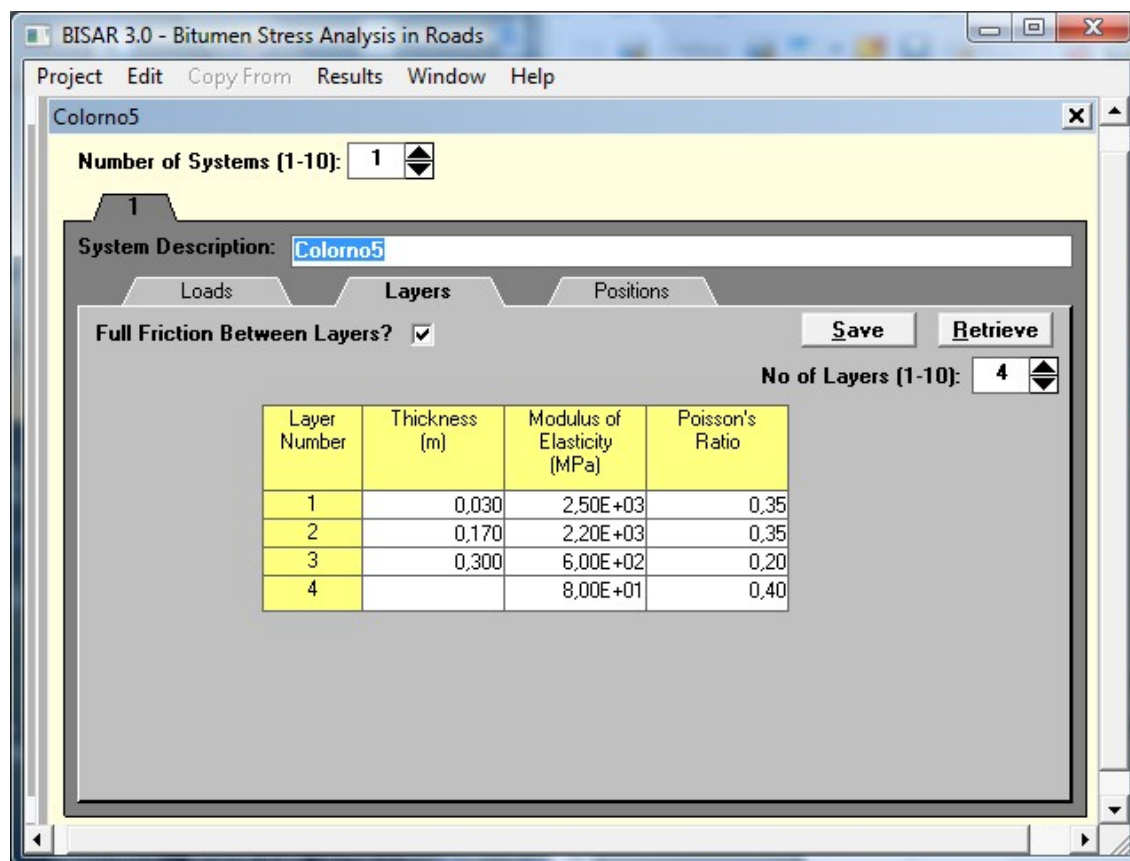


Fig. 11.19: Schermata 2

Schermata 3

Nell'ultima schermata "Positions", andranno inserite le coordinate dei punti in cui vogliamo calcolare le tensioni, le deformazioni e le deflessioni, che solitamente coincidono con la superficie di contatto ruota-pavimentazione e con le interfacce di ogni strato, sia in corrispondenza dell'asse di simmetria relativo alle due ruote, sia in corrispondenza dell'asse relativo alla singola ruota.

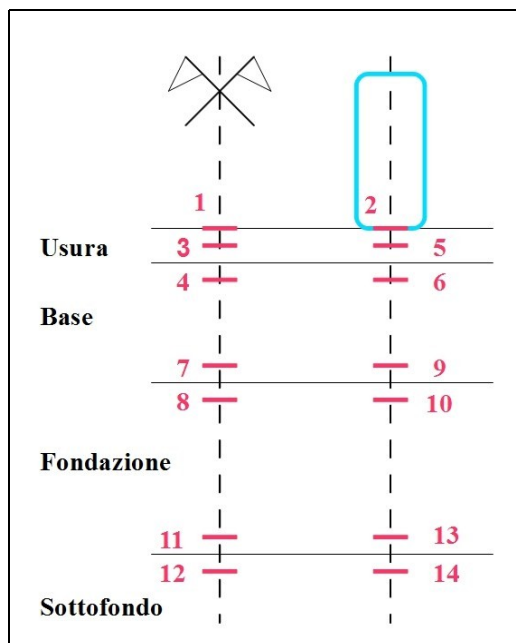


Fig. 11.20: Schematizzazione dei punti significativi di calcolo

Lungo l'asse z saranno riportate le profondità.

Il programma durante l'inserimento delle coordinate indicherà automaticamente il numero della posizione assegnata ed il numero dello strato che con quelle coordinate si è andato a considerare (o il numero degli strati nel caso di posizioni di interfaccia).

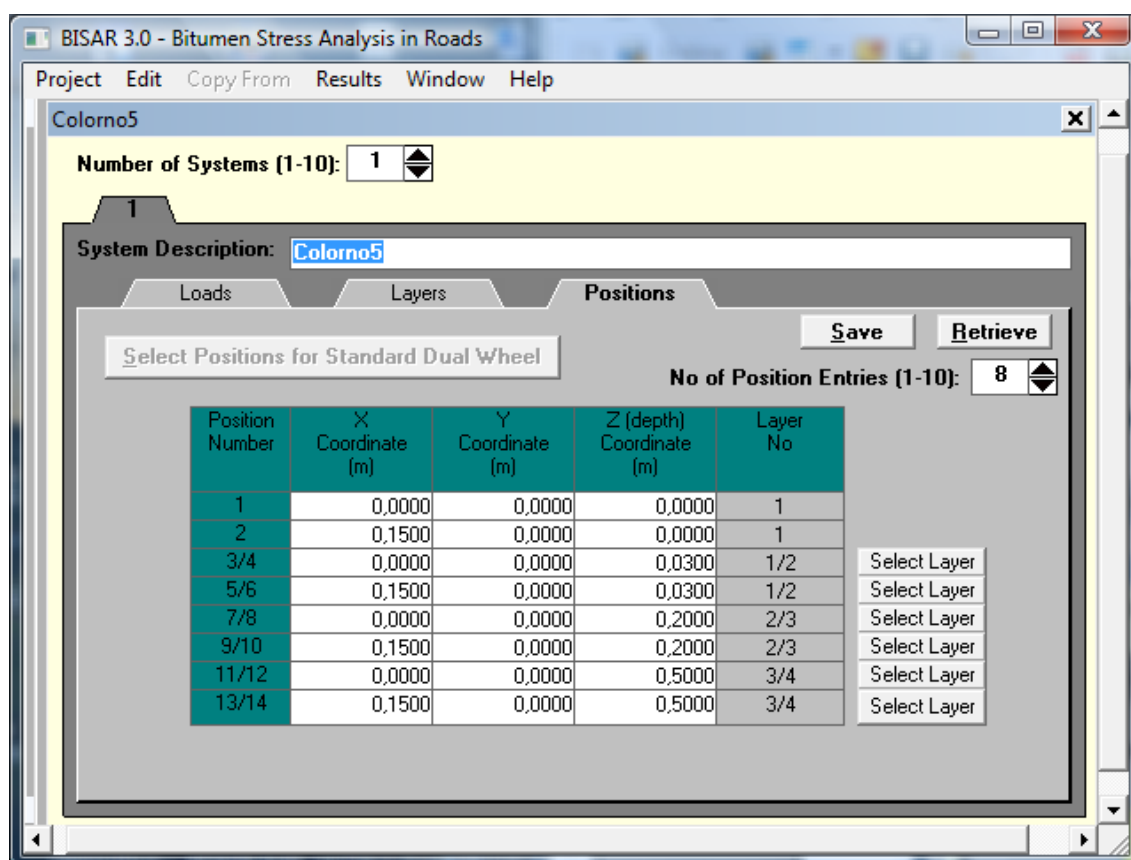


Fig. 11.21: Schermata 3

A questo punto, una volta che sono stati inseriti tutti i dati richiesti, si calcolano i risultati mediante apposito comando.

Dal "Block Report" potremo analizzare gli "Stresses", gli "Strains" e i "Displacements" relativi ai punti indicati nel primo riquadro (evidenziato nel rettangolo verde), che avevamo precedentemente inserito nella scheda "Positions"; è bene mettere in evidenza il fatto che il programma, nel caso di posizione di interfaccia, valuta le precedenti caratteristiche sia in relazione allo strato immediatamente precedente sia a allo strato immediatamente successivo.

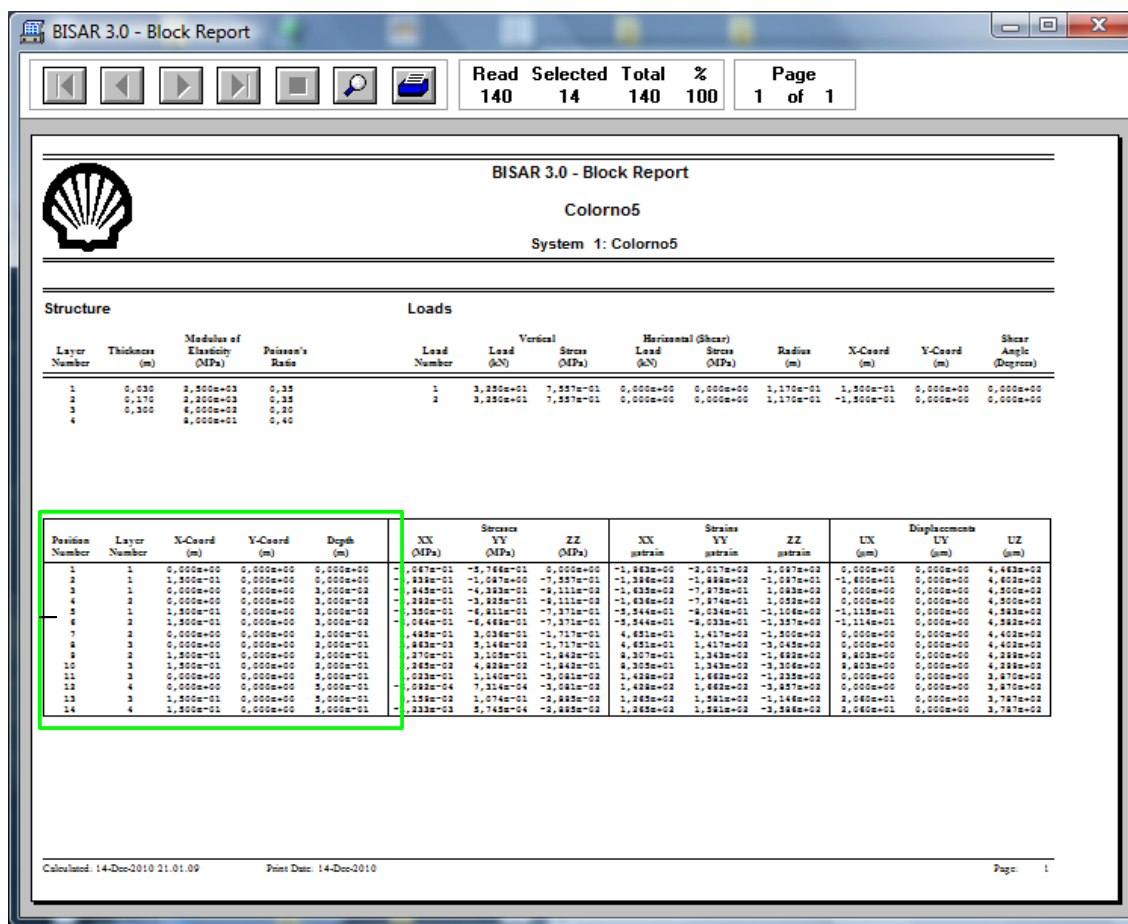


Fig. 11.22: "Block Report"

Riportiamo anche il "Block Report" nella pagina seguente, dalla quale si potranno desumere i valori necessari per la fase di verifica.



BISAR 3.0 - Block Report

Colorno5

System 1: Colorno5

Structure

Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal Load (kN)	Horizontal Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,030	2,500E+03	0,35	1	3,250E+01	7,557E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,170E-01	1,500E-01	0,000E+00	0,000E+00
2	0,170	2,200E+03	0,35	2	3,250E+01	7,557E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,170E-01	-1,500E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,300	6,000E+02	0,20									
4		8,000E+01	0,40									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	Stresses (MPa)			Strains (µstrain)			Displacements (µm)		
					XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
1	1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-2,067E-01	-5,766E-01	0,000E+00	-1,963E+00	-2,017E+02	1,097E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,463E+02
2	1	1,500E-01	0,000E+00	0,000E+00	-9,939E-01	-1,097E-00	-7,557E-01	-1,396E+02	-1,898E+02	-1,097E+01	-1,600E+01	0,000E+00	4,602E+02
3	1	0,000E+00	0,000E+00	3,000E-02	-5,945E-01	-4,393E-01	-9,111E-02	-1,635E+02	-7,975E+01	1,083E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,500E+02
4	2	0,000E+00	0,000E+00	3,000E-02	-5,292E-01	-3,925E-01	-9,111E-02	-1,636E+02	-7,974E+01	1,052E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,500E+02
5	1	1,500E-01	0,000E+00	3,000E-02	-6,350E-01	-6,811E-01	-7,371E-01	-5,544E+01	-8,034E+01	-1,108E+02	-1,115E+01	0,000E+00	4,583E+02
6	2	1,500E-01	0,000E+00	3,000E-02	-6,064E-01	-6,469E-01	-7,371E-01	-5,544E+01	-8,033E+01	-1,357E+02	-1,114E+01	0,000E+00	4,582E+02
7	2	0,000E+00	0,000E+00	2,000E-01	1,485E-01	3,036E-01	-1,717E-01	4,651E+01	1,417E+02	-1,500E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,402E+02
8	3	1,500E+00	0,000E+00	2,000E-01	3,863E-03	5,146E-02	-1,171E-01	4,651E+01	1,417E+02	-3,045E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,402E+02
9	2	1,500E-01	0,000E+00	2,000E-01	2,270E-01	3,105E-01	-1,842E-01	8,307E+01	1,943E+02	-1,692E+02	9,803E+00	0,000E+00	4,299E+02
10	3	1,500E-01	0,000E+00	2,000E-01	2,265E-02	4,828E-02	-1,842E-01	8,305E+01	1,943E+02	-3,306E+02	9,803E+00	0,000E+00	4,299E+02
11	3	0,000E+00	0,000E+00	5,000E-01	1,023E-01	1,140E-01	-3,081E-02	1,428E+02	1,662E+02	-1,235E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,870E+02
12	4	0,000E+00	0,000E+00	5,000E-01	-6,092E-04	7,314E-04	-3,081E-02	1,428E+02	1,662E+02	-3,857E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,870E+02
13	3	1,500E-01	0,000E+00	5,000E-01	9,159E-02	1,074E-01	-2,1895E-02	1,265E+02	1,581E+02	-1,146E+02	2,060E+01	0,000E+00	3,787E+02
14	4	1,500E-01	0,000E+00	5,000E-01	-1,233E-03	5,745E-04	-2,1895E-02	1,265E+02	1,581E+02	-3,586E+02	2,060E+01	0,000E+00	3,787E+02

11.5.3 Verifiche strutturali e funzionali

11.5.3.1 Descrizione

Dopo aver calcolato tensioni, deformazioni e deflessioni nei punti indicati col programma Bisar, si effettuano le verifiche di cui abbiamo precedentemente parlato nel paragrafo 11.1.8.

Relativamente alle caratteristiche strutturali e funzionali, dovranno essere rispettate le seguenti condizioni:

- 1) la deflessione massima in superficie u_{zz} dovrà essere < di 0,7 mm, per garantire un'adeguata portanza alla sovrastruttura;
- 2) la deformazione specifica massima nel conglomerato bituminoso, non dovrà superare il valore di 300 $\mu\epsilon$, affinché vi sia una scarsa propensione all'ormaiamento e alle deformazioni permanenti;
- 3) la tensione massima nel conglomerato bituminoso superficiale (usura+ binder per SV1, solo usura per SV2, e base per entrambe) nei casi di compressione e trazione, dovrà appartenere al range di valori [-1,0 MPa ; + 0,4 MPa], per ridurre i rischi di rottura degli strati legati;
- 4) la tensione radiale massima di trazione per una terra stabilizzata a calce e cemento, dovrà essere minore di un certo valore, assunto come quotaparte della tensione di rottura per trazione, per limitare la fessurazione; in fase di progettazione si era stimato un valore di σ_r (tensione a rottura) di 0,1 MPa, mentre per la σ_{rad} (tensione radiale) un valore di 0,08 MPa (80% di σ_r). Tuttavia questa ipotesi è stata indubbiamente troppo cautelativa, in quanto, nonostante i valori delle tensioni siano superiori a 0,08 MPa, i valori delle resistenze a compressione, resistenze a trazione e valori del C.B.R., sono di gran lunga superiori alle aspettative (vedi risultati tabelle, paragrafo 11.2.1.6). Ciò dimostra che in questa fase di verifica (a posteriori), possiamo anche considerare una tensione σ_r pari a 0,35 MPa, valore di riferimento standard per tutti i misti cementati e materiali legati a cemento in genere (ricordiamo tuttavia che in questo caso si sta parlando di fondazione stabilizzata a calce e cemento);
- 5) il controllo della deformazione verticale alla sommità del sottofondo dovrà essere inferiore a 800 $\mu\epsilon$, per evitare deformazioni plastiche della fondazione.

11.5.3.2 Risultati delle verifiche strutturali e funzionali

Considerando i risultati del "Block Report" ottenuto, possiamo schematicamente riassumere in una tabella le condizioni di verifica sopracitate e le motivazioni della richiesta, il campo in cui ricercare il parametro di interesse, i punti di analisi della pavimentazione e se la verifica è soddisfatta o meno, evidenziando in giallo chiaro quest'ultima situazione (vedi Tabella 11.33).

11.5.3.3 Conclusioni

Dalla lettura della tabella, per la vecchia pavimentazione SV1 non risultano verificate le condizioni relative alla massima deflessione superficiale, indice di scarsa portanza, alla deformazione specifica massima nel CB, che si riflette in un'accentuata propensione all'ormaiamento, e alle tensioni del conglomerato superficiale, con conseguenti rischi di rottura degli strati legati di base.

Le verifiche relative alla nuova pavimentazione SV2 risultano invece tutte soddisfatte, dimostrando il fatto che la nuova soluzione progettuale abbia sopperito alle mancanze della precedente; laddove poi le verifiche fossero già soddisfatte nel caso della vecchia pavimentazione, si sono comunque ottenuti notevoli miglioramenti.

VERIFICHE STRUTTURALI E FUNZIONALI						
Campo in cui ricercare il parametro per la verifica	Condizione di verifica	Motivo	Punti di analisi	Verifica vecchia pavimentazione (SV1)	Verifica nuova pavimentazione (SV2)	
Displacements	$u_{zz} < 0,7 \text{ mm}$	La deflessione massima in superficie deve essere limitata, per garantire un'adeguata portanza	1 - 2	0,868 mm < 0,7 mm Verifica non soddisfatta	0,460 mm < 0,7 mm Verifica soddisfatta	
Strains	$\max \{ \epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz} \} < +300 \mu\text{m}$	La deformazione specifica massima nei CB superficiali e deve essere limitata, affinché vi sia una scarsa propensione all'ormaiamento	1 - 2 - 4 - 6	319,4 μm < 300 μm	109,7 μm < 300 μm	
				Verifica non soddisfatta	Verifica soddisfatta	
Stresses	$\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} = -1,0 (C) + +0,4 (T) \text{ MPa}$	Le tensioni del conglomerato superficiale devono essere incluse nell'intervallo considerato, per evitare rischi di rottura degli strati legati di base	1 - 2 - 3 - 5	- 0,524 + 0,000	- 0,737 + 0,000	
				Verifica soddisfatta	Verifica soddisfatta	
				- 0,524 + + 1,322	- 0,737 + + 0,310	
Stresses	$\sigma_{rad} < +0,28 \text{ MPa}$	La tensione radiale di trazione (sul piano xy) nel misto cementato e materiali legati a cemento deve essere inferiore ad un certo valore per limitare la fessurazione	8 - 10 - 11 - 13		0,114 < 0,28	
					Verifica soddisfatta	
Strains	$\epsilon_{zz} < 800 \mu\text{m}$	Alla sommità del sottofondo la deformazione dovrà essere contenuta per evitare deformazioni plastiche dello strato	12 - 14	570 < 800	386 < 800	
				Verifica soddisfatta	Verifica soddisfatta	

Tab. 11.33: Verifiche strutturali e funzionali

11.5.4 Verifiche a fatica

11.5.4.1 Descrizione

Successivamente vengono effettuate anche delle verifiche a fatica per il conglomerato bituminoso (usura+binder per SV1, solo usura per SV2, e base per entrambe), per la terra stabilizzata a calce e cemento e per il sottofondo (in quest'ultimo caso sia in termini tensionali che deformativi), usando di volta in volta delle leggi specifiche, a seconda dello strato interessato:

- 1) la massima deformazione specifica orizzontale (quindi in direzione radiale) alla base dei conglomerati bituminosi, dovrà essere inserita in una legge di fatica che permetterà di stimare la vita utile della pavimentazione, in termini di assi equivalenti;
- 2) anche per la fondazione stabilizzata a calce e a cemento, ci si avvarrà di una particolare legge di fatica, nella quale comparirà la σ_r (resistenza a rottura del materiale per carico singolo), per la quale abbiamo assunto in fase di verifica il valore 0,35 MPa;
- 3) le tensioni verticali nei punti posizionati alla sommità del sottofondo, determineranno la resistenza a fatica del sottofondo stesso, mediante una particolare legge nella quale comparirà anche il modulo di deformazione E;
- 4) andranno infine verificate anche le deformazioni specifiche verticali (sempre alla sommità del sottofondo), da introdurre nella legge di fatica, per limitare il più possibile le deformazioni permanenti.

11.5.4.2 Risultati delle verifiche a fatica

Similmente al caso precedente possiamo impostare una tabella nella quale indicheremo le verifiche a fatica da effettuare, la legge utilizzata, il parametro di interesse ed il campo in cui ricercarlo, i punti di analisi e se la verifica è soddisfatta o meno.

Evidenzieremo in giallo chiaro le situazioni che non soddisfano le verifiche (vedi Tabella 11.34).

11.5.4.3 Conclusioni

Dalla lettura della tabella, per la vecchia pavimentazione SV1 non risultano verificate le condizioni di fatica relative agli strati legati di base ed al sottofondo (in termini deformativi), essendo il numero di cicli sopportabile dagli strati stessi di gran lunga

inferiore al traffico di progetto. Queste mancanze vengono sopperite dalla nuova pavimentazione SV2, che tuttavia non soddisfa la verifica a fatica relativa allo strato superficiale di usura: difatti il traffico sopportato dal nuovo manto è di $2,23 \cdot 10^6$ assi equivalenti, all'incirca la metà del traffico di progetto stesso. Se dunque la vita utile della pavimentazione è stimata in 20 anni, ci potremmo aspettare qualche trattamento superficiale tra una decina d'anni, nel caso in cui il traffico rimanga coerente con quello stimato, poco meno invece se si dovesse verificare un aumento del TGM.

In ogni caso le prestazioni della nuova pavimentazione sono nel complesso ottime, a testimonianza del fatto che sia stata svolta non solo una buona fase di progettazione ed un attento studio di formulazione, ma anche un'accurata esecuzione dei lavori in tutti i suoi aspetti, dal confezionamento alla stesa e compattazione.

VERIFICHE A FATICA						
Campo in cui ricercare il parametro di interesse	Tipo di verifica	Legge utilizzata	Parametro di interesse	Punti di analisi	Verifica vecchia pavimentazione (SV1)	Verifica nuova pavimentazione (SV2)
Strains	Verifica a fatica degli strati legati a bitume (usura+ binder o solo usura)	$\epsilon_N = 0,005 \cdot N^{-0,234}$	$\epsilon_N = \max(\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy})$	3 - 5	Traffico di progetto indicativo 410 ⁶	2,23·10 ⁶ ($\mu\epsilon = 163$)
					Verifica soddisfatta	Verifica non soddisfatta
Strains	Verifica a fatica degli strati legati a bitume (Base)	$\epsilon_N = 0,005 \cdot N^{-0,234}$	$\epsilon_N = \max(\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy})$	7 - 9	0,017·10 ⁶ ($\mu\epsilon = 513$)	4,14·10 ⁶ ($\mu\epsilon = 141$)
					Verifica non soddisfatta	Verifica soddisfatta
Stresses	Verifica a fatica della terra stabilizzata a calce e cemento	$\sigma_N = \sigma_R \cdot (1 - K \cdot \log N)$	$\sigma_N = \max(\sigma_{xx}, \sigma_{yy})$	11 - 13		2,99·10 ²² ($\sigma_N = 0,114$)
					Verifica soddisfatta	Verifica soddisfatta
Stresses	Verifica a fatica del sottopondo (tensioni)	$\sigma = \frac{0,006 \cdot E_0}{1 + 0,7 \cdot \log N}$	σ_{zz}	12 - 14	1,04·10 ¹² ($\sigma_{zz} = 0,051$)	4,9·10 ²⁰ ($\sigma_{zz} = 0,031$)
					Verifica soddisfatta	Verifica soddisfatta
Strains	Verifica a fatica del sottopondo (deformazioni)	$\epsilon_{zz} = 0,018 \cdot N^{-0,234}$	ϵ_{zz}	12 - 14	0,99·10 ⁶ ($\mu\epsilon = 570$)	4,73·10 ⁶ ($\mu\epsilon = 386$)
					Verifica non soddisfatta	Verifica soddisfatta

Tab. 11.34: Verifiche a fatica

BIBLIOGRAFIA

- [1] - “EN-13108-1: La marcatura CE dei Conglomerati Bituminosi”, *Strade & Autostrade*, n. 2, Marzo - Aprile, 2010.
- [2] - Annette S., “WMA Technical Working Group”, PQ Corporation, December 12, 2007.
- [3] - Apostolo F., “Il ciclo di vita della strada”, *Le strade*, 7-8-2007.
- [4] - Apostolo F., “Sulla strada dell’Intermat 2009”, *Le strade*, n. 3, 2009.
- [5] - Baldi D., Polesi P., “Gestione dei rifiuti. La corretta attribuzione del codice CER”, 2006.
- [6] - Bocci M., “Tecniche di stabilizzazione e riciclaggio a freddo”, *Cold Recycling* 2007.
- [7] - Bocci M., Grilli A., Riviera P., Tolentino F., Paglione S., “Il riciclaggio a freddo per l’ampliamento alla terza corsia dell’autostrada A 14”, *Strade & Autostrade*, n. 6, 2008.
- [8] - Bonola M., “Il riciclaggio come strumento di gestione della manutenzione”, *Le strade*, n. 5, 2005.
- [9] - Bonola M., Foschi R., “Riciclaggio in situ di pavimentazioni drenanti: primi risultati”, *Le strade*, n. 4, 2004.
- [10] - Bragaglia M., “Studio del comportamento visco-elastico del conglomerato bituminoso con il metodo degli elementi distinti particellari”, *Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Trasporti, Università degli studi di Bologna*, 2007.
- [11] - Bressi G., “Rifiuti inerti: dalla circolare n. 5205/2005 nuove prospettive per il riciclaggio”, *Ambiente & Sicurezza - Il sole 24ORE*, n. 21, 1 Novembre 2005.
- [12] - Bressi G., Micco S., “La produzione di aggregati riciclati in Italia”, *Anpar*, Novembre 2007.
- [13] - Bressi G., Pagani L., “La Marcatura CE degli aggregati riciclati. Gli aggregati riciclati - Riciclare per l’ambiente”, *Pisa* 2004.

- [14] - Brian D.P., Ph.D., P.E, Principal Engineer Advanced Materials Services, LLC, “Warm Mix Asphalt: European Practice”, Chapter 3, February 2008.
- [15] - Camomilla G., “Pavimentazioni über Alles”, *Le Strade*, n. 10, 2009.
- [16] - Capanelli F., “Leganti bituminosi per la stabilizzazione di fondazioni stradali e riciclaggio di fresati per strati di base e binder”, presentazione Valli Zabban, CGS Consolidamenti, Stresa 2009.
- [17] - Castagnetta V., “Il riciclaggio delle pavimentazioni bituminose stradali invecchiate”, 1985.
- [18] - Cattini E., “Riciclato...come nuovo”, *Quarry and construction*, n. 11, 2001.
- [19] - Cesolini E., Drusin S., “La capacità portante delle pavimentazioni misurata ad alto rendimento e collegata al capitolato d'appalto prestazionale ANAS”.
- [20] - Circolare 5205 del 15/07/2005, Ministero dell'Ambiente, “Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale, ambientale, ai sensi del Decreto Ministeriale 8 Maggio 2003, n. 203”.
- [21] - D.Lgs 3 Aprile 2006, n. 152, “Norme in materia ambientale”.
- [22] - Decreto Legislativo del 5 Febbraio 1997, n. 22, “Decreto Ronchi”.
- [23] - Di Lauro A., Sicher S., Grimaldi D. (ARPA Liguria), Varaglioti M., Fabbri A., Sacco C., Cinquetti P. (AMIU Genova S.p.A.), “Linee guida sui rifiuti speciali - Costruzione e Demolizione”, Phare twinning project RO2004/IB/EN-07, “Implementation and enforcement of the environmental Acquis focussed on industrial waste management”, 2007.
- [24] - EAPA position paper, “The use of Warm Mix Asphalt”, January 2010.
- [25] - Fioravanti R., Tattolo S., Begliardi F., Menconi G., “Superfoam 80, il bitume per interventi di riciclaggio a freddo con schiuma di bitume”, *Strade & Autostrade*, n. 2, 2004.
- [26] - Foschi R., “Breve storia del riciclaggio delle pavimentazioni”, *Le strade*, n. 11, 2000.

- [27] - Foschi R., “Demolizione e riciclaggio delle pavimentazioni stradali”, *Il nuovo Cantiere*, n. 5, 1998.
- [28] - Foschi R., Bonola M., “Schema manutentorio integrato delle pavimentazioni stradali”, *Le strade*, n. 4, 2003.
- [29] - Galeotto A., “Aggregati, dal 1° Giugno marcatura CE obbligatoria. Le novità introdotte dalle nuove norme europee sui prodotti da costruzione”, *Edilizia & Territorio*, n. 22, 2004.
- [30] - Garofalo M., “Riciclaggio a freddo con impianto mobile”, *Convention di CGS Group*, 26 Marzo 2009.
- [31] - Gellini G.G., Rebecchi C., “Emulsione modificata e ASPHA-MIN: alte prestazioni ecosostenibili”, *Le strade*, n. 1, 2007.
- [32] - Gestione delle pavimentazioni stradali, “Linee guida di progetto e norme tecniche prestazionali”, *Anas*, edizione 2008.
- [33] - Gesto, “Produzione economica di conglomerati a freddo con bitume schiumato”, 1999.
- [34] - Giannattasio F., “Rigeneranti per il fresato”, *Le Strade*, n. 1345, 1999.
- [35] - Giuliani F., Merusi F., “Studio della reologia alle alte temperature dei bitumi modificati con cere Fischer-Tropsch”, *Rassegna del bitume*, n. 58, 2008.
- [36] - Laforgia G., “Il riciclaggio di materiale proveniente da costruzioni e demolizioni: controllo sulla qualità del prodotto e suoi possibili utilizzi”, *Il nuovo cantiere*, n. 5, 1998.
- [37] - Le bouc Hervé, “A75 highway: innovation on a large scale”, *Routes* n. 25, *Colas Group Magazine*, Settembre 2010.
- [38] - Loprencipe G., Drago D., *Quaderno AIPCR “Tecniche e aspetti normativi del riciclaggio nelle pavimentazioni stradali” per il XXV Convegno Nazionale Stradale - Comitato Tecnico C 4.3 “Pavimentazioni stradali”*, Napoli 4-7 Ottobre 2006.
- [39] - Lucchese A., “Qualificazione dei materiali da costruzione: la marcatura CE - Aggregati riciclati: un prodotto di qualità”, *Convegno Rimini*, 9 Novembre 2006.

- [40] - Manutenzione e costruzione delle pavimentazioni, “Norme tecniche d'appalto prestazionali”, Autostrade per l'Italia, edizione 2004.
- [41] - Marradi A., “La progettazione di interventi di riciclaggio a freddo”, Convention di CGS Group, 26 Marzo 2009.
- [42] - Marradi A., “Verifiche prestazionali su materiali riciclati a freddo”, Cold recycling 2007, Expo Edilizia, Roma, 13 Marzo 2007.
- [43] - Montanelli F., “Una pavimentazione stradale innovativa e a basso impatto ambientale”, Strade & Autostrade, n. 2, 2007.
- [44] - Montanelli F., Cavalla A., “La produzione di conglomerati bituminosi tiepidi con additivi polifunzionali innovativi Interlow-T”, Strade & Autostrade, n. 3, 2007.
- [45] - Nebbia G., “La benzina sintetica”, 2006.
- [46] - Olard F., Le Noan C., Romier A., “I conglomerati a bassa energia EBE e a bassa temperatura EBT”, Strade & Autostrade, n. 3, 2007.
- [47] - Picariello F., “Studio del modulo di rigidità dinamico ISTM dei conglomerati bituminosi con test di trazione indiretta mediante l'utilizzo del Matta”, Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Trasporti, Università degli studi di Bologna, 2006.
- [48] - Quaderno AIPCR “Movimenti di terra drenaggi sottofondi”, per il XXV Convegno Nazionale Stradale - Comitato Tecnico C 4.5 “Pavimentazioni stradali”, Napoli 4-7 Ottobre 2006.
- [49] - Quaderno AIPCR, “Tecnologie per la produzione di conglomerati bituminosi con processi a bassa temperatura”, per il XXV Convegno Nazionale Stradale - Comitato Tecnico C 4.3, “Pavimentazioni stradali”, Napoli 4-7 Ottobre 2006.
- [50] - Radoani E., “Il treno di riciclaggio”, n. 7-8, Le strade, 2003.
- [51] - Ravaioli S., “Asfalto, CO₂ e protocollo di Kyoto. La riduzione dell'anidride carbonica per uno sviluppo eco-sostenibile”, Siteb, Rassegna del bitume, n. 57, 2007.
- [52] - Ravaioli S., “Emulsioni bituminose”, Siteb, Prima edizione, Settembre 2004.

[53] - Sangiorgi C., “La misura della portanza con il Light Falling Weight Deflectometer (LFWD)”, *Strade & Autostrade*, n. 2, 2006.

[54] - Santella F., “Tutti i vantaggi del tiepido”, *Materiali, Le strade*, n. 11, 2007.

[55] - Santucci L., “Warm Mix Asphalt Hits the Road”, *Pavement Technology Update*, n. 1, Volume 2, 2010.

[56] - Simone A., appunti del corso di “Tecnica e sicurezza dei cantieri Viari”, 2006-2007.

[57] - Simone A., Sangiorgi C., “La sicurezza ed il rispetto per l’ambiente, le novità tecnologiche e normative del settore stradale - Le pavimentazioni stradali “a manutenzione zero”: caratterizzazione dei materiali e criteri progettuali”, *Convegno Nazionale*, 4 Maggio 2006.

[58] - Skinner S., “Road sustainability - environmentally friendly machines and processes for road building”, *Construction Europe*, 2010.

[59] - Vaitkus A., Čygas D., Laurinavičius A., Perveneckas Z., “The Baltic journal of road and bridge engineering”, *Analysys and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania*, Vol. IV, n. 2, 2009.

[60] - Walker D., “Emerging Warm Mix Asphalt Technologies,” *Asphalt Magazine*, Vol. 24, No. 2, Asphalt Institute, Summer 2009.

[61] - WWW.BUILDUP.IT, “Il conglomerato bituminoso: alcuni chiarimenti su modulo di elasticità e l’alto modulo”, *sintesi tratta dalla rivista Rassegna del bitume* n. 57, 2007.

Ringraziamenti

In questo lungo percorso che mi ha permesso di raggiungere un importante traguardo come la laurea, è quasi impossibile ringraziare tutte quelle persone che con piccoli gesti, con poche parole, e a volte semplicemente con uno sguardo, ti hanno permesso di andare avanti anche quando le difficoltà sembravano così grandi da non poter essere superate.

In questi anni ho capito che per raggiungere un obiettivo, le qualità più importanti di cui ci si deve armare sono la volontà, la tenacia, ma soprattutto la capacità di rialzarsi nel momento in cui si cade; solo in questo modo sarà possibile tagliare qualsiasi traguardo.

Non so quanti e quali obiettivi potrò ancora portare a termine nella mia vita, ma nel frattempo ringrazio tutti coloro che mi hanno permesso di raggiungere questo.

Un ringraziamento speciale va al Prof. Ing. Andrea Simone, che mi ha guidato nell'ultima parte di questo percorso, mostrando una grande disponibilità e chiarendo ogni mia incertezza.

Un immenso grazie va a tutte quelle persone che mi hanno sostenuto moralmente durante tutti gli anni del mio corso di studi: mia nonna Ada, i miei genitori Ida e Giuseppe, mio fratello Leo e la sua famiglia, Antonio, Giuseppe e Sara, Ioanna, Francesca, Giulio, Lilia, Christina e tutti i miei amici, vicini e lontani.

Un grazie di cuore anche a tutte le ragazze che ho conosciuto durante il corso di Geologia del Prof. Landuzzi, che non solo hanno dimostrato una grande disponibilità nei miei confronti, ma si sono rivelate anche delle ottime amiche; ricorderò sempre con molto affetto il Prof. Landuzzi stesso, che mi ha permesso di gioire per il voto più alto di tutta la mia carriera universitaria, in un momento decisamente inaspettato.

Ringrazio anche mia zia Maria, che purtroppo per poco tempo non è riuscita a essermi vicina in questo giorno, ma che sono sicura lo sarà da lontano e da un posto migliore di questo.